

**Tätigkeitsbericht**



2015 – 2018



**Tätigkeitsbericht 2015–2018**



[www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de)

Der Tätigkeitsbericht fasst die Arbeit des Vereins Deutscher Zementwerke e.V., der VDZ gGmbH und der FIZ GmbH im Berichtszeitraum zusammen.

#### **Herausgeber**

Verein Deutscher Zementwerke e. V.  
Tannenstraße 2  
D-40476 Düsseldorf  
Telefon: +49-211-45 78-1  
Telefax: +49-211-45 78-296  
E-Mail: [vdz@vdz-online.de](mailto:vdz@vdz-online.de)

VDZ gGmbH  
Tannenstraße 2  
D-40476 Düsseldorf  
Telefon: +49-211-45 78-1  
Telefax: +49-211-45 78-296  
E-Mail: [info@vdz-online.de](mailto:info@vdz-online.de)

FIZ GmbH  
Tannenstraße 2  
D-40476 Düsseldorf  
Telefon: +49-211-45 78-1  
Telefax: +49-211-45 78-256  
E-Mail: [fiz@vdz-online.de](mailto:fiz@vdz-online.de)

Gesamtproduktion:  
Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf  
Titelbild [M, Ausschnitt]: Stefanie Grebe

<b>Vorwort .....</b>	<b>7</b>
<b>1 VDZ – Tradition und Innovation seit 1877.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Aufgaben, Tätigkeiten und Strukturen des VDZ .....</b>	<b>10</b>
1.1.1 Verein Deutscher Zementwerke .....	10
1.1.2 Gremien und Ausschüsse .....	11
1.1.3 Mitgliedschaften, Initiativen und Beteiligungen .....	12
1.1.4 Internationale Zusammenarbeit .....	13
1.1.5 Kongresse und Tagungen .....	13
1.1.6 Neubau des Forschungsinstituts.....	15
1.1.7 Statistik, Compliance und Datenschutz .....	16
<b>1.2 Zementindustrie in Deutschland und Europa .....</b>	<b>17</b>
1.2.1 Zementmarkt in Deutschland.....	17
1.2.2 Rohstoffeinsatz und -politik.....	20
1.2.3 Energieeinsatz und -politik .....	22
1.2.4 Klimaschutz und -politik .....	22
<b>1.3 Umweltschutz und Nachhaltigkeit .....</b>	<b>24</b>
1.3.1 Klimaschutz in der deutschen Zementindustrie .....	24
1.3.2 Energiebedarf und Energieeffizienz.....	26
1.3.3 Immissionsschutz und Emissionsminderung .....	31
1.3.4 Verwertung von Abfällen .....	33
1.3.5 Nachhaltiges Bauen .....	34
<b>1.4 Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz .....</b>	<b>36</b>
1.4.1 Arbeitssicherheit .....	36
1.4.2 Produktbezogener Arbeits- und Gesundheitsschutz .....	38
<b>1.5 Personalentwicklung und Qualifizierung .....</b>	<b>39</b>
1.5.1 Kurse und Lehrgänge des VDZ .....	39
1.5.2 Lernen und Arbeiten mit digitalen Medien.....	41
<b>1.6 Güteüberwachung und Zertifizierung .....</b>	<b>42</b>
1.6.1 Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle .....	42
1.6.2 Qualitätssicherung von Zement und Bindemitteln .....	43
<b>1.7 Normen und Regelwerke für Zement und Beton .....</b>	<b>45</b>
1.7.1 Weiterentwicklung der Normen für Zement und andere Bindemittel .....	45
1.7.2 Normen für das Bauen mit Beton .....	46
1.7.3 Europäische Bauproduktenverordnung.....	50
1.7.4 Umweltaanforderungen an zementgebundene Baustoffe in Kontakt mit Grundwasser und Boden .....	51
1.7.5 Hygienische Anforderungen an zementgebundene Baustoffe in Kontakt mit Trinkwasser .....	52
1.7.6 Regelungen AKR in Deutschland und Europa .....	53
1.7.7 Brandschutz .....	55
1.7.8 Verkehrswegebau .....	55



<b>2</b>	<b>Leistungsangebote des VDZ</b> .....	<b>58</b>
2.1	Umwelt- und Verfahrenstechnik .....	58
2.2	Chemie und Mineralogie .....	62
2.3	Beton und Betonausgangsstoffe .....	65
2.4	Produktzertifizierung .....	70
2.5	Zertifizierung und Verifizierung .....	71
2.6	Umweltmessstelle .....	73
2.7	Qualifizierung .....	75
<b>3</b>	<b>Forschungsprojekte des VDZ</b> .....	<b>82</b>
3.1	<b>Verfahrenstechnik der Zementherstellung</b> .....	<b>82</b>
3.1.1	Untersuchung der separaten Feinstmahlung von Zementen zur Verbesserung der Energieeffizienz und der Zementeigenschaften .....	82
3.1.2	Untersuchung von Maßnahmen zur Steigerung der Ersatzbrennstoff-Substitution in der Hauptfeuerung von Zementdrehrohröfen .....	84
3.1.3	Erhöhung der Energieeffizienz und Substitutionsrate im Klinkerbrennprozess durch Trocknung und Mahlung von Alternativbrennstoffen .....	85
3.1.4	Entwicklung eines Verfahrens zur Verwertung von MVA-Schlacke als Rohstoffkomponente bei der Zementherstellung .....	87
3.2	<b>Umweltverträgliche Zementherstellung</b> .....	<b>89</b>
3.2.1	Hg-Frachten im Zementherstellungsprozess: Senkung der Hg-Frachten in Zementdrehofenanlagen durch den Einsatz von Sorbentien – Emissionsminderung bei gleichzeitiger Beibehaltung der Produktqualität .....	89
3.2.2	Emissionsreduktion in der Steine und Erden-Industrie durch modellbasierte Prozessoptimierung (EMREDPRO) .....	90
3.2.3	Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie) .....	92
3.2.4	CEMCAP – CO <sub>2</sub> -Abscheidung in der Zementproduktion .....	93
3.2.5	CLEANKER: CO <sub>2</sub> -Abscheidung mittels integriertem Calcium Looping-Prozess .....	95
3.2.6	ECO – Methanisierung zur Verwertung von abgetrenntem CO <sub>2</sub> und Speicherung erneuerbarer Energie .....	96
3.2.7	Energieeffiziente trockene CO <sub>2</sub> -Abtrennung aus Abgasen am Beispiel der Zementindustrie .....	97
3.3	<b>Leistungsfähigkeit von Zement</b> .....	<b>99</b>
3.3.1	Einfluss der Verringerung von Schmelzpunkt und Viskosität der Klinkerschmelze durch Aschen alternativer Brennstoffe auf Sinterreaktionen und Coatingbildung .....	100
3.3.2	Hochleistungsklinker für Hochofenzemente .....	100
3.3.3	Beurteilung von Portlandzementklinker mittels mikroskopischer und röntgenografischer Analysemethoden zur Bewertung des Klinkerbrennprozesses .....	102
3.3.4	Eignung von dolomitreichen Carbonatgesteinen als Zementhauptbestandteil .....	103
3.3.5	Einflüsse der Temperatur auf Wechselwirkungen zwischen Fließmitteln und Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen .....	104
3.3.6	Prüfung und Bewertung des wirksamen Alkaligehalts von Zementen .....	106
3.3.7	Modifiziertes Sulfatwiderstandsprüfverfahren .....	107

<b>3.4</b>	<b>Leistungsfähigkeit von Beton.....</b>	<b>109</b>
3.4.1	AKR-Schädigungspotenzial von Betondecken auf Straßen, Busverkehrs- und Parkflächen im kommunalen Bereich .....	109
3.4.2	Verhalten verschiedener Gesteine unter beschleunigenden Bedingungen in AKR-Prüfverfahren .....	110
3.4.3	Carbon Concrete Composite – C <sup>3</sup> .....	112
3.4.3.1	Teilprojekt 1: Nachweis- und Prüfkonzepte für Normen und Zulassungen .....	112
3.4.3.2	Teilprojekt 2: Beschleunigung von Regelwerksetzung und Genehmigungsverfahren im Hinblick auf eine versuchsgestützte Bemessung und Performanceprüfungen für C <sup>3</sup> -Produkte (CarbonSpeed) .....	113
3.4.3.3	Teilprojekt 3: Charakterisierungs- und Auslaugversuche zur Bestimmung der Umweltverträglichkeit von C <sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite.....	113
3.4.4	Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit hüttensand- und flugaschereichen Zementen .....	115
3.4.5	DURAFOR – Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Betonen mit neuen klinkerbasierten Zementen.....	116
3.4.6	Einfluss betontechnologischer Parameter auf die Feuchtespeicherung und den Feuchtetransport in Betonen und Zementestrichen sowie auf den hieraus resultierenden Feuchtegehalt unter verschiedenen Umweltbedingungen ...	118
3.4.7	Nachträgliche Ermittlung der Betonzusammensetzung .....	119
3.4.8	Erweiterte Erstprüfung für Luftporenbeton mit Fließmittel unter Berücksichtigung baupraktischer Bedingungen.....	121
3.4.9	Vermeidung einer schädigenden AKR durch Portlandflugaschezement – Wirkungsmechanismen im Beton.....	123
3.4.10	Schädigungsmechanismen von Beton unter Frosteinwirkung: Einfluss von Zementhauptbestandteilen auf die innere Gefügeschädigung .....	124
3.4.11	Granulometrie der Zementhauptbestandteile – Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit von Betonen mit kalksteinhaltigen Zementen .....	125
3.4.12	Grenzzustandsbezogene Optimierung von Betonzusammensetzungen: Ein Schritt zur weiteren Reduzierung der CO <sub>2</sub> -Emissionen bei der Herstellung von Beton?.....	126
3.4.13	Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation .....	128
3.4.13.1	Teil 1: RC-Gesteinskörnung – Anwendung im Zement .....	128
3.4.13.2	Teil 2: RC-Gesteinskörnung – Ökobilanzierung der Zement- und Betonherstellung .....	129
3.4.13.3	Teil 3: Bewertung der Alkaliempfindlichkeit rezyklierter Gesteinskörnungen .....	130
3.4.14	Wechselwirkungen zwischen Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen und Methylcellulosen sowie deren Leistungsfähigkeit in modernen, mineralischen Trockenmörteln .....	131
3.4.15	Optimale Verdichtung leichtverarbeitbarer Betone mit hoher Robustheit .....	132
3.4.16	Frost-Tausalz-Widerstand zweischichtiger Betonpflastersteine – Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Laborprüfverfahren .....	133
<b>3.5</b>	<b>Wissenstransfer und Medien.....</b>	<b>136</b>
3.5.1	BetonQuali – Informations- und Qualifizierungsplattform .....	136
3.5.2	Nachhaltige Bildung von Arbeitskräften der Zementindustrie in Russland (BIRUZEM) .....	137
3.5.3	WiTraBau – Wissenstransfer im Bauwesen .....	139
	<b>Anhang .....</b>	<b>144</b>
	Personen und Gremien .....	144
	Veröffentlichungen .....	145



Liebe Leserinnen und Leser unseres Tätigkeitsberichts,

der VDZ informiert in regelmäßigen Abständen mit seinem Tätigkeitsbericht über seine Arbeit in den letzten Jahren. Auch für den zurückliegenden Berichtszeitraum der Jahre 2015 bis 2018 war der VDZ als weltweit anerkanntes Kompetenzzentrum für die Zementindustrie tätig und hat durch vielfältigste Aktivitäten zur Förderung der Betonbauweise beigetragen. Eingebunden in zahlreiche nationale und internationale Forschungsprojekte, insbesondere als Gründungsmitglied der European Cement Research Academy (ECRA), hat der VDZ Erkenntnisse erzielt, die wesentliche Beiträge zu einer nachhaltigen Zementherstellung und –anwendung leisten. Sie sind das Resultat der Gemeinschaftsarbeit der deutschen Zementindustrie, die sich seit mehr als 140 Jahren bis heute bewährt.

Beton und Zement sind die Baustoffe, die eine moderne Gesellschaft für ihren Brücken, Straßen, Schulen, Krankenhäuser, Turnhallen, Sportarenen sowie für ihre Büro- und Wohngebäude benötigt. Die Prognose des weltweiten Bedarfs an Beton und Zement geht von einer weiteren Zunahme aus – nicht zuletzt deshalb, weil angesichts des Bevölkerungswachstums in vielen Ländern der Welt ein enormer Nachholbedarf an Infrastrukturmaßnahmen besteht. In Anbetracht dieser Entwicklung, der anhaltend guten Baukonjunktur sowie der weltweiten Verfügbarkeit der zur Zementproduktion benötigten Rohstoffe wie 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 CO<sub>2</sub>-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 und deren Herstellung so umweltverträglich wie nur möglich zu gestalten. Hierzu arbeitet die Zementindustrie gemeinsam an vielen Zukunftsthemen, beispielsweise der weiteren Reduzierung von Emissionen und dem Klimaschutz, aber auch an der Digitalisierung entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton.

Die VDZ-Unternehmensgruppe hat sich in den letzten Jahren strukturell weiter entwickelt und ist gut für die vielfältigen Herausforderungen der Zukunft aufgestellt. Von besonderer Bedeutung ist hierbei das neue Gebäude des VDZ unweit der Hochschule Düsseldorf, das voraussichtlich 2019 bezugsfertig sein wird. Nach ungefähr 60 Jahren an der Tannenstraße in Düsseldorf erhält die Gemeinschaftsarbeit im VDZ damit ein neues und modernes Zentrum, das zahlreiche Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des VDZ bietet.

Gemeinsam mit Ihnen als Leserinnen und Lesern blicke ich zuversichtlich nach Vorne und wünsche Ihnen im Namen des VDZ eine anregende Lektüre.

Düsseldorf, im September 2018

Dr. Martin Schneider  
Verein Deutscher Zementwerke  
Hauptgeschäftsführer

# 1

8

## VDZ – Tradition und Innovation seit 1877





## 1.1 Aufgaben, Tätigkeiten und Strukturen des VDZ

### 1.1.1 Verein Deutscher Zementwerke ■

Der Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) ist die Gemeinschaftsorganisation der deutschen Zementhersteller. Seit mehr als 140 Jahren setzt er sich für die Belange seiner Mitgliedsunternehmen sowie eine umweltverträgliche Zementproduktion und eine qualitativ hochwertige Betonbauweise ein. Zweck des Vereins ist seit jeher die Förderung von Wissenschaft und Technik einschließlich der vorwettbewerblichen Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet hydraulischer Bindemittel. Hierzu unterhält der VDZ mit dem Forschungsinstitut der Zementindustrie ein weltweit einmaliges Kompetenzzentrum auf dem Gebiet der Zement- und Betonforschung. In wirtschafts-, rohstoff-, klima- und energiepolitischen Fragen vertritt der VDZ die Zementhersteller auf Landes- und Bundesebene sowohl in Berlin als auch in Brüssel.

#### 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 derzeit (2018) 18 Mitgliedsunternehmen des VDZ betreiben zusammen 46 Zementwerke in Deutschland und erwirtschaften mit mehr als 7 500 Beschäftigten jährlich einen Umsatz von gut 2 Mrd. Euro. Weiterhin zählt der VDZ fünf inländische sowie 22 ausländische Unternehmen zu seinen außerordentlichen Mitgliedern.

In der gemeinnützigen VDZ gGmbH bündeln sich die gemeinsamen Aktivitäten der deutschen Zementhersteller zur Förderung von Wissenschaft und Technik sowie der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Herstellung und Anwendung von hydraulischen Bindemitteln. Mit diesem Teil seiner Arbeit baut der VDZ auf seiner mehr als 140-jährigen Forschungstradition auf und sammelt und erarbeitet neue Erkenntnisse zur:

- Sicherstellung der Leistungsfähigkeit von Zement und Beton – insbesondere der Dauerhaftigkeit
- Erschließung neuer Anwendungsfelder für zementgebundene Baustoffe
- Beseitigung von Schwierigkeiten bei Herstellung und Anwendung von Zement und zementgebundenen Baustoffen
- Verwendung von alternativen Brenn- und Einsatzstoffen zur Herstellung von Zement und Beton
- Verbesserung des Betriebsverhaltens von Ofen- und Mahlanlagen
- Verminderung des Energieverbrauchs bei der Zementherstellung
- Verringerung der Emissionen von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und weiterer klima- und umweltrelevanter Stoffe bei der Zementherstellung
- Ökologische Beurteilung zementgebundener Baustoffe
- BIM-unterstützten Zustandserfassung und Instandsetzungsplanung von Betonbauwerken

Darüber hinaus vertreten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des VDZ diese Erkenntnisse gegenüber den Mitgliedsunternehmen des VDZ, Behörden, Hochschulen und der Gesellschaft.



Bild 1.1.1-1 VDZ-Hauptgeschäftsführer Dr. Martin Schneider

Fragen der Normung und Qualitätssicherung spielen dabei eine besondere Rolle. Gleichzeitig arbeiten VDZ-Experten an einer Verbesserung des betrieblichen Umweltschutzes und der Förderung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes. Über sein Weiterbildungswerk bietet der VDZ darüber hinaus mit Seminaren, Workshops, Online-Angeboten und mehrwöchigen Lehrgängen umfassende Fortbildungsangebote für die Steine-Erden-Industrie an. Zur Erfüllung seiner Aufgaben erbringt der VDZ entsprechende Dienstleistungen in den Bereichen Umwelt- und Betriebstechnik, Chemie und Mineralogie sowie Beton und Betonausgangsstoffe.

Der VDZ arbeitet zusammen mit der FIZ GmbH, die Aktivitäten im Bereich der unabhängigen Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsdienstleistungen bündelt. Hierzu betreibt die FIZ GmbH die folgenden Kompetenzzentren:

#### Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle)

Die Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Zementen und zementartigen Bindemitteln gehören zu den traditionellen Kernkompetenzen des VDZ. Damit trägt der VDZ seit vielen Jahrzehnten zur Erfüllung der Schutzziele der europäischen Bauproduktenverordnung sowie der Landesbauordnungen bei. Unsere PÜZ-Stelle ist für den Bereich Produktzertifizierung nach DIN EN ISO/IEC 17065 akkreditiert und zertifiziert Zemente, Betonausgangsstoffe sowie Mörtel.

#### Umweltmessstelle

Die Umweltmessstelle führt seit mehr als 40 Jahren Umweltmessungen im Rahmen der behördlichen Überwachung von genehmigungsbedürftigen Anlagen durch. Neben staub- und gasförmigen Emissionen untersucht die Umweltmessstelle auch Immissionen in der Umgebung von Zementwerken und führt Lärm- und Erschütterungsmessungen zur Erfüllung behördlicher Auflagen durch. Zusätzlich überprüft die Umweltmessstelle den ordnungsgemäßen Einbau kontinuierlich arbeitender Messeinrichtungen sowie deren Funktion und führt entsprechende Kalibrierungen durch. Seit Anfang der 1980er Jahre ist sie als unabhängige Messstelle nach §29b BImSchG bekanntgegeben und bietet ihre Tätigkeiten für Anlagen der 13. BImSchV und 17. BImSchV sowie TA Luft an. Darüber hinaus ist sie nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert.

#### Zertifizierungsstelle der FIZ GmbH (FIZ-Zert)

Die Zertifizierungsstelle der FIZ GmbH (FIZ-Zert) ist eine durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) nach DIN EN ISO/IEC 17021 und DIN EN ISO 14065 akkreditierte Stelle für die

Zertifizierung von Managementsystemen sowie die Verifizierung von Treibhausgasemissionsberichten. Ferner ist die FIZ GmbH seit 2017 auch eine vom Concrete Sustainability Council (CSC)

anerkannte Prüfeinrichtung zur Durchführung von CSC-Zertifizierungen bei Betonherstellern (siehe Abschnitt 2.5 CSC-Zertifizierungen).

### Christian Knell Präsident des Vereins Deutscher Zementwerke e. V.



**Bild: 1.1.1-2** VDZ-Präsident Christian Knell

Christian Knell, Sprecher der Geschäftsleitung von HeidelbergCement in Deutschland, wurde am 27.04.2017 von den Mitgliedern des VDZ e. V. zum neuen Präsidenten gewählt. Er folgte damit auf den langjährigen Präsidenten Gerhard Hirth, der die Geschicke des VDZ zwölf Jahre lang lenkte.

Mit Christian Knell führt weiterhin ein erfahrener „Zementler“ die Gemeinschaftsorganisation der deutschen

Zementhersteller. Knell war seit 2012 Vizepräsident des VDZ und ist seit über 25 Jahren in der Zementindustrie tätig. Nach seiner Wahl durch die VDZ-Mitglieder unterstrich Christian Knell, dass er von Gerhard Hirth eine gut aufgestellte Organisation übernimmt und sich darauf freut, den VDZ zum Wohle der Zementhersteller weiter mit zu entwickeln. Er sieht dabei besonders den Umwelt- und Klimaschutz sowie die Forschung rund um Zement und Beton als einen Schwerpunkt seiner Zeit als Präsident. „Die Standorte in Deutschland gehören in puncto Umweltschutz zu den besten der Welt – aber wir werden uns weiter verbessern“, erläuterte der neue Präsident. Für die Einhaltung der sehr ambitionierten umweltrechtlichen Vorgaben investieren die deutschen Hersteller derzeit rund 400

Millionen Euro in hochmoderne Abgasreinigungstechnik. „Dies ist ein starkes Bekenntnis der heimischen Zementhersteller zu den Standorten“, so Knell.

Bei seiner Wahl zum neuen VDZ Präsidenten würdigte Christian Knell die Zeit seines Vorgängers Gerhard Hirth an der Spitze des VDZ. Gerhard Hirth entwickelte den VDZ zu einer eigenständigen und professionellen Organisation weiter, die in dieser Art weltweit sicherlich einmalig ist. Der VDZ ist fest verwurzelt in der Zementindustrie und vertritt ihre Interessen in entscheidenden umwelt- und wirtschaftspolitischen Fragen. Darüber hinaus bietet er seinen Mitgliedsunternehmen und Kunden auf der ganzen Welt ein einzigartiges Dienstleistungsspektrum an. Als Dank und Anerkennung für seine Arbeit als VDZ-Präsident ernannte die Mitgliederversammlung Gerhard Hirth zum Ehrenvorstand. Dem VDZ kann er daher auch zukünftig beratend zur Seite stehen.

Für die kommenden Jahre sind die Herausforderungen für die Zementindustrie offensichtlich. So unterstrich Christian Knell insbesondere die große Bedeutung des Klimaschutzes. Gerade weil die rohstoffbedingten Prozessemissionen der CO<sub>2</sub>-Minderung bei der Zementherstellung aber Grenzen setzen, wünscht sich der neue Präsident mit Blick auf die Zukunft eine besonnene Politik. „Besonders in der Energie- und Umweltpolitik brauchen wir politische Entscheidungen mit Augenmaß, die auch künftig eine wettbewerbsfähige Zementproduktion in Deutschland ermöglichen.“

## 1.1.2 Gremien und Ausschüsse ■

Gemeinsam mit Vertretern aus der Industrie beraten die Mitarbeiter aller Gesellschaften des VDZ in Ausschüssen und Beiräten über aktuelle Aktivitäten, Forschungsprojekte und künftige Handlungsfelder rund um die Zement- und Betonherstellung. Im Folgenden werden die Gremien kurz vorgestellt:

### Ausschuss Betontechnik

Der Ausschuss Betontechnik befasst sich mit aktuellen Fragen der Betonherstellung und -anwendung. Hierbei begleitet er die entsprechenden Forschungsarbeiten des VDZ vor dem Hintergrund einer sachgerechten und qualitätsbewussten Anwendung von Zement und Beton in der Praxis. Hierzu unterhält der Ausschuss Betontechnik die Arbeitskreise Verkehrsbau, Regelwerke und Dauerhaftigkeit sowie die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Dauerhaftigkeitsklassen von Beton.

### Ausschuss Energie

Der Ausschuss Energie bearbeitet aktuelle Fragestellungen der deutschen und europäischen Energie- und Klimapolitik. Dazu zählen beispielsweise der europäische Treibhausgasemissionshandel, die deutsche Energiewende, die Besteuerung von Strom und Energieträgern sowie das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und

die Entwicklung der Stromnetzentgelte. Der Ausschuss bündelt die Fragen aller deutschen Zementhersteller auf diesem Gebiet

### Ausschuss Umwelt und Verfahrenstechnik

Neben den aktuellen Fragen der thermischen und mechanischen Verfahrenstechnik befasst sich der Ausschuss schwerpunktmäßig mit sicherheitsrelevanten, umwelttechnischen und energetischen Themen. Der Ausschuss betreut und initiiert Projekte innerhalb des umfangreichen Forschungsprogramms des VDZ.

Zur Erfüllung seiner Aufgaben unterhält der Ausschuss Umwelt und Verfahrenstechnik die Arbeitskreise Arbeitssicherheit, Emissionsminderung, Monolithische Massen, NO<sub>x</sub>-Minderung und Zerkleinerung.

### Ausschuss Zementchemie

Die Arbeiten des Ausschusses umfassen schwerpunktmäßig aktuelle analytische Fragestellungen, den produktbezogenen Arbeits- und Gesundheitsschutz sowie laufende Forschungsprojekte aus dem Bereich der Zementchemie, insbesondere zum Einsatz von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen und Zementen mit geringem Klinkeranteil. Hierzu unterhält der Ausschuss Zementchemie die Arbeitskreise Analytische Chemie, Leistungsfähigkeit von Zementbestandteilen, Zement und Zusatzmittel

sowie die Arbeitsgruppe Produktbezogener Arbeits- und Gesundheitsschutz.

### Fachausschuss der Überwachungsgemeinschaft

Der Fachausschuss der Überwachungsgemeinschaft des VDZ kontrolliert die objektive und unparteiische Durchführung der von der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle) durchgeführten Güteüberwachung. Insbesondere prüft er die Voraussetzungen zur Verleihung und zum Entzug von Zertifikaten in den Bereichen Produktzertifizierungen bzw. Zertifizierungen der werkseigenen Produktionskontrolle. In diesem Zusammenhang befasst sich der Ausschuss intensiv mit der aktuellen und zukünftigen Entwicklung gesetzlicher, behördlicher und normativer Regelwerke und deren Einfluss auf die Herstellung und Verwendung von Bauprodukten.

### Zertifizierungsbeirat

Der Zertifizierungsbeirat fungiert sowohl als Lenkungsgremium der Zertifizierungsstelle FIZ-Zert wie auch der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle) und prüft die Einhaltung der selbst gesetzten Standards sowie der geforderten Unabhängigkeit. Neben Vertretern der FIZ GmbH nehmen an den Sitzungen des Gremiums Vertreter der interessierten Kreise teil, z. B. der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, sowie Vertreter deutscher Zementhersteller.

### Technisch-wissenschaftlicher Beirat

Der Technisch-wissenschaftliche Beirat ist das Steuerungsgremium der Forschungsaktivitäten des VDZ. Die Ausschüsse des VDZ berichten dem Beirat über ihre derzeitigen Aktivitäten, Forschungsprojekte und künftigen Handlungsfelder. Der Beirat koordiniert die Aufgaben der einzelnen Ausschüsse und stimmt diese mit den aktuellen und künftigen Herausforderungen und Interessen der VDZ-Mitgliedsunternehmen ab.

### Externe Gremien

Darüber hinaus brachte sich der VDZ im Auftrag der deutschen Zementhersteller in mehr als 300 nationalen und internationalen Gremien anderer Organisationen ein. Hierzu gehören beispielsweise Normungsgremien des Deutschen Instituts für Normung (DIN) oder des Europäischen Komitees für Normung, die Arbeit mit befreundeten Verbänden wie z. B. dem Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e. V. (BTB), dem Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E. V. (DBV), dem Bundesverband Mineralische Rohstoffe e. V. (MIRO), der Deutschen Bauchemie e. V. (DBC), dem Betonverband Straße, Landschaft, Garten e. V. (SLG), dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt), dem Deutschen Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb), der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV) oder die politische Vertretung in Gremien des Bundesverbandes Baustoffe – Steine und Erden e. V. (bbs), des Bundesverbandes der Deutschen Industrie e. V. (BDI) oder des europäischen Zementverbandes CEMBUREAU.

## 1.1.3 Mitgliedschaften, Initiativen und Beteiligungen ■

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 Mitarbei-

tern des Instituts oder von Mitgliedsunternehmen in den Gremien dieser Organisationen.

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

Die AiF, zu deren Gründungsmitgliedern der VDZ gehört, fördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie die industrielle Gemeinschaftsforschung (kurz: IGF). Voraussetzung für die Förderung ist u. a., dass die Forschungsvereinigungen zusätzlich zur jeweiligen Fördersumme weitere Eigenmittel zur Verfügung stellen. In den vergangenen Jahren erhielt der VDZ regelmäßig Fördermittel der AiF für mehrere große Forschungsvorhaben. Hierfür sei der AiF und dem Bundeswirtschaftsministerium auch an dieser Stelle gedankt.

### Initiative für Nachhaltigkeit in der deutschen Zementindustrie

Mit ihrer Initiative für Nachhaltigkeit setzen sich die Sozialpartner der deutschen Zementindustrie seit 2002 für eine nachhaltige Entwicklung ihrer Branche ein. Neben dem VDZ engagieren sich in der Initiative die Sozialpolitische Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Zementindustrie e. V. (SPADZ), die Industriegewerkschaft Bauen-Agrar-Umwelt (IG BAU) sowie die Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IG BCE). Im Berichtszeitraum des vorliegenden Tätigkeitsberichts veröffentlichten die Sozialpartner gemeinsam eine vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie durchgeführte Studie zur Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie (siehe Box in Abschnitt 1.2.2). Im Jahr 2018 werden zudem zwei Untersuchungen abgeschlossen:

- eine Studie zur Hochwertigkeit des Abfalleinsatzes in der deutschen Zementindustrie – durchgeführt vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu)
- eine Studie zur Analyse des Status quo und der Potenziale von Industrie 4.0 in der deutschen Zementindustrie – durchgeführt von der RWTH Aachen.

### Informationszentrum Beton GmbH (IZB)

Bereits 1972 wurde das Informationszentrum Beton (IZB) von der deutschen Zementindustrie gegründet. Ziel war es, mit einer umfassenden Plattform das Informationsbedürfnis nach zementgebundenen Baustoffen aus einer Hand zu gewährleisten. Das IZB hat sich 2015 durch die Verschmelzung von BetonMarketing Deutschland und den regionalen BetonMarketing-Gesellschaften neu aufgestellt. Als zentrale Drehscheibe agiert das Informationszentrum Beton über das bewährte Beton-Netzwerk mit Kontakt- und Beratungsstellen in Beckum, Erkrath, Hannover und Ostfildern. Als Plattform der Hersteller und als Impulsgeber der Branche bietet das IZB ein Netzwerk für alle Partner am Bau. Zu den Kernaufgaben gehören die Markterweiterung, die Marktsicherung und die Imageförderung für zementgebundene Bauweisen. Neue Anwendungsbereiche für zementgebundene Baustoffe werden ebenso gezielt gefördert wie der Einsatz innovativer Produkte und Verfahren. Wesentliches Element dazu ist die technische Beratung von Bauherren, Bauausführenden, Architekten und Ingenieuren. Das IZB hat dabei sowohl den Hochbau als auch den Ingenieur- und Straßenbau im Blick, den Garten- und Landschaftsbau (GaLa-Bau) genauso wie das landwirtschaftliche Bauen. Die Inhalte orientieren sich am aktuellen Baugeschehen: Im Fokus stehen Betone und Verfahren, die verlässliche technische Lösungen ermöglichen, die Gestaltungsspielräume in der Architektur öffnen und die wirtschaftliches, qualitätsvolles und nachhaltiges Bauen unterstützen.

### Normensand GmbH

Die Normensand GmbH wurde 1954 von 23 westfälischen Zementwerken in Beckum gegründet. Hauptgeschäftsfeld ist die Herstellung von Prüfsanden. Dies sind aufbereitete Sande bestimmter Körnungen und mineralogischer Zusammensetzung, die zur Überwachung und Qualitätsprüfung von Zementen und weiteren Bindemitteln verwendet werden. Mit ihren Prüfsanden beliefert die Normensand GmbH Hersteller, Institute und Prüflabore in über 90 Ländern. Als einer der größten Abnehmer für Prüfsande in Deutschland hat der VDZ 2013 einen Großteil der Firmenanteile an der Normensand GmbH erworben.

### 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 und anderen Hochschulen wahr.

## 1.1.4 Internationale Zusammenarbeit ■

### CEMBUREAU

CEMBUREAU ist der Dachverband der europäischen Zementindustrie, in dem 31 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, der CO<sub>2</sub>-Minderung sowie des nachhaltigen Bauens im Vordergrund. Zudem wurde die gemeinsame europäische Arbeit zu den möglichen Auswirkungen der Zementverarbeitung auf die menschliche Gesundheit weitergeführt.

### NANOCEM

Im europäischen Forschungs- und Ausbildungskonsortium NANOCEM arbeitet der VDZ seit dessen Gründung im Jahr 2004 mit. NANOCEM besteht aus 34 Partnerorganisationen. Hierzu zählen Universitäten, nationale Forschungseinrichtungen und industrielle Partner. Mehr als 120 Forscher arbeiten in NANOCEM zusammen. Ziel ist es, die Kenntnisse über die Nano- und Mikrostrukturen des Zementsteins zu verbessern, um makroskopische Eigenschaften zementgebundener Baustoffe besser zu verstehen.

### European Cement Research Academy (ECRA)

Der VDZ gehört zu den Gründungsmitgliedern der European Cement Research Academy (ECRA), die im Jahr 2018 auf 15 Jahre gemeinsamer Arbeit zurückblickt. ECRA hat mittlerweile mehr als 45 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. Der VDZ unterstützt ECRA dabei regelmäßig mit der Expertise seiner Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler.

Ein Schwerpunktthema der ECRA ist die Abscheidung und Wiederverwertung (CCS/CCU – Carbon Capture and Storage/Utilisation) von Kohlenstoffdioxid aus den Abgasen der Drehofenanlagen von Zementwerken. Seit 2007 führt die ECRA zu diesem Thema umfangreiche Forschungsarbeiten durch, die in vielerlei Hinsicht



**Bild 1.1.5-1** VDZ-Geschäftsführer Dr. Martin Schneider auf der Jahrestagung Zement 2017

durch den VDZ unterstützt werden. Nachdem in den ersten Projektphasen theoretische und Laboruntersuchungen sowie Simulationen durchgeführt wurden, soll nun das Oxyfuel-Verfahren unter realen Bedingungen getestet werden (siehe Box in Abschnitt 1.3.1). In 2017 wurde mit der Planung eines Demonstrationsprojektes in zwei europäischen Zementwerken begonnen.

Ein weiteres Schwerpunktthema der ECRA ist die Erforschung neuer Mahltechniken innerhalb des 2014 begonnenen Forschungsprojektes „Future Grinding Technologies“. Darin wird der Frage nachgegangen, wie sich Mahlverfahren zukünftig entwickeln, und ob es gegebenenfalls innovative Verfahren gibt, die bislang in den Zementwerken noch nicht angewendet werden. Vor diesem Hintergrund wurde zunächst eine Datenbank mit mehr als 120 verschiedenen Mahlverfahren aus unterschiedlichsten Bereichen erarbeitet. Diese Zusammenstellung wird nun dahingehend analysiert, ob hieraus auch einzelne Gesichtspunkte auf gängige Mahlverfahren in der Zementindustrie übertragbar sind. ECRA arbeitet in diesem Schwerpunktthema eng mit dem Institut für Partikeltechnik in Braunschweig unter der Leitung von Professor Kwade zusammen. Hier werden die unterschiedlichen Mahlverfahren nicht nur modellhaft abgebildet, sondern darüber hinaus auch in Laboruntersuchungen verifiziert.

## 1.1.5 Kongresse und Tagungen ■

Zum Transfer der in den VDZ-Forschungsprojekten erworbenen Erkenntnisse in die Praxis richtet der VDZ verschiedene Veranstaltungen aus. Fester Bestandteil hierbei ist die jährliche VDZ-Jahrestagung Zement, die jeweils im September 2015, 2016 und 2017 durchgeführt wurde. Rund 400 Expertinnen und Experten der Zement- und Betonindustrie sowie verwandter Wirtschaftszweige suchten jährlich auf dem traditionellen Branchentreffen den fachlichen Austausch.

Im Rahmen der VDZ-Jahrestagung Zement 2016 wurde zum fünften Mal der Klaus-Dyckerhoff-Preis verliehen. Geehrt wurde Professor Dr.-Ing. Siegbert Sprung für sein Lebenswerk (siehe Box).

Die VDZ-Fachtagungen tragen zum Erfahrungsaustausch und zur Weiterentwicklung von Forschung und Technologie bei. Im Berichtszeitraum trafen sich Branchenexperten anlässlich der VDZ-Fachtagung Zementchemie in den Jahren 2015 und 2017. Die VDZ-Fachtagung Verfahrenstechnik wurde 2016 erfolgreich ausgerichtet und im März 2018 besuchten über 140 Experten die VDZ-Fachtagung Betontechnik.

## Klaus-Dyckerhoff-Preis an Prof. Dr. Sprung verliehen

Im Rahmen der VDZ-Jahrestagung Zement 2016 wurde Prof. Dr.-Ing. Siegbert Sprung am 27. September 2016 in Düsseldorf mit dem 5. Klaus-Dyckerhoff-Preis für sein Lebenswerk ausgezeichnet. Mit dem Preis würdigte die Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff-Stiftung Herrn Professor Sprungs herausragende Leistungen auf dem Gebiet der Zementeigenschaften und der Herstellung sowie Anwendung von Zement und Beton.

Während seiner bemerkenswerten beruflichen Tätigkeit hat Herr Professor Sprung von 1961 bis zum Jahr 1999 beim VDZ in Düsseldorf geforscht und gearbeitet. Zunächst als Oberingenieur, dann als Leiter der Abteilung Zementchemie und stellvertretender Leiter der Hauptabteilung Zementtechnik. 1988 wurde er Direktor der Hauptabteilung Zementtechnologie und Geschäftsführer des VDZ. Von 1998 bis zu seinem Ausscheiden im Jahre 2000 hatte er die Hauptgeschäftsführung des VDZ inne.

Sein umfangreiches Wissen und seine vielfältigen Berufserfahrungen spiegeln sich in zahlreichen Vorträgen und Publikationen wider, vor allem in seiner Habilitationsschrift „Technologische Probleme beim Brennen des Zementklinkers, Ursachen und Lösungen“ von 1982. In der Folge trug er als Dozent an der RWTH Aachen maßgeblich zur exzellenten Reputation des VDZ als Forschungs- und Kompetenzzentrum sowie der deutschen Zementforschung im Allgemeinen bei. 1987 wurde Siegbert Sprung zum apl. Professor an der RWTH Aachen ernannt. Während seiner Laufbahn lag es Professor Sprung immer besonders am Herzen, junge Wissenschaftler zu fördern und für die Erforschung und Weiterentwicklung von Zement und Beton zu begeistern.



**Bild 1.1.5-2** Stifterin Dr. Edith Dyckerhoff und Preisträger Prof. Dr.-Ing. Siegbert Sprung



**Bild 1.1.5-3** Ehrenvorstand Gerhard Hirth im Gespräch mit Preisträger Prof. Dr.-Ing. Siegbert Sprung

Laudator und VDZ-Hauptgeschäftsführer Dr. Martin Schneider betonte die überragende Bedeutung des Wirkens von Siegbert Sprung: „Vieles von dem, was wir heute über Zement und seine Eigenschaften wissen, haben wir seinen Arbeiten zu verdanken“, so Schneider.

Der Dyckerhoff-Preis wird alle zwei Jahre von der Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff-Stiftung verliehen, um besondere Verdienste auf dem Gebiet der Zementherstellung und -anwendung zu ehren. Die Auszeichnung ist mit 30000 Euro dotiert und gehört heute zu den anerkanntesten internationalen Preisen in diesem Bereich. Gewürdigt werden wegweisende Forschungsbeiträge oder berufliche Leistungen bei der (Neu-)Entwicklung von Anwendungs- und/oder Herstellungsverfahren im Bereich hydraulischer Bindemittel. Der Preis richtet sich an europäische Hochschulen, Forschungsabteilungen von wissenschaftlichen Instituten der Bau- und Baustoffindustrie sowie an Forschungsabteilungen der Unternehmen der Bau- und Baustoffbranche. 2016 wurde die Auszeichnung zum fünften Mal vergeben.

Seit 1994 fördert die Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff-Stiftung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft wissenschaftlichen Nachwuchs und außergewöhnliche Leistungen in den für die zementgebundenen Bauweisen maßgeblichen Technologien. „Lebenswertes Wohnen und Arbeiten in einer intakten Umwelt setzen ökonomische und ökologische Effizienz durch die intelligente Nutzung der zur Verfügung stehenden Stoff- und Energieressourcen voraus“, heißt es in der Ausschreibung zum Klaus-Dyckerhoff-Preis. Vor diesem Hintergrund seien bestehende und noch zu erforschende Herstellungs- und Anwendungstechnologien zementgebundener Bauweisen bei der Bauwerksplanung und -errichtung, der Nutzung und Beseitigung zu bewerten und durch innovative Impulse zu fördern.

### 1.1.6 Neubau des Forschungsinstituts ■

Das derzeitige Gebäude des VDZ aus den 1950er Jahren entspricht bezüglich des Raumangebots und der Raumaufteilung, der Infrastruktur und der Ausstattung bei Weitem nicht mehr heutigen technischen Standards und Anforderungen an modernes und effizientes Arbeiten. Eine Instandsetzung der bestehenden Altgebäude an der Tannenstraße im Bestand wurde nach eingehender Prüfung aus wirtschaftlichen Gründen nicht weiter verfolgt. Deshalb wurde bereits 2013 ein geeignetes Grundstück in Düsseldorf an der Toulouser Allee – unweit des derzeitigen Standorts – erworben. Mit dem Neubau wird die Grundlage für eine langfristig orientierte und solide Entwicklung des VDZ und der ihm zugeordneten Gesellschaften gelegt.

#### Das neue Gebäude

Der Bau des vom Architekturbüro Barkow Leibinger entworfenen und vom Architekturbüro pbr Planungsbüro Rohling AG weiter geplanten Gebäudes startete im April 2017 und soll Ende 2019 abgeschlossen sein. Auf dem Grundstück an der Toulouser Allee entsteht ein riegelförmiger Baukörper mit fünf oberirdischen, in Teilen horizontal verschobenen Geschossen. Diese verleihen dem Neubau nicht nur eine gewisse Dynamik, sondern bedeuten auch einen Gewinn für die unterschiedlichen Nutzungen. So erhalten z.B. der Werkstattbereich mit Anlieferung im Norden und die Hauptzufahrt im Süden eine Überdachung.

Neben Prüfräumen und Werkstätten sind im Erdgeschoss unterschiedlich große, teilbare und somit flexibel nutzbare Schulungs- und Besprechungsräume vorgesehen. Das erste und zweite Obergeschoss sind im Wesentlichen Labor- und Werkstattträumen vorbehalten, während das dritte und vierte Obergeschoss Büroarbeitsplätze beherbergen werden.

#### Den Baustoff in Szene gesetzt

Das Foyer, mit seiner lichten offenen Atmosphäre, wird überwiegend in Sichtbeton gestaltet. Horizontal verlaufende Fassa-



**Bild 1.1.6-2** Nach über 60 Jahren an der Tannenstraße wird der VDZ ab Ende 2019 unter folgender Adresse zu erreichen sein: Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf. Das neue Gebäude liegt verkehrsgünstig am S-Bahnhof Derendorf und in unmittelbarer Nähe zur Hochschule Düsseldorf (HSD).

denbänder, bestehend aus Betonfertigteilen, werden die äußere Erscheinung bestimmen und spiegeln die Zukunftsfähigkeit und Modernität des Werkstoffs Beton wider. Im Wechsel dazu stehen großformatige Fensterbänder, die den Baukörper innerhalb der Geschosse gliedern und den Gegenpart zur bewusst inszenierten Massivität des Sichtbetons darstellen.

#### Wissenschaftszentrum

Mit zwei neuen Hochschulen in unmittelbarer Nachbarschaft zum neuen Standort zeichnet sich die Entwicklung eines Wissenschaftszentrums ab. Gemeinsam mit den ingenieurwissenschaftlichen Fachbereichen und Instituten der Hochschulen sollen neue Impulse für gemeinsame Forschungsaktivitäten gesetzt und die Vernetzung mit der Hochschulforschung verstärkt werden.



**Bild 1.1.6-1** VDZ-Neubau Ansicht von Süden, Rendering: pbr Düsseldorf

### 1.1.7 Statistik, Compliance und Datenschutz

Zur Erfüllung seiner vielfältigen Aufgaben in der Forschung sowie zur Information seiner Mitglieder erhebt und analysiert der VDZ sowohl markt- als auch umweltbezogene Daten. Hierzu gehören u.a. der inländische Zementversand, der Roh- und Brennstoffeinsatz, der elektrische Energieeinsatz sowie Staub- und NO<sub>x</sub>-Emissionen.

Bei der Veröffentlichung der Daten auf der Website oder in Publikationen des VDZ werden die Anforderungen an ein nicht-identifizierendes Informationsverfahren erfüllt. Es ist somit nicht möglich, von den jeweiligen Daten auf ein einzelnes Unternehmen oder Zementwerk zu schließen. Der VDZ hat zudem

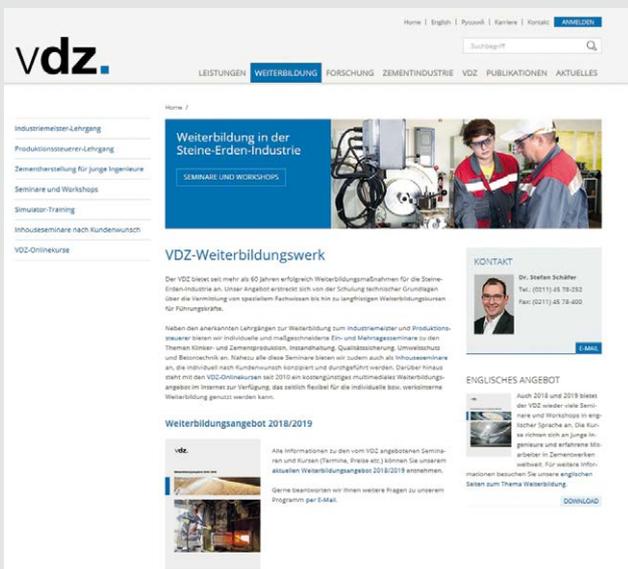
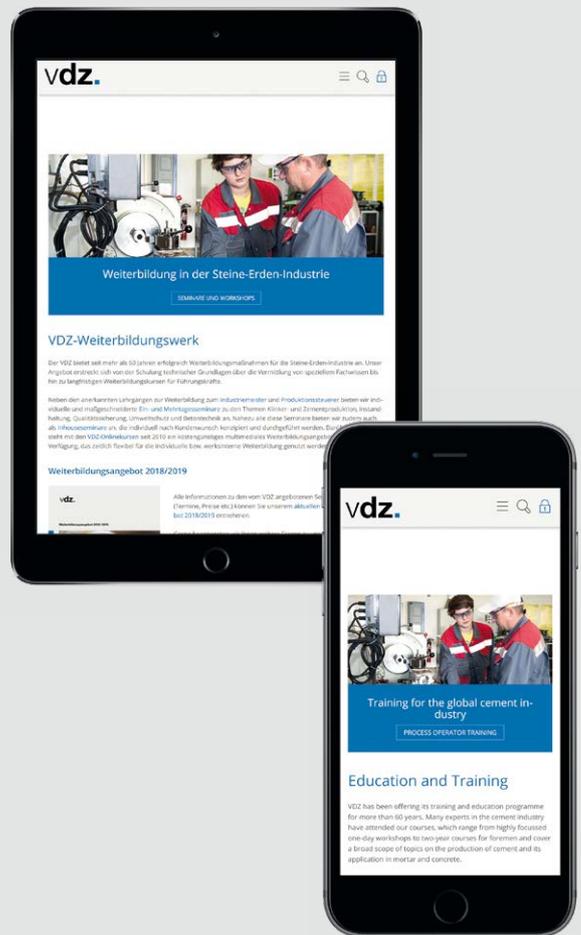
weitere Anforderungen einfließen lassen, u.a. werden Daten zum Zementinlandsversand erst mit einem zeitlichen Nachlauf von sechs Monaten veröffentlicht. Ferner überwacht ein Compliance-Bbeauftragter im VDZ diese und weitere Prozesse und spricht ggf. Empfehlungen zur Anpassung aus. Insofern ist in vielfältiger Weise sichergestellt, dass der VDZ die wettbewerbsrechtlichen Anforderungen an Marktinformationssysteme und an die entsprechenden Verbandsstatistiken erfüllt.

Neben der Arbeit mit Branchendaten nimmt auch der Umgang mit personenbezogenen Daten eine immer bedeutendere Rolle ein. Der Schutz dieser Informationen bzw. der dahinter stehenden Mitarbeiter und Geschäftspartner nimmt in der täglichen Arbeit des VDZ einen hohen Stellenwert ein. Dabei dient nicht zuletzt die im Mai 2018 in Kraft getretene EU-Datenschutz-Grundverordnung als wichtige Orientierung.

16

#### VDZ startet neue Webseite

Im Berichtszeitraum ist der VDZ mit einem runderneuerten Internetauftritt an den Start gegangen. Nach dem Relaunch präsentiert sich die VDZ-Webseite [www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de) in einem neuen, modernen Erscheinungsbild, mehrsprachig und mit vielen erweiterten Angeboten und Funktionalitäten für Mitglieder, Partner und Kunden des VDZ. Ziel ist es, die umfangreichen Informationen, Zahlen und Daten zur Branche noch besser zugänglich zu machen. Neben umwelt- und wirtschaftspolitischen Standpunkten der deutschen Zementindustrie werden in moderner und übersichtlicher Form die vielfältigen Dienstleistungen, Weiterbildungsangebote und Forschungsprojekte des VDZ präsentiert. Als international agierende technisch-wissenschaftliche Organisation für die Zement- und Baustoffindustrie bietet der VDZ alle Dienstleistungen rund um Zement, Beton und Umweltschutz an – von der Prüfung über die Beratung bis zum komplexen Gutachten. Die neue Webseite informiert optisch klarer über das breite Leistungsspektrum in den Bereichen Umwelt und Betriebstechnik, Chemie und Mineralogie, Betontechnik, Zertifizierung, Umweltmessung und Weiterbildung.



**Bild 1.1.6-2** Neuer VDZ-Webauftritt mit umfangreichem internationalem Dienstleistungs- und Weiterbildungsangebot

Seit mehr als 60 Jahren bietet der VDZ erfolgreich Weiterbildungsmaßnahmen für die Steine-Erden-Industrie an, von der Schulung technischer Grundlagen über die Vermittlung von speziellem Fachwissen bis hin zu Weiterbildungskursen für Führungskräfte. Die erhöhte internationale Nachfrage nach Dienstleistungen und Weiterbildungsseminaren hat dazu beigetragen, dass der VDZ-Webauftritt heute in einer deutschen, englischen und russischen Sprachversion abrufbar ist. Beim Design wurde besonderer Wert auf die mobile Darstellung via Smartphone und Tablet-PCs gelegt (Responsive Design).

## 1.2 Zementindustrie in Deutschland und Europa

### 1.2.1 Zementmarkt in Deutschland ■

Während der Zementmarkt in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2015 vergleichsweise stabil war – im Schnitt lag der Verbrauch bei 26,6 Mio. Tonnen pro Jahr – deutet sich seit 2016 ein moderater Aufwärtstrend an (**Bild 1.2.1-1**).

Wichtigste Abnehmer der deutschen Zementindustrie sind die inländischen Transportbetonhersteller. Durchschnittlich 56 % des inländischen Zementversandes entfielen in den letzten zehn Jahren auf diesen Industriezweig. Im gleichen Zeitraum wurden im Schnitt 23 % an Hersteller von Beton-Bauteilen geliefert. Die restliche Menge wurde in Form von sonstigem Silozement (ca. 14 %) sowie Sackzement (ca. 7 %) versandt. Im Zeitablauf kam es nur zu geringfügigen Verschiebungen der Versandanteile zwischen den Herstellergruppen bzw. Lieferformen. Lediglich der Einsatz von Sackzement hat in den vergangenen Jahren an Bedeutung verloren.

Differenziert man nach Zementarten, zeichnet sich beim inländischen Zementversand bereits seit dem Ende der 1990er Jahre ein deutlicher Trend ab. Demnach setzt die deutsche Zementindustrie verstärkt auf den Einsatz von Portlandkompositzementen (CEM II) sowie Hochofenzementen (CEM III), um so den Klinkeranteil und infolgedessen die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verringern. Demgegenüber steht eine deutliche Reduzierung des Versandes von Portlandzementen (CEM I), deren Anteil am inländischen Zementversand sich von über 60 % Ende der 1990er Jahre auf ca. 28 % in 2017 mehr als halbiert hat.

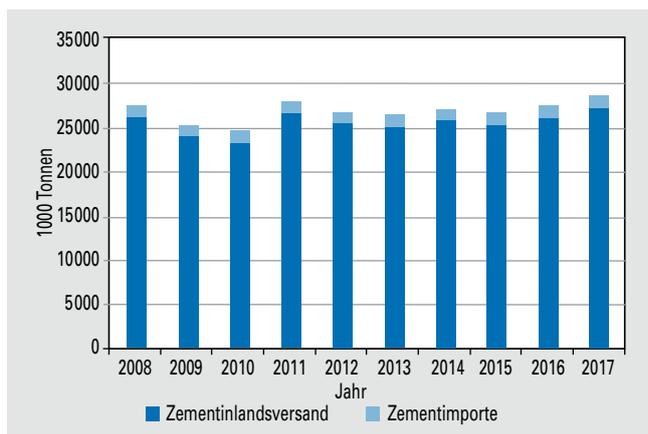
Im Zeitraum von 2008 bis 2017 hat die deutsche Zementindustrie im Schnitt pro Jahr 6,5 Mio. t Zement exportiert. Damit liegt die durchschnittliche Exportquote der letzten zehn Jahre bei etwa 20 % des gesamten deutschen Zementversandes. Zu den wichtigsten Handelspartnern gehören die Niederlande, Frankreich und Belgien. Die Zementimporte im Zeitraum von 2008 bis 2017 beliefen sich auf durchschnittlich 1,3 Mio. t/a. Gemessen am Zementverbrauch in Deutschland ergibt sich daraus eine Importquote von im Schnitt 5 %.

Innerhalb der Europäischen Union stellt Deutschland den derzeit größten Markt für Zement dar. Im Zeitraum von 2008 bis 2017 entfielen durchschnittlich etwa 16 % des gesamten Zementverbrauchs der EU auf die größte europäische Volkswirtschaft. Im globalen Maßstab beträgt der Anteil etwa 0,7 %. Der mit Abstand größte Zementmarkt der Welt ist die Volksrepublik China mit einem Zementverbrauch von 2,3 Mrd. t – dies entspricht ca. 57 % des weltweit verbrauchten Zements.

Gemessen am Zementverbrauch pro Kopf lag Deutschland sowohl im europäischen als auch im globalen Vergleich zuletzt im Mittelfeld. Im Jahr 2016 kamen auf einen Einwohner hierzulande im Schnitt ca. 334 kg Zement. Europäischer Spitzenreiter war mit rund 1 100 kg Zement pro Einwohner im Jahr 2016 Luxemburg. An der Weltspitze liegt das Emirat Qatar. Dort kamen 2016 auf jeden der rund 2,6 Mio. Einwohner ca. 3 000 kg Zement (**Bild 1.2.1-2**).

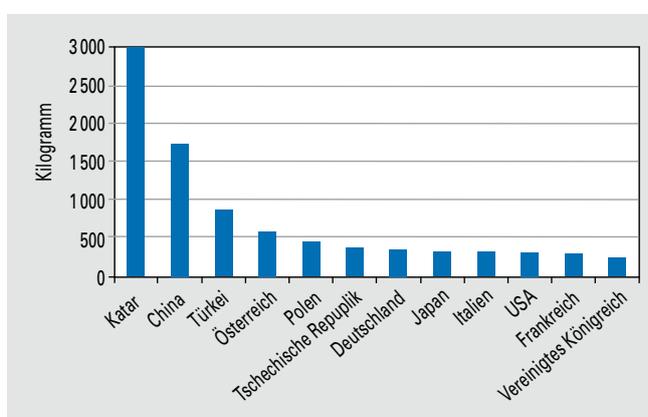
#### Zementnachfrage und Bauwirtschaft

Die Bauwirtschaft, die neben dem Bauhaupt- und Ausbaugewerbe auch vor- und nachgelagerte Wirtschaftszweige wie z.B. die Baustoffindustrie umfasst, ist für die deutsche Volkswirtschaft von



**Bild 1.2.1-1** Inländischer Zementverbrauch

Quelle: VDZ



**Bild 1.2.1-2** Pro-Kopf-Zementverbrauch ausgewählter Länder in 2016

Quelle: Cemnet

erheblicher Bedeutung. Insgesamt waren in diesen Bereichen im Jahr 2017 ca. 3 Mio. Menschen beschäftigt, die damit einen beträchtlichen Teil zur Wirtschaftsleistung Deutschlands beisteuern.

In den letzten zehn Jahren hat die Verwendung von Beton – und damit auch von Zement – in Deutschland stetig an Bedeutung gewonnen. Laut Statistischem Bundesamt sind beispielsweise die im Jahr 2017 fertiggestellten Projekte im Mehrfamilienhausbau zu 26 % aus Beton gefertigt. Damit hat sich der Anteil von Beton als überwiegend verwendeter Baustoff in diesem Segment seit 2000 fast verdreifacht. Bei den Baufertigstellungen im Nichtwohnbau liegt dieser Anteil mit 57 % (2000: 42 %) noch deutlich höher.

Für die deutsche Zementindustrie ist der Hochbau das dominierende Marktsegment. 2017 wurden etwa 19,1 Mio. t Zement in diesem Bereich eingesetzt, was einem Anteil von 66 % am gesamten deutschen Zementverbrauch entspricht. 9,7 Mio. t bzw. 34 % des Zementverbrauches gingen in den Tiefbau (**Bild 1.2.1-3**).

#### Wohnungsbau

Für die mittelfristigen Markterwartungen geht der VDZ von einer die Konjunktur belebenden Bauwirtschaft aus. Insbesondere aus dem Wohnungsbau dürften weiterhin positive Impulse für den deutschen Zementmarkt zu erwarten sein, wenngleich diese etwas an Dynamik verlieren könnten. So lässt sich angesichts der hohen Auslastung des Bauhauptgewerbes, wachsender Bauüberhänge (genehmigte, aber nicht fertiggestellte Projekte) sowie zuletzt stagnierender Neubaugenehmigungen vermuten, dass die Fertigstel-

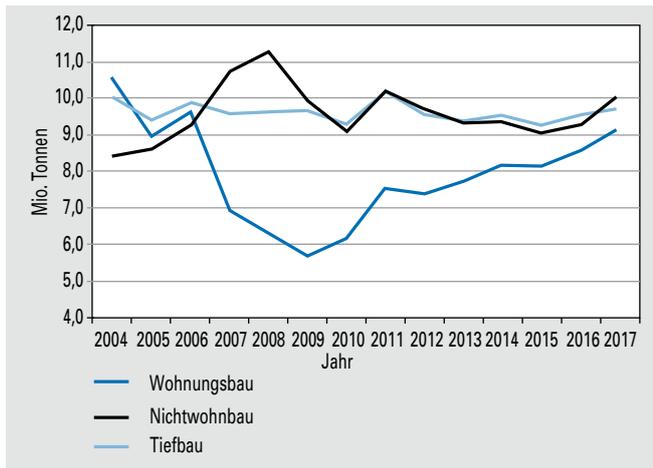


Bild 1.2.1-3 Zementverbrauch nach Baubereichen Quelle: VDZ

lungszahl neu gebauter Wohnungen langsamer wächst als zuletzt und sich auf einem Niveau von etwa 350 000 Wohneinheiten pro Jahr stabilisieren könnte.

Gleichwohl ist die Nachfrage nach Wohnraum insbesondere in den Städten nach wie vor hoch. Union und SPD haben sich daher in ihrem Koalitionsvertrag im März 2018 darauf verständigt, bis 2021 1,5 Mio. Wohnungen neu zu bauen. Zudem will die neue Bundesregierung mehr Bauland für den bezahlbaren Wohnungsbau erschließen und bereitstellen. Auch die Eigentumbildung soll durch die Einführung eines einkommensabhängigen Baukindergelds wieder gefördert werden. Ob der angestrebte Maßnahmenmix genügt, um effektiv die Nachfrage insbesondere nach mehr bezahlbarem Wohnraum zu bedienen, bleibt abzuwarten.

### Tiefbau und Verkehrsinfrastruktur

Der öffentliche Tiefbau dürfte weiterhin gestärkt aus den anhaltenden Investitionshochlauf des Bundes hervorgehen. Die Bundesregierung hat in den vergangenen Jahren die finanziellen Mittel für die Bundesverkehrswege (Straße, Schiene, Wasserstraße) sukzessive auf ca. 14 Mrd. Euro p.a. erhöht und will diese laut Koalitionsvertrag auf hohem Niveau verstetigen. Um die Vorhaben im neuen Bundesverkehrswegeplan mit einem Gesamtvolumen von ca. 270 Mrd. Euro bis 2030 zu realisieren oder zumindest zu beginnen, müsste die Bundesregierung jährlich etwa 18 Mrd. Euro für Straßen, Schienen und Wasserstraßen bereitstellen. Offen ist nach wie vor die Frage, ob und wie stark diese Maßnahmen den Zementverbrauch in Deutschland beleben werden.

Zur teilweisen Entkopplung der Infrastrukturfinanzierung vom Bundeshaushalt hat die Bundesregierung in den vergangenen Jahren die Nutzerfinanzierung der Bundesfernstraßen weiter verstärkt. So wurde die Lkw-Maut in mehreren Stufen auf ein größeres Streckennetz wie auch auf weitere Fahrzeugklassen ausgeweitet. Für das Jahr 2018 sind laut der Verkehrsinfrastrukturfinanzierungsgesellschaft (VIFG) Mauteinnahmen in Höhe von 5,6 Mrd. Euro veranschlagt, die nach Abzug der Systemkosten direkt für die Bundesstraßen verausgabt werden sollen. Ferner hat der Bundestag im März 2017 eine Infrastrukturabgabe für Pkw beschlossen, deren Umsetzung jedoch noch nicht erfolgt ist. Die meisten Experten versprechen sich durch die Einführung dieser Abgabe keine nennenswerten Einnahmen für den Bundeshaushalt.

Parallel wurde in den letzten Jahren auch vermehrt diskutiert, wie man insbesondere finanzschwache Kommunen bei der Finanzierung von Infrastrukturvorhaben unterstützen kann. Die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) kommt in ihrem Kommunalpanel 2017 zu der Erkenntnis, dass sich auf Gemeinde- und Landkreisebene ein Nachhol- und Ersatzbedarf in den Bereichen Straßen und Verkehrsinfrastruktur in Höhe von 34,4 Mrd. Euro angestaut hat. Auch im Bereich von Schulen und Erwachsenenbildung besteht eine Lücke von mittlerweile 32,8 Mrd. Euro. CDU, CSU und SPD haben in ihrem Koalitionsvertrag verschiedene Lösungsansätze formuliert, u. a. soll das Kooperationsverbot zwischen Bund und Ländern gelockert werden, um z. B. Investitionen in die Bildungsinfrastruktur seitens des Bundes zu stärken. Darüber hinaus sollen bestehende kommunale Förderprogramme u. a. für städtebauliche Maßnahmen auf bisherigem Niveau von 2 Mrd. Euro p.a. fortgeführt werden.

### Nichtwohnbau

Die Entwicklung im Nichtwohnbau hat bezogen auf den Zementverbrauch in den letzten Jahren stagniert. Somit hat der Baubereich relativ an Bedeutung verloren (33,8 % im Jahr 2016, 2008 lag der Anteil bei 41,4 %). Dies ist insofern verwunderlich, als die Entwicklung des Segments an die konjunkturelle Situation des Landes gekoppelt ist, die sich in den letzten Jahren als positiv und sehr robust erwiesen hat. Zudem haben Experten vor dem Hintergrund der niedrigen Finanzierungskosten für Bauvorhaben, der hohen Kapazitätsauslastung und des rekordverdächtigen ifo-Geschäftsklimas im Verarbeitenden Gewerbe über die letzten Jahre hinweg einen signifikanten Zuwachs der gewerblichen Neubauinvestitionen prognostiziert, der bisher ausblieb. Für die kommenden Jahre dürften die Rahmenbedingungen für den Nichtwohnbau weiter positiv bleiben. Zwar deutet sich eine leichte Verschlechterung der Zinssituation aus Bauherrensicht an, da die Europäische Zentralbank (EZB) langsam dem Beispiel der US-Notenbank folgen könnte, die Geldpolitik weniger expansiv auszugestalten. Gleichwohl sind die Erwartungen an die gesamtwirtschaftliche Entwicklung Deutschlands weiterhin sehr positiv – so erwartet die Bundesregierung für 2018 ein reales Wachstum des Bruttoinlandsprodukts von 2,3 %.

Deutschland erlebt in den letzten Jahren eine steigende Nachfrage nach Bauleistungen, die von verschiedenen Faktoren getragen wird, z. B. einem hohen Wohnraumbedarf in Ballungszentren, Nachholbedarfen bei der Verkehrs- und öffentlichen Infrastruktur sowie einer höheren Mittelausstattung der öffentlichen Hand. Mit der steigenden Bautätigkeit einher geht zwangsläufig auch eine zunehmende Kapazitätsauslastung sowohl im Baugewerbe als auch von Planern und Genehmigungsbehörden. So liegen die Auftragsbestände im Hoch- und Tiefbau sowie bei freischaffenden Architekten laut ifo-Institut deutlich über dem langjährigen Durchschnitt. Einem schnellen Ausbau der Kapazitäten stehen neben der Unsicherheit, wie lange der Bauboom anhalten mag, insbesondere der Fachkräftemangel entgegen. Als Gegenmaßnahme sieht der Koalitionsvertrag von Union und SPD u. a. ein Bau- und Planungsbeschleunigungsgesetz vor. Ferner soll bis 2021 eine Infrastrukturgesellschaft errichtet werden, die Finanzierungs- und Ausführungsverantwortlichkeiten beim Bundesstraßenbau auf einer Ebene zusammenführt und somit ggf. eine schnellere Abwicklung von Projekten ermöglichen soll.

### Ausblick

Weitestgehend unabhängig von der Frage der Kapazitäten ergibt sich für den deutschen Zementmarkt mittelfristig ein überwiegend positives Bild. Die Bautätigkeit dürfte sich in den kommenden

**Tabelle 1.2.1-1** Zahlen und Daten

Die deutsche Zementindustrie	2014	2015	2016	2017
Anzahl der Unternehmen	23	23	23	23
Anzahl der Zementwerke	53	53	53	53
Anzahl der Beschäftigten (jeweils zum 30. September) <sup>1)</sup>	7933	7810	7901	8037
Umsatz (ohne Mehrwertsteuer) in Mio. Euro <sup>1)</sup>	2506	2488	2537	2729
<b>Zementversand in 1 000 t</b>				
Gesamtversand <sup>2)</sup>	31 598	31 596	32 271	33 455
Inlandsversand <sup>3)</sup>	25 850	25 334	26 178	27 265
Zementexporte <sup>2)</sup>	5 748	6 262	6 093	6 190
Klinkerexporte <sup>2)</sup>	420	366	439	437
Zementimporte <sup>2)</sup>	1 325	1 308	1 320	1 551
Klinkerimporte <sup>2)</sup>	45	44	75	96
Inländischer Zementverbrauch <sup>2)</sup>	27 175	26 642	27 505	28 816
Zementverbrauch pro Kopf in kg <sup>2)</sup>	334,7	326,1	332,6	349,0
Klinkerproduktion	23 871	23 355	23 423	24 802
Zementproduktion	32 099	31 160	32 674	33 991
<b>Inlandsversand nach Zementarten in %<sup>4)</sup></b>				
CEM I: Portlandzement	29,8	30,4	28,6	27,6
CEM II/S, CEM II/P, CEM II/V: Portlandhütten-, Portlandpuzzolan- und Portlandflugaschezement	17,7	18,0	19,1	18,9
CEM II/T, CEM II/LL: Portlandschiefer-, Portlandkalkstein- und Portlandkompositzement	29,1	27,7	27,7	27,7
CEM III: Hochofenzement	22,4	22,7	23,9	25,4
CEM IV, CEM V: Puzzolanzement, Kompositzement	< 0,1	0,1	0,1	< 0,1
Sonstige Bindemittel	1,0	1,1	0,5	0,4
Inlandsversand	100,0	100,0	100,0	100,0
<b>Inlandsversand nach Lieferformen in %<sup>4)</sup></b>				
Transportbetonhersteller	55,2	58,3	56,8	61,6
Beton-Bauteilhersteller	24,4	24,4	22,5	21,6
Sonstiger Silozement	13,5	10,4	14,2	10,5
Sackzement	6,9	6,9	6,5	6,3
<b>Ofenkapazitäten</b>				
Anzahl der Öfen (jeweils zum 1. Januar)	53	53	53	53
Kapazität in Tonnen pro Tag	107 160	107 160	107 460	107 460
<b>Brennstoffverbrauch in Mio. GJ/a</b>				
Fossile Brennstoffe	33,9	31,7	32,1	33,9
Alternative Brennstoffe	58,6	57,8	59,1	63,0
Thermischer Energieeinsatz gesamt	92,5	89,5	91,2	96,8
<b>Elektrischer Energieeinsatz gesamt in Mio. MWh/a</b>				
	3,57	3,50	3,62	3,77

<sup>1)</sup> Daten für Betriebe von Unternehmen mit 20 und mehr Beschäftigten

<sup>2)</sup> Daten für 2017 vorläufig

<sup>3)</sup> zum Teil geschätzt

<sup>4)</sup> Daten beziehen sich auf die Mitglieder des VDZ

**Tabelle 1.2.2-1** Rohstoffeinsatz in der deutschen Zementindustrie

Rohstoffeinsatz in 1000 t		2015	2016	2017
Gruppe	Rohstoff			
Ca	Kalkstein, Mergel, Kreide	36 858	37 194	39 391
	Sonstige <sup>1)</sup>	81	70	81
Si	Sand	1 096	1 122	1 174
	Gießereialtsand	178	160	182
Si-Al	Ton	1 150	1 305	1 184
	Betonit, Kaolinit	26	22	16
Fe	Eisenerz	115	128	149
	Sonstige Einsatzstoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie <sup>2)</sup>	95	92	93
Si-Al-Ca	Hüttensand	6 821	7 244	7 896
	Flugasche	341	283	243
	Ölschiefer	113	136	123
	Trass	32	32	38
	Sonstige <sup>3)</sup>	58	49	23
S	Natürlicher Gips	734	714	781
	Natürlicher Anhydrit	533	628	667
	Gips aus der Rauchgasentschwefelung	301	325	290
Al	Einsatzstoffe aus der Metallindustrie <sup>4)</sup>	28	44	37

<sup>1)</sup> Kalkschlämme aus der Trink- und Abwasseraufbereitung, Kalkhydrat, Porenbetongranulat, Calciumfluorid

<sup>2)</sup> Kiesabbrand, verunreinigtes Erz, Eisenoxid/Flugasche-Gemisch, Stahlwerksstäube, Walzzunder

<sup>3)</sup> Papierreststoffe, Aschen aus Verbrennungsprozessen, Mineralische Reststoffe (z.B. ölverunreinigte Böden)

<sup>4)</sup> Aufbereitungsrückstände von Salzschlacken, Aluminiumhydroxid

Quelle: VDZ

Jahren weiter auf hohem Niveau bewegen, gleichwohl ist eine weitere deutliche Ausweitung aufgrund bestehender Kapazitätsgrenzen unwahrscheinlich. Zwar wird sich die Dynamik im Wohnungsbau voraussichtlich abschwächen, der öffentliche Tiefbau hingegen könnte dies als neuer Wachstumstreiber der Zementnachfrage kompensieren. Wie stark die Impulse aus dem Nichtwohnbau sein werden, bleibt abzuwarten. Dies ist auch abhängig von konjunkturellen und außenpolitischen Unsicherheiten. Die vorliegenden Daten deuten aber eine steigende Nachfrage nach Bürogebäuden und Bildungseinrichtungen an.

## 1.2.2 Rohstoffeinsatz und -politik ■

Heimische Rohstoffe sind die Grundlage für die Herstellung von Zement und stellen einen unverzichtbaren Bestandteil industrieller Wertschöpfungsketten am Standort Deutschland dar. Zu den wichtigsten Grundstoffen von Zement gehören Kalkstein, Ton oder deren natürlich vorkommendes Gemisch, der Kalkmergel. Geologisch gesehen stammen rund 90 % der geförderten Kalksteine aus dem Mesozoikum und sind damit 65 bis 250 Mio. Jahre alt.

### Rohstoffeinsatz

Im Jahr 2017 hat die deutsche Zementindustrie zur Herstellung von ca. 34,0 Mio. t Zement rund 52,4 Mio. t Rohstoffe eingesetzt (**Tabelle 1.2.2-1**). Davon entfielen allein 8,8 Mio. t auf alternative Rohstoffe, die somit rund 17 % des Gesamtrohstoffbedarfs deckten. So werden für die Zementklinkerproduktion u.a. Klärschlämme aus der Trinkwasseraufbereitung, Gießereialtsande aus der Metallverarbeitung sowie Flugaschen aus Kohlekraftwerken im Brennprozess als Rohmaterial eingesetzt. Bei der Zementmahlung wird zudem in großem Umfang Hüttensand verwendet, der als Nebenprodukt bei der Roheisenerzeugung entsteht. Durch den Einsatz dieser alternativen Rohstoffe werden jährlich mehr als 11 Mio. t Kalkstein eingespart. Angesichts des Gesamtbedarfs an

Rohstoffen für die Zementherstellung wird die Industrie jedoch auch langfristig auf die sichere Versorgung mit Primärrohstoffen angewiesen sein.

### Brennstoffeinsatz

Zur Herstellung von Zement werden neben Primär- und alternativen Rohstoffen größere Mengen an Brennstoffen benötigt, vor allem zur Herstellung des Zementklinkers, aber auch zur Trocknung von Rohmaterialien. Fossile Brennstoffe spielen dabei heute nur noch eine untergeordnete Rolle. Der thermische Energiebedarf wird überwiegend durch alternative Brennstoffe gedeckt (65,0 % in 2017). Hierzu zählen z.B. Altreifen, Altöle, Gewerbe- und Siedlungsabfälle oder Altholz (siehe **Tabelle 1.3.2-2**).

Im Fall der Zementherstellung werden die eingesetzten alternativen Abfallbrennstoffe nicht nur energetisch, sondern auch stofflich verwertet. Der organische Anteil ersetzt so die fossilen Energieträger, während die anorganischen Bestandteile (Aschen) unmittelbarer Teil des Produkts werden (so genanntes Co-Processing). Insofern trägt der Einsatz alternativer Brennstoffe den Zielen einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft und des Klimaschutzes in hohem Maße Rechnung. Aufgrund verschiedener abfallrechtlicher Änderungen in 2017 (u.a. Kreislaufwirtschaftsgesetz, Gewerbeabfallverordnung) ist nicht auszuschließen, dass in Zukunft der Einsatz alternativer Brennstoffe mit einem höheren Nachweisaufwand im Hinblick auf die Hochwertigkeit der Verwertung einhergehen wird.

### Flächeninanspruchnahme und Biodiversität

Die deutsche Zementindustrie fördert den Großteil ihres Primärrohstoffbedarfs selbst und ist daher auf eine langfristige Sicherung wertvoller Lagerstätten angewiesen. Die Mehrzahl der hiesigen Werke ist nicht zuletzt aus ökologischen und ökonomischen Gründen direkt bei den entsprechenden Abbaustätten von Kalkstein oder Mergel angesiedelt, sodass der wichtigste Rohstoff direkt vor Ort

### Studie zu Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie

Im November 2015 haben die Sozialpartner der deutschen Zementindustrie im Rahmen ihrer Nachhaltigkeitsinitiative dem Bundesumweltministerium in Berlin eine Studie zur Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität entlang der Wertschöpfungskette von Zement übergeben (**Bild 1.2.2-1**). Auf etwa 50 Seiten haben Wissenschaftler des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie dabei untersucht, in welcher Weise die Zementindustrie einschließlich der nachgelagerten Betonindustrie bereits heute zur Ressourcenschonung beiträgt und welche Perspektiven sich für eine weitere Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie eine nachhaltige Versorgung der Branche mit Primär- und alternativen Rohstoffen aus heutiger Sicht bieten.

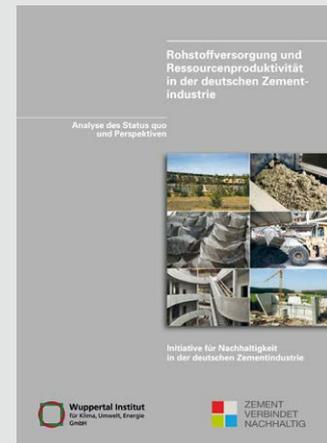
Entscheidend für die Steigerung der Ressourcenproduktivität sind technologisch-organisatorische Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton. Die Produktion von Zement erfolgt in Prozessen und Anlagen, die bereits einen langen Optimierungsprozess durchlaufen haben. Auch wenn sich ein Großteil der Anlagen zur Herstellung von Zement und Zementklinker bereits seit vielen Jahren in Betrieb befindet und größere, teils modernere Anlagen grundsätzlich verfügbar sind, ist das Effizienzpotenzial bei bestehenden Technologien relativ gering und kann kaum wirtschaftlich erschlossen werden. Ähnliches gilt auch für die Möglichkeit, die schon bisher eingesetzten alternativen Rohstoffe noch stärker zu nutzen. Im Gegenteil ist unter der Annahme einer gleich bleibenden Zementproduktion fraglich, ob alternative Rohstoffe wie Flugaschen, Hüttensand oder Gießereialsande angesichts des

laufenden Strukturwandels im Energiesektor und in der industriellen Produktion im bisherigen Umfang bereitstehen werden. Dies bedeutet nicht zuletzt, dass die Zementindustrie auch langfristig auf die sichere Versorgung mit Primärrohstoffen angewiesen sein wird.

Weiteres Potenzial wird bei der Entwicklung alternativer Zemente und Bindemittel gesehen, die sich derzeit noch im Ent-

wicklungsstadium befinden. Wichtig für deren Weiterentwicklung ist insbesondere auch eine dauerhaft zuverlässige Rohstoffbasis. Ferner sehen die Autoren auch bei den Betonausgangsstoffen Möglichkeiten zur weiteren Ressourcenschonung. So ist perspektivisch damit zu rechnen, dass künftig größere Mengen mineralischer Bauabfälle für die Erzeugung von rezyklierten Gesteinskörnungen zur Verfügung stehen werden. Für deren hochwertige Erzeugung muss jedoch noch weitere Entwicklungs- und Forschungsarbeit geleistet werden. Weitere Potenziale zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität bestehen in der industriellen Vorfertigung von Betonbauteilen sowie perspektivisch in der Nutzung von ultrahochfesten Betonen. Im Idealfall kann beides verknüpft werden.

Weitere Informationen unter <https://vdz.info/owoo3>



**Bild 1.2.2-1** Die Sozialpartner der Zementindustrie bei der Übergabe der Rohstoffstudie an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

zu Klinker und Zement verarbeitet werden kann. Alle im Betrieb befindlichen und genehmigten Abbaustätten der Zementindustrie erstrecken sich auf eine Fläche von ca. 5 600 ha. Gemessen an der gesamten Abgrabungsfläche zur Gewinnung oberflächennaher Rohstoffe in Deutschland entspricht dies einem Anteil von ca. 3 bis 4 %.

Die Flächen für die oberflächennahe Rohstoffgewinnung werden im Gegensatz zu anderen Nutzungsarten wie Verkehrs- und Siedlungsflächen nur zeitlich befristet genutzt. Über Rekultivierungs- und Renaturierungsmaßnahmen werden die Folgen des Eingriffs bereits während der Gewinnungstätigkeit sowie nach der Stilllegung wieder weitgehend kompensiert oder ausgeglichen. Aus der Perspektive der Artenvielfalt sind die Kalksteinbrüche der Zementindustrie von großer Bedeutung. Die hohe Biodiversität sowohl in aktiven als auch in aufgelassenen Abbaustätten ergibt sich aus der Vielzahl von Biotoptypen auf diesen Flächen, die in der deutschen Kulturlandschaft so nur noch selten zu finden sind. Meist handelt es sich dabei um Flächen mit extremen Standortbedingungen, die Primärlebensräume für sehr spezialisierte Arten und Lebensgemeinschaften darstellen. Steilwände in Steinbrüchen bilden z. B. häufig geeignete Biotope für Felsenbrüter.

Mit einer Biodiversitätsdatenbank soll künftig der Beitrag der Steine-und-Erden-Industrie auf die biologische Vielfalt in Deutschland erfasst, dokumentiert und ausgewertet werden. Der VDZ beteiligt sich mit sechs weiteren Baustoffverbänden an der Finanzierung und am Aufbau der Datenbank.

### 1.2.3 Energieeinsatz und -politik ■

Die deutsche Zementindustrie ist als energieintensive Branche in besonderem Maße auf wettbewerbsfähige und stabile energiepolitische Rahmenbedingungen angewiesen. Die Herstellung von Zement zählt mit einem Energiekostenanteil an der Bruttowertschöpfung von mehr als 50 % zu den besonders brennstoff- und stromintensiven Produktionsverfahren des Verarbeitenden Gewerbes. Neben der Wettbewerbsfähigkeit der Energieversorgung kommt aber auch der Versorgungssicherheit eine große Bedeutung zu.

Der Brennstoffenergieeinsatz der 53 deutschen Zementwerke belief sich im Jahr 2017 auf 96,8 Mio. GJ. Etwa 65,0 % des thermischen Energiebedarfs wurden durch alternative Brennstoffe gedeckt. Im gleichen Zeitraum setzten die deutschen Werke rund 3,77 TWh Strom ein (**Bild 1.2.3-1**). Pro Tonne Zement entspricht das einem elektrischen Energieeinsatz von 110,0 kWh. Die jährlichen branchenweiten Stromkosten belaufen sich auf etwa 250 Mio. Euro bzw. etwa 25 % der Bruttowertschöpfung.

Der Produktionsfaktor Energie ist damit einer der größten Kostentreiber für die Branche. Die Zementunternehmen haben deshalb seit jeher ein hohes Eigeninteresse an der Steigerung der Energieeffizienz. So wurden bereits in der Vergangenheit Potenziale zur Minderung der Energieintensität sukzessive umgesetzt und damit nicht zuletzt CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich gesenkt. Im Verlaufe der letzten Jahre treten derweil immer deutlichere Zielkonflikte zwischen politisch gewünschter Energieeffizienz und Anforderungen der Umweltpolitik auf (z. B. umweltrechtliche Vorgaben, flexible Stromabnahme), die sich ihrerseits technisch nicht ohne höheren Stromverbrauch erfüllen lassen.

Aktuelle energie- und klimapolitische Entwicklungen sind für die Branche vor diesem Hintergrund von großer Bedeutung.

Insbesondere die von der Energiewende direkt und indirekt verursachten Kosten werden absehbar weiter steigen und sich u. a. über EEG-Umlage und Netzentgelte in den Verbraucherstrompreisen niederschlagen. Abzusehen ist dabei bereits heute, dass die Besondere Ausgleichsregelung des EEG künftig noch weiter an Bedeutung gewinnen wird, da sie sich auch in anderen Regelungsbereichen als Voraussetzung für Entlastungen etabliert. Für die neue Legislaturperiode bis 2021 sieht der Koalitionsvertrag eine grundlegende Reform der Netzentgelte vor. Hintergrund ist die politisch gewünschte Flexibilisierung der Stromnachfrage u. a. in der Industrie, um durch eine möglichst effiziente Nutzung der bestehenden Stromnetze den weiteren Ausbaubedarf zu minimieren. Aufgabe der Politik wird es jedoch auch sein, gerade in diesem Bereich stets die Wettbewerbsfähigkeit der energieintensiven Industrie in Deutschland im Blick zu behalten.

Im Bereich der Energie- und Stromsteuern wird neben der Entlastung für mineralogische Prozesse künftig auch weiterhin der Ökosteuern-Spitzenausgleich eine sehr wichtige Rolle für die Zementindustrie spielen. Bislang ist diese steuerliche Entlastung an die Einführung zertifizierter Energiemanagementsysteme in den Unternehmen und an eine kollektive Effizienzverbesserung der deutschen Wirtschaft gekoppelt. Die 2012 festgelegten jährlichen Ziele konnten dabei bislang stets erfüllt werden.

### 1.2.4 Klimaschutz und -politik ■

Im Dezember 2015 wurde mit dem UN-Klimaschutzabkommen von Paris der Weg zur weltweiten Bekämpfung des Klimawandels bis 2050 bereitet. Deutschland hat hierauf bereits im November 2016 reagiert und mit dem Klimaschutzplan 2050 als eines der ersten Länder die von Paris geforderte Langfriststrategie vorgelegt. Darin werden die bisherigen Klimaziele bestätigt und teilweise präzisiert. Bis 2050 soll demnach national eine CO<sub>2</sub>-Minderung um 80 bis 95 % gegenüber 1990 erreicht werden.

Die deutsche Zementindustrie ist sich ihrer Verantwortung bewusst und bekennt sich bereits seit vielen Jahren zum Klimaschutz. So ist es u. a. auf Grundlage der Klimaschutzvereinbarung zwischen Bundesregierung und deutscher Wirtschaft aus dem Jahr 2000 gelungen, die spezifischen energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementherstellung (aus Brennstoff- und Strombedarf) zwischen dem Basisjahr 1990 und 2015 um rund 52 % zu mindern. Zudem setzen Hersteller in zunehmendem Maße auf alternative Rohstoffe, wie etwa Hüttensand, Flugasche, natürliche Puzzolane und gebrannten Ölschiefer. Hierdurch ist es gelungen, den durchschnittlichen Klinkeranteil im Zement in Deutschland während der vergangenen 20 Jahre um rund 14 % zu reduzieren. Die weitere Steigerung der Klinkereffizienz wird bestimmt von Faktoren wie einerseits die genormten Qualitätsanforderungen an das Endprodukt Zement und andererseits die Verfügbarkeit alternativer Einsatzstoffe, die häufig Nebenprodukte anderer Industriezweige sind, z. B. der Roheisen- oder Kohlestromezeugung.

Als Anschlussregelung zur Klimaschutzvereinbarung hat die deutsche Wirtschaft im August 2012 eine Vereinbarung mit der Bundesregierung zur Steigerung der Energieeffizienz geschlossen, die eine wichtige Maßnahme auch zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen darstellt. Laut dem entsprechenden Verifikationsbericht für das Berichtsjahr 2016 hat das Produzierende Gewerbe den spezifischen Energieverbrauch gegenüber der Basisperiode 2007–2012 um 13,8 % gesenkt und damit das Minderungsziel von 5,25 % deutlich übertroffen.

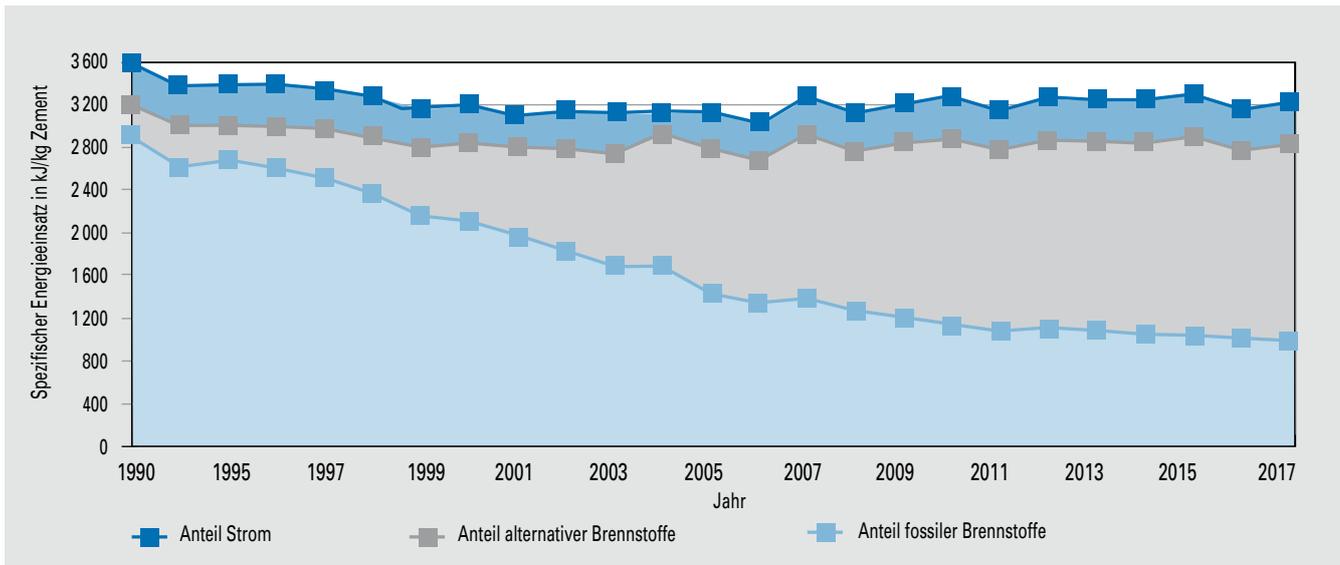


Bild 1.2.3-1 Entwicklung des spezifischen Energieeinsatzes

Quelle: VDZ

### Europäisches Emissionshandelssystem

Das seit 2005 existierende EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) ist das zentrale Instrument der europäischen Klimaschutzpolitik und verfolgt das Ziel, die CO<sub>2</sub>-Emissionen der europäischen Industrie und Energiewirtschaft wirksam zu begrenzen. Grundprinzip ist die Vergabe oder Versteigerung einer begrenzten Zahl von Emissionszertifikaten an die Betreiber relevanter Anlagen. Stößt eine Anlage mehr Treibhausgas aus, als ihr zugeteilt wurden, muss das Unternehmen weitere Rechte hinzukaufen, um seine jährliche Abgabeverpflichtung zu erfüllen. Wer dagegen überschüssige Rechte besitzt, kann diese an andere Unternehmen verkaufen. Hierdurch entsteht ein Anreiz zum ökonomischen Umgang mit Treibhausgasen. Um das Emissionsminderungsziel von 21 % bis 2020 (Basis: 2005) für die vom EU ETS erfassten Sektoren zu erreichen, wird die Anzahl der verfügbaren Zertifikate in der aktuellen dritten Handelsperiode (2012–2020) um jährlich 1,74 % verringert. Damit leistet die europäische Industrie einen überdurchschnittlichen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasen im Vergleich zu anderen Sektoren, wie etwa Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft (Nicht-ETS-Sektoren: 14 % bis 2020).

Seit dem Beginn der dritten Handelsperiode wurde für die Energiewirtschaft im Grundsatz die Vollversteigerung von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten (EUAs) eingeführt. Die Industrie muss seitdem ebenfalls einen Teil ihrer Zertifikate ersteigern bzw. zukaufen. Diejenigen Sektoren, die nachweislich dem Risiko von Carbon Leakage, d.h. einer Produktions- bzw. Emissionsverlagerung in das außereuropäische Ausland ausgesetzt sind, erhalten eine kostenfreie Grundausstattung von EUAs auf der Basis anspruchsvoller Benchmarks. Für die Carbon-Leakage-gefährdete europäische Zementindustrie gelten je ein Benchmark für Grauzementklinker (766 kg CO<sub>2</sub>/t) und Weißzementklinker (987 kg CO<sub>2</sub>/t). Als Bemessungsgrundlage hierfür wurden die durchschnittlichen Emissionen der besten 10 % Anlagen in der EU herangezogen. Durch einen so genannten sektorübergreifenden Korrekturfaktor wird die Benchmark-Zuteilung für alle Industrieanlagen jedoch im Schnitt um rund 12 % gekürzt, sodass selbst die besonders effizienten Anlagen mit zusätzlichen Kosten aus dem Emissionshandel belastet werden.

Anfang 2018 wurde nunmehr nach langen Verhandlungen eine novellierte Emissionshandelsrichtlinie für die vierte Handelsperiode ab 2021 bis 2030 verabschiedet. Das neue Emissionsmin-

derungsziel für ETS-Sektoren beträgt demnach 43 % gegenüber dem Basisjahr 2005 (Nicht-ETS-Sektoren: 30 %). Zu diesem Zweck wird die Zertifikatmenge ab 2021 um jährlich 2,2 % verringert (statt bisher 1,74 %). Darüber hinaus greift bereits ab Januar 2019 die Marktstabilitätsreserve (MSR), die im Rahmen der ETS-Reform verschärft wurde. Mithilfe der MSR soll dem Markt nachträglich ein Teil der Emissionszertifikate entzogen werden, die bislang zwar ausgegeben, aber von den Anlagenbetreibern nicht zur Abgabe benötigt wurden.

Die Benchmark-Zuteilung für die Carbon-Leakage-gefährdete Industrie wurde auch in der vierten Handelsperiode beibehalten. Zu diesem Zweck stehen ab 2021 bis zu 43,9 % der Gesamtmenge an Zertifikaten für die Industrie zur Verfügung. Auf der anderen Seite werden die Benchmarks, die eine wesentliche Bemessungsgrundlage für die Zuteilung sind, deutlich reduziert. Wurden die bisherigen Benchmarks allein auf Grundlage empirischer Daten ermittelt, soll künftig eine durchschnittliche jährliche Minderungsrate bestimmt und anschließend – unabhängig von der tatsächlichen technischen Entwicklung – linear fortgeschrieben werden. Diese Methodik ist eine Abkehr vom Benchmark-Prinzip, da in Zukunft selbst die effizientesten Anlagen eines Sektors nur in Ausnahmefällen den Benchmark erreichen werden.

### Klimaschutzpolitik auf nationaler Ebene

Parallel zum EU-Emissionshandel verfolgt die deutsche Bundesregierung auf nationaler Ebene das völkerrechtlich verbindliche Ziel, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 % gegenüber 1990 zu senken. Laut dem Koalitionsvertrag von CDU/CSU und SPD aus dem Frühjahr 2018 soll hierzu eine nationale Klimaschutzgesetzgebung verabschiedet und eine Kommission zur schrittweisen Rückführung der Kohleverstromung eingerichtet werden. Bis zur Mitte des Jahrhunderts strebt der Klimaschutzplan 2050 eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 % an. Nicht nur mit dem EU-Emissionshandel leistet die Industrie einen wesentlichen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Minderung in Deutschland. Vielmehr haben sich im Jahr 2014 18 Verbände und Organisationen der Wirtschaft in einer freiwilligen Vereinbarung zur Einführung von 500 Energieeffizienz-Netzwerken bis 2020 verpflichtet. Auch die Zementindustrie beteiligt sich gemeinsam mit Unternehmen weiterer Baustoffindustrien an Netzwerken auf Bundes- und Landesebene.

## 1.3 Umweltschutz und Nachhaltigkeit

### 1.3.1 Klimaschutz in der deutschen Zementindustrie ■

Das Treibhauspotenzial (engl.: global warming potential, GWP) der Emissionen der Zementindustrie wird praktisch ausschließlich durch Kohlenstoffdioxid bewirkt. Die bei der Zementherstellung auftretenden CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen aus der Kalksteinentsäuerung (rohstoffbedingte Emissionen) sowie aus dem thermischen und elektrischen Energieeinsatz (energiebedingte Emissionen). Andere der im Kyoto-Protokoll genannten Treibhausgase (z.B. N<sub>2</sub>O oder CH<sub>4</sub>) treten bei der Zementherstellung nicht oder nur in extrem geringen Mengen auf.

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

Bei der Entsäuerung des für die Klinkerherstellung wichtigsten Rohstoffs Kalkstein (chemisch CaCO<sub>3</sub>) wird CO<sub>2</sub> freigesetzt. Die je Tonne produziertem Klinker entstehende rohstoffbedingte CO<sub>2</sub>-Emission hängt von der Rohstoffzusammensetzung ab. Entscheidend hierfür ist der Kohlenstoffgehalt in den Rohmaterialien. Er variiert aber anlagenspezifisch nur in sehr geringem Maße. Eine Verminderung der rohstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen ist – bezogen auf die Tonne Zement – nur in begrenztem Maße durch die verstärkte Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen möglich. Bezogen auf die Tonne Klinker ist eine Reduzierung praktisch nicht möglich. Entwicklungen für neue Baustoffe weisen zwar auf Möglichkeiten für CO<sub>2</sub>-effiziente zukünftige Bindemittel hin, die allerdings nach dem heutigen Stand der Forschung und Entwicklung auf begrenzte Anwendungsfelder schließen lassen. Somit kommt weiterhin der effizienten Nutzung von Klinker in Zementen eine ausschlaggebende Rolle für die Begrenzung von rohstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu.

#### Brennstoffbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen

Beim Klinkerbrennprozess entstehen brennstoffspezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen zum einen durch die Umsetzung von Brennstoffenergie zur Erzeugung von Prozesswärme in den Drehrohröfen. Darüber hinaus wird Brennstoffenergie für die Trocknung anderer Hauptbestandteile des Zements, wie z.B. Hüttensand, aufgewendet. In Deutschland wird der Brennstoffenergiebedarf zu ca. 65 % durch alternative Brennstoffe gedeckt. Sie ersetzen vollständig traditionelle und rein fossile Brennstoffe. Da die Abfälle ansonsten an anderer Stelle ihren Kohlenstoffgehalt zu CO<sub>2</sub> oder anderen Treibhausgasen freisetzen würden, führt der Einsatz von alternativen Brennstoffen im Klinkerbrennprozess insgesamt zu einer Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

In dieser Bewertung der alternativen Brennstoffe besteht ein systematischer Unterschied zur Berichterstattung im Rahmen des Europäischen Emissionshandelssystems (EU ETS). Der Emissionshandel umfasst alle fossilen Brennstoffe sowie die fossilen Anteile der alternativen Brennstoffe. Nur die Emissionen der biogenen Anteile der Brennstoffe werden mit einem Emissionsfaktor von Null berechnet. Eine Substitution der traditionellen fossilen Brennstoffe Braun- und Steinkohle durch andere Brennstoffe mit niedrigeren spezifischen CO<sub>2</sub>-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 weiter dahin, fossile Brennstoffe durch alternative Brennstoffe aus Abfällen zu ersetzen. Dabei spielt der Einsatz biogener Abfallbrennstoffe bzw. solcher Brennstoffe mit biogenen Anteilen eine zunehmende Rolle.

Der hohe Grad ihrer energetischen Nutzung und die vollständige stoffliche Nutzung der inerten Anteile trägt überdies zur Energie- und Ressourceneffizienz im Sinne der Kreislaufwirtschaft bei.

#### Elektrisch bedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen

Der elektrische Energieeinsatz macht etwa 14 % des gesamten Energieeinsatzes der deutschen Zementwerke aus. Ca. 46 % des elektrischen Energieeinsatzes entfällt auf die Zementmahlung, ca. 25 % auf die Rohmaterialaufbereitung. Für die Prozesse zum Brennen und Kühlen werden ca. 24 % der elektrischen Energie eingesetzt. Für die Packerei/Versand werden etwa 5 % elektrische Energie benötigt. Eine Eigenstromerzeugung findet in der deutschen Zementindustrie bisher nur in geringem Maße statt.

Zusammenfassend ergeben sich für den Zeitraum 2005 bis 2016 die in **Tabelle 1.3.1-1** dargestellten direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen der deutschen Zementindustrie und indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Einsatz elektrischer Energie. Im Zeitraum 2014 bis 2016 konnten die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter reduziert werden. Im Jahr 2016 betragen die direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen 19,3 Mt CO<sub>2</sub> bzw. 0,651 t CO<sub>2</sub>/t Zement. Ein Grund für die weitere Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist der vermehrte Einsatz von alternativen Roh- und Brennstoffen im Klinkerbrennprozess.

#### Treibhausgas-Bilanzierung und -Berichterstattung

Die Unternehmen der Zementindustrie sind im Rahmen des EU ETS zu einem jährlichen Bericht über ihre direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Roh- und Brennstoffen in der Klinkerproduktion verpflichtet. Neben den dafür geltenden Vorgaben für die Berichterstattung steht der Zementindustrie auch das weltweit angewendete Cement CO<sub>2</sub> and Energy Protocol (CSI Protocol) der Cement Sustainability Initiative (CSI) als Werkzeug auf freiwilliger Basis zur Verfügung. Das CSI Protocol berücksichtigt neben den direkten auch die indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus eingesetztem Strom und zugekauftem Klinker. Außerdem werden zusätzlich zu den direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Klinkerherstellungsprozess auch kleinere Quellen für direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen z.B. aus mobilen Quellen auf dem Werksgelände und im Steinbruch berücksichtigt. 2016 wurde eine europäische Norm zur Ermittlung von Treibhausgas (THG)-Emissionen aus energieintensiven Industrien veröffentlicht, die die branchenspezifischen Gegebenheiten der Zementproduktion besonders berücksichtigt. Grundlage aller Methoden ist die Kenntnis der relevanten Stoffströme in einem Zementwerk, der Einsatz- und Produktionsmengen sowie der zugehörigen Stoffparameter wie Heizwert und Emissionsfaktor.

#### CO<sub>2</sub>-Berichterstattung im EU ETS

Das zentrale Instrument der EU zur Verringerung der Treibhausgasemissionen, das EU ETS, befindet sich aktuell in der dritten Handelsperiode (2013 bis 2020). Kraftwerksbetreiber und Unternehmen in energieintensiven Industriebranchen (z.B. Zement, Kalk, Chemie, Glas, Papier) und die Luftfahrt aus insgesamt 31 Ländern (EU-28, Island, Lichtenstein und Norwegen) nehmen daran teil. Die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionsberichte sind seit 2013 nach der europäischen Monitoring-Verordnung (MVO) sowie den jeweils aktuellsten Leitfäden der EU und der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) zu erstellen. Die werkspezifischen Ermittlungsmethoden werden in einem Überwachungsplan (ÜP) festgelegt. Dieser wird online in einem Formular-Management-System (FMS) erstellt und muss von der DEHSt genehmigt werden. Ein zentraler Punkt dabei ist die Festlegung und Einhaltung der geforderten Genauigkeit bei der Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von einzelnen Stoffströmen.

**Tabelle 1.3.1-1** CO<sub>2</sub>-Emissionen der deutschen Zementindustrie

Jahr	Direkte CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mt CO <sub>2</sub> ]	Indirekte CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mt CO <sub>2</sub> ]	Summe CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mt CO <sub>2</sub> ]	Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen [t CO <sub>2</sub> /t Zement]
2005	20,1	2,0	22,0	0,711
2006	20,4	2,1	22,5	0,669
2007	22,0	2,1	24,1	0,723
2008	20,4	2,0	22,4	0,668
2009	18,8	1,8	20,6	0,675
2010	18,6	1,9	20,5	0,684
2011	20,0	2,2	22,1	0,660
2012	19,9	2,1	22,0	0,677
2013	19,0	2,0	21,0	0,672
2014	19,6	2,0	21,6	0,673
2015	19,1	1,9	21,0	0,674
2016	19,3	1,9	21,3	0,651

Quelle: VDZ, DEHSt, UBA

Die regelmäßige Überprüfung und Justierung von Prozesswaagen muss dokumentiert werden und gewährleisten, dass die Genauigkeit der Messinstrumente den Vorgaben der MVO und des Überwachungsplans entspricht. Für die analytische Ermittlung der Brennstoffparameter Heizwert und Emissionsfaktor werden in der Regel akkreditierte Labore herangezogen. Wichtig für die Zementindustrie ist insbesondere die Überwachung von Prozess-emissionen: Der Emissionsfaktor von Klinker (und Stäuben) wird in regelmäßigen Abständen analytisch bestimmt. Zusätzlich sind seit 2013 CO<sub>2</sub>-Emissionen aus organischem Kohlenstoff (TOC) im Rohmehl sowie die minimalen Verbrennungsemissionen von in Notstromaggregaten eingesetzten Brennstoffen zu berücksichtigen. Hierdurch wird der Umfang der berichteten CO<sub>2</sub>-Emissionen jedoch nur geringfügig erweitert. Demzufolge bleiben im Durchschnitt in den vergangenen Jahren die spezifischen Emissionen mit insgesamt 0,8 t CO<sub>2</sub> pro Tonne Zementklinker gegenüber der 2. Handelsperiode (2008–2012) nahezu unverändert.

Die künftigen Rahmenbedingungen und Regeln in der 4. Handelsperiode des EU ETS von 2021–2030 insbesondere zur Obergrenze der verfügbaren Emissionszertifikate sowie deren kostenfreie Zuteilung wurden in einem so genannten Trilog-Verfahren festgelegt (siehe hierzu Abschnitt 1.2.4)

### Cement CO<sub>2</sub> and Energy Protocol

Das CSI Protocol ist eine Anleitung zur Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Energieeinsatz bei der Zementherstellung – sowohl auf Werks- als auch auf Unternehmensebene. Es wurde von der Cement Sustainability Initiative (CSI) des World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) unter Mitwirkung seiner Mitgliedsunternehmen und des VDZ entwickelt. Es besteht aus den folgenden drei Elementen:

- einem Leitfaden: CO<sub>2</sub> and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry – The Cement CO<sub>2</sub> and Energy Protocol (Guidance Document),
- einer detaillierten Internet-basierten Anleitung (Internet Manual: [www.cement-co2-protocol.org](http://www.cement-co2-protocol.org)) und
- einer Berechnungsmaske im Excel-Format als zentralem Werkzeug (CSI Protocol Spread Sheet, 2013 aktualisierte Version 3.1).

Innerhalb der Zementindustrie ist das CSI Protocol das maßgebliche weltweit angewendete Instrument zur CO<sub>2</sub>-Bilanzierung und Berichterstattung. Die auf Grundlage des CSI Protocols ermittelten Daten werden für den weiteren Ausbau eines internationalen CO<sub>2</sub>- und Energie-Informationssystems für die Zementindustrie gesammelt. Die wichtigsten spezifischen Emissionsdaten (key performance indicators, KPI) von über 930 Anlagen sind für Regionen zusammengefasst und in anonymisierter Form in einer Datenbank des CSI Getting the Numbers Right-Projekts veröffentlicht (GNR-Daten bis 2015: [www.wbcscement.org/GNR-2015](http://www.wbcscement.org/GNR-2015)).

### Europäische Norm 2016 veröffentlicht

Im Jahr 2016 wurde die europäische Normenreihe EN 19694-1 bis -6 für die Bestimmung von Treibhausgas-Emissionen aus fünf energieintensiven Industrien veröffentlicht. Teil 3 (EN 19694-3) behandelt spezifische Methoden der Zementindustrie, die unter maßgeblicher Mitwirkung von VDZ und ECRA entwickelt wurden. Neben dem zementspezifischen Teil behandeln jeweils einzelne Normenteile generelle Aspekte sowie vier weitere energieintensive Industrien (Stahl, Aluminium, Kalk und Ferrolegerungen).

Im Gegensatz zum EU ETS werden in der Norm neben direkten auch indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Strom- und Wärmeeinsatz bzw. -abgabe berücksichtigt. Die Methoden für die Zementindustrie umfassen stationäre CO<sub>2</sub>-Quellen entlang der gesamten Prozesskette zur Zementproduktion. Das CSI Protocol dient als methodische Grundlage insbesondere für die Beschreibung der Massenbilanzmethoden zur Ermittlung prozessbedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Calcinerung im Klinkerherstellungsprozess. Für europäische Zementwerke, die gemäß CSI Protocol vorgehen, ergibt sich nun der Vorteil, dass die bereits angewendeten Methoden auch die EN-Norm erfüllen können, die voraussichtlich eine gesteigerte internationale Anerkennung mit sich bringt.

Auf Grundlage der Normenserie EN 19694 wird derzeit innerhalb von drei Jahren ein international gültiger ISO-Standard erstellt. Die ersten Arbeiten hierzu wurden im Jahr 2018 begonnen. Die gemeinsame Arbeitsgruppe (Joint Working Group, JWG) aus ISO/TC 217/SC 7 und ISO/TC 146/SC 1 befasst sich mit den generellen Aspekten. Federführend für die Bearbeitung der sektorspezifischen Standards ist die Normungsgruppe ISO/TC 146/SC 1/WG 30.

## CO<sub>2</sub> Capture and Storage/Utilization

Um die langfristigen politischen Klimaziele der EU bzw. Deutschlands zu erfüllen, müssen neben dem Energiesektor insbesondere energieintensive Industrien ihren Treibhausgasausstoß signifikant verringern.

Die Potenziale der traditionellen Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Minderung beim Klinkerbrennprozess (z. B. Verringerung des Klinkeranteils im Zement, Verbesserung der Energieeffizienz, Erhöhung des Anteils von alternativen Brennstoffen mit biogenen Anteilen) sind aus prozesstechnischen Gründen sowie entsprechend der Marktanforderungen bereits weitestgehend erschöpft. Daher werden seit einiger Zeit auch neuartige Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung erforscht und in Teilen im Pilotmaßstab erprobt. Die möglichen Wege und erforderlichen Maßnahmen zur Erreichung der ehrgeizigen Klimaziele sind in so genannten Roadmaps beschrieben, die in den letzten Jahren von Organisationen wie der International Energy Agency (IEA) und dem Global CCS Institute für verschiedene industrielle Sektoren, u. a. für die Zementindustrie, erstellt wurden. Die aktualisierten und ergänzten CSI/ECRA-Technology Papers 2017 ([www.wbcsdcement.org/technology](http://www.wbcsdcement.org/technology)) entstanden unter maßgeblicher Beteiligung von Experten aus der ECRA, dem VDZ und dem Forschungsinstitut. Auf dieser Grundlage haben CSI und IEA 2018 eine neue Cement Technology Roadmap erstellt. Demnach müsste durch Anwendung von Carbon-Capture-Verfahren im Jahr 2050 ein Anteil von 40 bis 60 % an der notwendigen CO<sub>2</sub>-Minderung erreicht werden.

Unter Carbon Capture wird die Abtrennung des CO<sub>2</sub> aus dem Abgas und dessen langfristige Speicherung (CCS) oder Wiederverwendung (CCU) verstanden. Aufgrund der fehlenden nationalen Rechtssicherheit im Hinblick auf die untertägige Speicherung von CO<sub>2</sub> rückt die Verwendung von CO<sub>2</sub> als Ausgangsstoff für vermarktungsfähige Produkte wie Methan oder Methanol in den Fokus. Um das CO<sub>2</sub> aus dem Prozess abzutrennen, bieten sich im Zementklinkerbrennprozess hauptsächlich folgende Technologiegruppen an:

- Post-Combustion: Die nachträgliche Abtrennung mittels Sorbentien
- Oxyfuel: Die Verbrennung mit reinem Sauerstoff und Aufkonzentrierung von CO<sub>2</sub> im Prozess

Die Zementindustrie strebt die weiteren Erforschung und Erprobung der Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung in Zementwerken an. Seit 2007 erforscht die ECRA in ihrem CCS-Projekt die technische Machbarkeit von Capture-Technologien, insbesondere der Oxyfuel-Technologie (<https://ecra-online.org/research/ccs/>). Aufbauend auf den Ergebnissen der vorausgegangenen Phasen wurden Konzepte für zwei Pilotanlagen entwickelt und hierfür zwei geeignete Werkstandorte gefunden. Die Zementunternehmen bereiten sich derzeit auf ein mögliches Demonstrationsprojekt an diesen beiden Standorten vor. Eine geeignete Finanzierung vorausgesetzt, könnte die großindustrielle Erprobung der Oxyfuel-Technologie in 2019 bis 2021 beginnen.

Prototypentests zur Oxyfuel-Technologie und eine umfassende techno-ökonomische Analyse von CO<sub>2</sub>-Abscheidungsverfahren wurden im europäischen Forschungsprojekt CEMCAP unter maßgeblicher Beteiligung des VDZ durchgeführt (siehe Box und Abschnitt 3.2.1). Das Unternehmen Norcem hat in seinem Werk Brevik (Norwegen) verschiedene Post-Combustion-Methoden im Pilotmaßstab erprobt. Ein anschließendes Projekt zur Anwendung des Post-Combustion-Verfahrens (Amin-Wäsche) im

Zementwerk Brevik wurde in Norwegen vorgeschlagen. In zwei weiteren europäischen Forschungsprojekten werden als Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung das so genannte Calcium-Looping-Verfahren und eine direkte CO<sub>2</sub>-Abtrennung bei der Calcinierung (direct separation) in den Forschungsprojekten CLEANKER ([www.cleanker.eu](http://www.cleanker.eu)) und LEILAC ([www.project-leilac.eu](http://www.project-leilac.eu)) ebenfalls unter Beteiligung des Forschungsinstituts untersucht. Die Diskussion von Technologien zur CO<sub>2</sub>-Speicherung begleitet der VDZ im deutschen Forschungsprojekt CLUSTER.

Bisher wurden die Kosten für die Abtrennung auf 40 bis 110 €/t CO<sub>2</sub> geschätzt. Die Herstellungskosten pro Tonne Zement würden somit signifikant um ca. 30 bis 70 €/t erhöht. In diesem Fall wären wirksame gesetzliche Regelungen zum Schutz vor Carbon Leakage unerlässlich. Diese müssten deutlich über die bisher im EU-ETS getroffenen Regelungen hinausgehen. Eine Senkung der Kosten ist zudem nur durch eine Erprobung und Weiterentwicklung der Technologien möglich. Zudem ergibt sich aus der Prognose der Roadmaps, dass in 2050 40 bis 60 % aller Zementwerke in Europa mit Carbon-Capture-Technologien ausgerüstet sein müssten. Ein solcher Pfad könnte lediglich eingehalten werden, wenn sehr zeitnah eine Demonstration der Technologien erfolgt.

## 1.3.2 Energiebedarf und Energieeffizienz ■

### Produktionskapazität und Ofenanlagen

Die genehmigte Produktionskapazität der Ofenanlagen der deutschen Zementindustrie lag bis zum Jahr 2017 bei 107 460 t/d. Die Betriebsgenehmigungen umfassten dabei 53 Ofenanlagen. Zum 01.01.2018 wurde ein Ofen mit Zyklonvorwärmer weniger verzeichnet, der zu einem entsprechenden Rückgang der Tageskapazität auf 106 310 t führte. Der überwiegende Anteil der Öfen wird mit dem Trocken- bzw. Halbtrockenverfahren betrieben. Weiterhin bestehen Genehmigungen für acht Schachtofen (**Tabelle 1.3.2-1**). Die durchschnittliche Ofenkapazität hat sich für Drehöfen nur geringfügig verändert und liegt momentan bei 2 389 t/d. 98,9 % der genehmigten Gesamtkapazität entfallen auf Anlagen mit Zyklon- bzw. Rostvorwärmern. Der Anteil der Zyklonvorwärmanlagen mit rund 94 % (bezogen auf die Kapazität) ist konstant geblieben. Von den zwölf installierten Vorcalcineranlagen verfügen neun über eine Tertiärluftleitung. Vorcalcineranlagen repräsentieren aufgrund der im Vergleich größeren Ofenleistung mehr als ein Viertel der installierten genehmigten Klinkerkapazität der deutschen Zementwerke.

Die Auslastung der Ofenanlagen ist im Berichtszeitraum gestiegen, sie wird bestimmt durch die genehmigte sowie die technische Kapazität sowie die Verfügbarkeit der Ofenanlagen im Laufe des Jahres.

### Brennstoffenergiebedarf

Bei der Zementherstellung wird Brennstoffenergie im Wesentlichen für das Brennen des Zementklinkers aufgewendet. Für die Trocknung von weiteren Zementhauptbestandteilen, wie z. B. Hüttsand, werden nur geringe Mengen thermischer Energie eingesetzt. Als Rohstoff dienen hauptsächlich Kalksteinmergel und Ton. Zur Herstellung von Zementklinker mit seinen charakteristischen Eigenschaften werden die Rohstoffe bei Temperaturen von 1 400 bis 1 450 °C gebrannt. Aufgrund der Produkthanforderungen, die einen Hochtemperaturprozess erforderlich machen, gehört die Zementindustrie zu den energieintensiven Branchen. Seit jeher ist die Zementindustrie bestrebt, ihren Energiebedarf zu reduzieren, um Auswirkungen auf die Umwelt und die hohen Brennstoffenergiekosten zu senken. Dies spiegelt sich in der Entwicklung des

### Erster Zementklinker mit Oxyfuel-Kühler hergestellt

Den Projektpartnern IKN, HeidelbergCement und VDZ ist es in dem EU-Forschungsprojekt CEMCAP gelungen, Zementklinker mithilfe einer innovativen Oxyfuel-Kühler-Technologie herzustellen. Der hierfür erstmals gebaute Oxyfuel-Kühler-Prototyp wurde im Rahmen des Forschungsprojekts im HeidelbergCement-Werk in Hannover 2016 eingesetzt. In mehreren Versuchen wurde 2017 die Gaszusammensetzung für den Oxyfuel-Prozess eingestellt und die Klinkerqualität und Kühlerfunktion getestet. Das CEMCAP-Projekt soll die Voraussetzungen für einen großflächigen Einsatz von CO<sub>2</sub>-Capture-Technologien in Zementwerken schaffen und so eine spätere Lagerung oder Nutzung des CO<sub>2</sub> ermöglichen (CCS, CCU).

Ziel ist es, die CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien für die Zementindustrie auf eine höhere technologische Entwicklungsstufe (TRL) und damit dem Praxiseinsatz näher zu bringen. Der Prototyp des Oxyfuel-Klinkerkühlers basiert auf theoretischen



**Bild 1.3.1-1** Der Prototyp des Oxyfuel-Klinkerkühlers im Praxistest

Konzepten, die in der CCS-Projektphase III der ECRA entwickelt wurden (<https://ecra-online.org/research/ccs/>). Er erreichte eine Durchsatzrate von 47 Tonnen Klinker/Tag. Die experimentellen Arbeiten am Prototyp dienten dazu, den Oxyfuel-Kühler in einer industriellen Umgebung zu testen und dabei eine ausreichende Kühlleistung (Effizienz) und Klinkerqualität abzusichern.

Eine besonders anspruchsvolle Aufgabe beim Entwurf des Prototyps war die Gewinnung von Heißklinker aus dem laufenden Betrieb der Ofenlinie. Dies wurde durch die Entwicklung eines innovativen Klinkerabzugssystems von IKN erreicht. Die Testprozessparameter wurden kontinuierlich aufgezeichnet. Abgasströme wurden erfasst und vom VDZ analysiert, um die Effizienz der Abdichtung gegen Falschlufteinbruch zu beurteilen. Für die Analyse wurden regelmäßig Klinkerproben vor und nach dem Oxyfuel-Klinkerkühler genommen und im VDZ-Labor untersucht. Trotz zahlreicher technischer Herausforderungen konnten im Kühlmedium wiederholt CO<sub>2</sub>-Konzentrationsniveaus von über 70 Vol.-% erreicht werden.

Erkenntnisse über den Betrieb des Oxyfuel-Klinkerkühler-Prototyps zeigen, dass die Übergangszonen wie das Kaltklinker-Entladesystem besondere Aufmerksamkeit im Hinblick auf die Minimierung des Falschlufteintrags erfordern. Dies gilt auch für die Realisierung von Projekten in industriellem Maßstab. Während des Experiments wurden keine Leckagen von CO<sub>2</sub>-reichem Gas festgestellt. Dieses Gas allein hatte keinen Einfluss auf die Klinkerqualität. In einigen Klinkerproben trat bis zu maximal 4 M.-% unerwarteter Alitzerfall auf. Der VDZ untersucht derzeit den kombinierten Effekt von Wasser und CO<sub>2</sub> hierauf. Gleichzeitig läuft eine zweite Untersuchung, um einen Einfluss des beobachteten geringen Alitzerfalls auf die Zementfestigkeit auszuschließen oder eingrenzen zu können. Die Ergebnisse der experimentellen Arbeiten und Laboruntersuchungen werden eine Einschätzung erlauben, wie ein Kondensator, der in einer zukünftigen Oxyfuel-Ofenanlage für die Entfeuchtung des rezirkulierten Gases vorgesehen ist, dimensioniert und betrieben werden sollte. Diese Ergebnisse werden im CEMCAP-Forschungsprojekt und als Fachpublikationen präsentiert (<https://www.sintef.no/projectweb/cemcap/>).

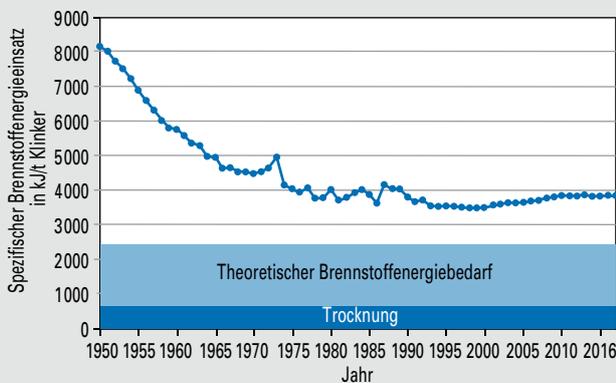
Die Beteiligung des VDZ im gesamten Forschungsprojekt wird in Kapitel 3.2.4 dargestellt. Die experimentellen Arbeiten im Zementwerk wurden zusätzlich in einem Kurzfilm dokumentiert (<https://vdz.info/th0di>).

CEMCAP ist ein Forschungsprojekt, das aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm HORIZON 2020 der Europäischen Union im Rahmen der Fördervereinbarung Nr. 641185 finanziert wird.

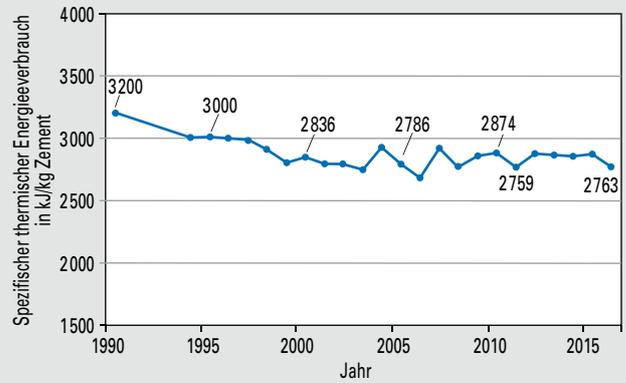
**Tabelle 1.3.2-1** Anzahl und Kapazität der Öfen mit Betriebsgenehmigung in Deutschland

	Stand: 01.01.2016			Stand: 01.01.2017			Stand: 01.01.2018		
	Anzahl	Kapazität		Anzahl	Kapazität		Anzahl	Kapazität	
		t/d	%		t/d	%		t/d	%
Öfen mit Zyklonvorwärmer	39	100 760	93,8	39	100 760	93,8	38	99 610	93,7
Öfen mit Rostvorwärmer	6	5 500	5,1	6	5 500	5,1	6	5 500	5,2
Schachtofen	8	1 200	1,1	8	1 200	1,1	8	1 200	1,1
Summe	53	107 460	100	53	107 460	100	52	106 310	100
mittlere Ofenkapazität in t/d	Drehöfen	2 361		2 361		2 389			
	Schachtofen	150		150		150			

Quelle: VDZ



**Bild 1.3.2-1** Spezifischer Brennstoffenergieeinsatz der deutschen Zementwerke (bis 1987 alte Bundesländer, danach Deutschland gesamt) Quelle: VDZ

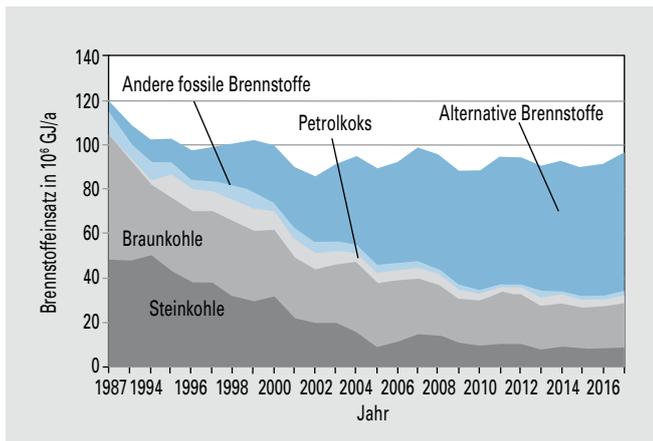


**Bild 1.3.2-2** Spezifischer thermischer Energieverbrauch der deutschen Zementindustrie Quelle: VDZ

**Tabelle 1.3.2-2** Einsatz alternativer Brennstoffe in der deutschen Zementindustrie

Alternativer Brennstoff in 1000 t/a	2015	2016	2017
Altreifen	221	201	202
Altöl	24	66	68
Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen:			
- Zellstoff, Papier und Pappe	93	81	87
- Kunststoff	654	640	680
- Verpackung	-	-	-
- Abfälle aus der Textilindustrie	-	7	-
- Sonstige	1 127	1 163	1 089
Tiermehle und -fette	149	145	150
Aufbereitet Fraktionen aus Siedlungsabfällen	317	283	440
Altholz	< 1	< 1	< 1
Lösungsmittel	145	145	130
Bleicherde	-	-	-
Klärschlamm	382	463	587
Sonstige, wie:	65	58	156
- Ölschlamm			
- Organische Destillationsrückstände			

Quelle: VDZ



**Bild 1.3.2-3** Brennstoffeinsatz in der deutschen Zementindustrie  
Quelle: VDZ

Brennstoffenergieeinsatzes pro Tonne Zement von 1987 bis 2017 (**Bild 1.3.2-1**) wider. Verfahrenstechnische Optimierungen führten dazu, dass der spezifische thermische Energiebedarf, bezogen auf Zement, seit 1999 nahezu konstant ist (**Bild 1.3.2-2**).

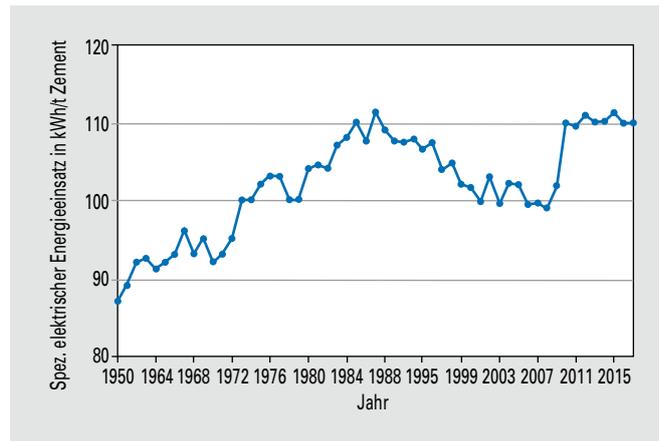
Insgesamt ist der Brennstoffenergieeinsatz seit 1987 u.a. wegen des Produktionsrückgangs von 119,9 auf 96,8 Mio. GJ in 2017 gesunken (**Bild 1.3.2-3**). Dies entspricht einer Reduzierung von 19,3 %.

### Brennstoffmix

Der Anteil der Alternativbrennstoffe am Brennstoffmix ist seit 1999 von 23 % auf 65 % im Jahr 2017 stetig gestiegen. Die alternativen Brennstoffe substituieren dabei vorwiegend Braunkohle, während die Verbräuche anderer fossiler Brennstoffe (Heizöl EL, Heizöl S und Erdgas) leicht angestiegen sind. Diese liegen jedoch auf insgesamt sehr niedrigem Niveau und werden zumeist zum Anfahren der Ofenanlagen verwendet. Die Anteile der verschiedenen Brennstoffe haben sich in den Jahren 2015 bis 2017 nur leicht verschoben (**Tabelle 1.3.2-2**). Gestiegen sind u.a. der Einsatz von Klärschlamm sowie aufbereiteten Fraktionen aus Siedlungsabfällen. Demgegenüber stehen leichte Rückgänge beim Altrefineinsatz (von 221 000 t in 2015 auf 202 000 t in 2017).

### Elektrischer Energiebedarf

Elektrische Energie wird bei der Zementherstellung vor allem für die Rohmaterialaufbereitung (ca. 20 %), zum Brennen und Kühlen des Klinkers (ca. 25 %) und für die Zementmahlung (ca. 45 %) aufgewendet. Die Entwicklung des spezifischen elektrischen Energieeinsatzes der deutschen Zementindustrie ist bis 1987 durch einen langjährigen Anstieg auf Werte um 110 kWh/t Zement geprägt (**Bild 1.3.2-4**). Nach der Wiedervereinigung Deutschlands konnte dieser Trend bis 2008 zunächst umgekehrt werden. Seitdem stieg der Strombedarf wieder an und hat sich seit 2010 bei ca. 110 kWh/t Zement stabilisiert. Grund für die Erhöhung dürfte zum einen der gestiegene Bedarf der Baustoffindustrie an fein gemahlten leistungsstarken Zementen gewesen sein. Aber auch die verstärkte Verwendung weiterer Hauptbestandteile neben Klinker bedeutet meistens einen höheren Mahlergieaufwand, da z. B. Hüttsand im Vergleich zu Klinker schwerer mahlbar ist oder zur Erzielung gleicher Zementqualität feiner gemahlen werden muss. Andererseits wird der entsprechende elektrische Energiebedarf für die Herstellung des substituierten Klinkers (Rohmaterialaufbereitung, Brennprozess) eingespart. Für die Rohmaterial- und Zementmahlung haben sich bei Neuanlagen energieeffiziente Mühlentypen in



**Bild 1.3.2-4** Spezifischer elektrischer Energieeinsatz der deutschen Zementindustrie (bis 1987 alte Bundesländer, danach Deutschland gesamt)  
Quelle: VDZ

Kombination mit Gutbett-Walzenmühlen und Vertikal-Walzmühlen durchgesetzt. Die Gebrauchseigenschaften der Zemente aus diesen Mühlen entsprechen jedoch oft nicht den jeweiligen regionalen Marktanforderungen, weshalb in vielen Fällen weiterhin eine Mahlung unter Verwendung von Kugelmühlen erfolgt. Die Qualitätsanforderungen werden zunehmend dadurch umgesetzt, dass die einzelnen Hauptbestandteile zunächst getrennt gemahlen und im Anschluss daran in Mischanlagen gemischt werden. Im Rahmen der betriebsüblichen Möglichkeiten führt dieses jedoch zu keiner signifikanten Minderung des Strombedarfs.

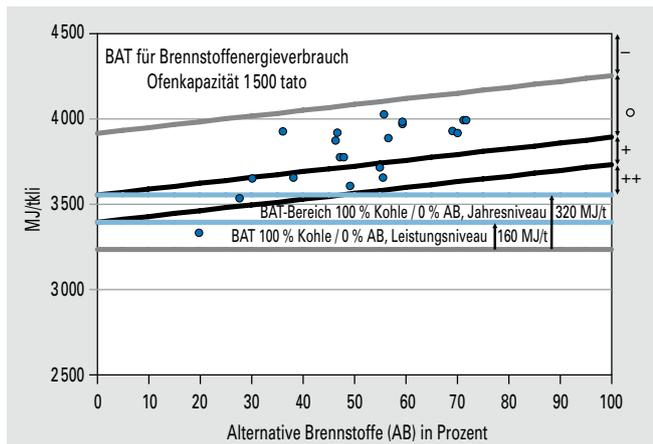
### VDZ-Bewertungsmatrix zur Beurteilung des Brennstoffenergiebedarfs

Die Herstellung von Zementklinker in modernen Zementwerken gehört zu den effizientesten industriellen Prozessen überhaupt. Zudem werden aus den Brennstoffen entstehende Aschen vollständig verwertet. Diese Mitverbrennung bei gleichzeitiger stofflicher Verwertung („co-processing“) leistet dadurch einen wichtigen Beitrag zur Ressourceneffizienz und zur Kreislaufwirtschaft.

Der Brennstoffenergiebedarf ist allgemein ein wichtiger Faktor zur energetischen Beurteilung einer Anlage. Weitere Aspekte wie Abwärmenutzung, Materialrecycling und Brennstoffqualität müssen darüber hinaus zusätzlich in Betracht gezogen werden.

Der VDZ führt seit vielen Jahren technische Audits in Zementwerken weltweit durch, häufig mit einem Fokus auf die thermische und elektrische Energieeffizienz der Anlagen. Um die Komplexität der Anlagen zu berücksichtigen, hat das Forschungsinstitut seine Bewertungsmatrix für die thermische Energieeffizienz weiterentwickelt.

Basierend auf früheren Modellrechnungen zum Brennstoffenergiebedarf des Klinkerbrennprozesses [1] und der Energieeffizienz bei der Zementherstellung [2] sowie den in dem europäischen BAT-Referenzdokument (BREF) genannten BAT-Bereich für den Energiebedarf des Klinkerbrennprozesses von 2 900–3 300 kJ/kg Klinker wurde eine erweiterte Bewertungsmatrix entwickelt (**Bild 1.3.2-1**). Der im BREF genannte Energiebedarf ist als ein optimaler Wert zu verstehen, der in einem Leistungstest erreicht werden kann. Gemäß BREF kann der jährliche Energiebedarf um 160–320 kJ/kg Klinker höher liegen, z. B. begründet durch An- und Abfahrvorgänge, Ofenstillstände usw. Ausgehend von einem BAT-Wert von 3 000 kJ/kg Klinker resultiert dies in einem



**Bild 1.3.2-5** Bewertungsmatrix für den Brennstoffenergiebedarf (Ofenleistung 1500 t/d)

jährlichen BAT-Niveau von 3160 – 3320 kJ/kg Klinker für die im BREF zugrunde gelegte Vorcalcineranlage mit einer Ofenkapazität von 3000 t/d. Unter Einbeziehung öffentlich verfügbarer Daten der Cement Sustainability Initiative (CSI) wurden die Einflüsse von Ofenkapazität und dem Einsatz alternativer Brennstoffe – basierend auf einem komplexen Brennstoffmix – in die Bewertungsmatrix integriert.

Damit verfügt der VDZ nunmehr über ein Werkzeug, mit dem der Brennstoffenergiebedarf von Ofenanlagen auch unter komplexen Betriebsbedingungen bewertet werden kann. Wie das **Bild 1.3.2-5** zeigt, fügen sich in Audits ermittelte Daten sehr gut in diese Matrix ein.

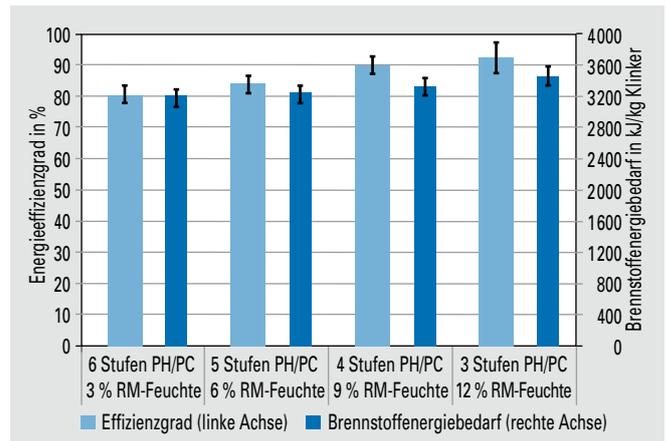
### Energiebedarf und -ausnutzung

Der Energiebedarf des Klinkerherstellungsprozesses hängt von einer Vielzahl von Parametern, wie vor allem der Anlagenauslegung und der Feuchte der zu trocknenden Rohstoffe ab. Er gibt jedoch keine Auskunft über die Energieeffizienz einer Anlage. Zementwerke sind üblicherweise darauf ausgelegt, die lokal vorhandenen Rohmaterialien durch Wärmenutzung der Drehrohrofenabgase zu trocknen. Daher haben Werke mit verhältnismäßig feuchten Rohmaterialien einen höheren klinkerspezifischen Energiebedarf als solche mit trockeneren Rohstoffen. Dies hat jedoch keinen negativen Einfluss auf die Energienutzung und damit auf die Energieeffizienz des Prozesses. Darüber hinaus wird der Wärmehalt der Drehrohrofenabgase und der Kühlerabluft vielerorts zur Trocknung anderer Zementhauptbestandteile (v.a. Hüttensand), von Kohle und Petrolkoks oder zunehmend auch von alternativen Brennstoffen verwendet. Eine Abwärmeverstromung ist in Europa bisher nur in wenigen Werken umgesetzt. Diese Maßnahmen haben zwar keinen Einfluss auf den Brennstoffenergiebedarf der Anlage, sie erhöhen aber deren Effizienz.

### Anforderungen an Alternativbrennstoffe

Eine Erhöhung des Alternativbrennstoffeinsatzes kann in Abhängigkeit von deren jeweiligen physikalisch-chemischen Eigenschaften den Brennstoffenergiebedarf erhöhen, gleichzeitig steigt in den meisten Fällen aber auch das Potenzial für eine zusätzliche Wärmenutzung.

Anfallende Brennstoffaschen werden vollständig in den Klinker eingebunden und dadurch letztlich Teil des Zements. Diese Kombination aus Mitverbrennung bei gleichzeitiger stofflicher Verwertung ist ein Alleinstellungsmerkmal des Klinkerherstel-



**Bild 1.3.2-6** Effizienzgrad und klinkerspezifischer Brennstoffenergiebedarf in Abhängigkeit vom Rohmaterial-Feuchtegehalt für optimierte BVT-Modellanlagen (3000 t/d, 100 % Steinkohle)

lungsprozesses. Dabei muss jedoch sichergestellt sein, dass die Brennstoffaschen einen zusätzlichen Nutzen zum Herstellungsprozess liefern. Des Weiteren muss der Brennstoffmix die grundsätzlichen Anforderungen an den Brennprozess erfüllen. Sehr hohe Substitutionsraten in Bezug auf fossile Primärbrennstoffe setzen qualitativ hochwertige, vorbehandelte Alternativbrennstoffe voraus.

### Bewertung der Energieausnutzung

Um die Vorteile des Co-processings herauszuarbeiten, hat der VDZ für ECRA einen Leitfaden zur Bewertung der Energieausnutzung von Zementwerken entwickelt und unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen des Herstellungsprozesses einen Effizienzgrad als Maß zur Bewertung der Energieausnutzung definiert. Demnach lag der Effizienzgrad, abhängig von den zugrunde liegenden Rahmenbedingungen, zwischen 70 und 80 %. Als Grundlage dienten die europäischen Daten der CSI-GNR-Datenbank für das Jahr 2014. Für eine weiterreichende Bewertung wurden verschiedene Szenarien für optimierte BAT-Modellanlagen der vorgenannten VDZ-Modellrechnungen zum Einfluss der eingesetzten Brennstoffqualität sowie der zu trocknenden Rohmaterialien betrachtet (**Bild 1.3.2-6**). Übliche Alternativbrennstoffe wurden zudem anhand ihrer Eigenschaften charakterisiert und hinsichtlich ihrer energetischen Nutzung unter Berücksichtigung möglicher Vorbehandlungsmaßnahmen eingeordnet.

### Kreislaufwirtschaft

In 2016 wurden etwa 24 % der Siedlungsabfälle in der EU deponiert. Diese Zahl schwankt stark je nach Mitgliedsstaat. Die EU-Kommission schlussfolgert daraus, dass es derzeit keine Überkapazitäten im Bereich der Müll- und Mitverbrennungsanlagen gibt. Demnach dürfte ein ausreichendes Potenzial an geeigneten Materialien zur Mitverbrennung in der EU vorhanden sein. Eine Erhöhung des Anteils an Materialien, die in Zementwerken mitverbrannt werden, würde einen großen Beitrag dazu leisten, CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermeiden, das Volumen des deponierten Abfalls zu verringern und gleichzeitig durch die Einbringung der Brennstoffaschen in das Produkt natürliche Ressourcen zu schonen. Dafür müssen jedoch hohe Anforderungen an Prozess, Brennstoffe und letztlich das Produkt erfüllt werden. Nur dann kann die Mitverbrennung bei gleichzeitiger stofflicher Verwertung („co-processing“) auch zukünftig einen nennenswerten Beitrag zu einer nachhaltigen und zukunftsweisenden Kreislaufwirtschaft in Europa leisten.

### 1.3.3 Immissionsschutz und Emissionsminderung ■

#### Umweltdaten

Seit 1998 veröffentlicht der VDZ jährlich die „Umweltdaten der deutschen Zementindustrie“ (<https://vdz.info/4z1zg>). Darin wird u.a. ein umfangreicher Überblick über die umweltrelevanten Emissionen sämtlicher klinkerproduzierender Werke in Deutschland gegeben. Der VDZ dokumentiert damit die Ergebnisse sowohl kontinuierlicher Emissionsüberwachungen als auch von Einzelmessungen von Spurenelementen und organischen Abgasbestandteilen in den deutschen Zementwerken.

#### TA Luft-Novellierung

Die TA Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) wurde letztmalig im Jahr 2002 neu gefasst; seit Anfang 2015 ist ein umfassender Novellierungsprozess im Gange.

Die TA Luft zählt zu den allgemeinen normkonkretisierenden Verwaltungsvorschriften, die auf Basis des §48 Bundes-Immissionsschutzgesetz erlassen werden. Sie konkretisiert gesetzliche Anforderungen im Umweltbereich und gewährleistet einen einheitlichen Behördenvollzug im Rahmen von Genehmigungsverfahren. Im Immissionsteil der TA Luft (Kapitel 4) sind allgemeine Anforderungen zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen festgelegt: im Emissionsteil (Kapitel 5) finden sich allgemeine und anlagenspezifische Vorgaben (Kapitel 5.4) zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen. Die wichtigsten Emissionsgrenzwerte für Zementwerke, in denen alternative Brennstoffe eingesetzt werden, sind in der bereits novellierten 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) festgelegt. Die TA Luft regelt darüber hinaus weitere allgemein gültige Grenzwerte sowie wesentliche Aspekte von Genehmigungsverfahren, umweltrechtlichen Prüfungen (z. B. Schornsteinhöhenberechnung und Ausbreitungsrechnung) oder der Emissionsüberwachung.

Gründe für den Novellierungsprozess sind u.a. die Anpassung des Regelwerks an den fortgeschrittenen Stand der Technik, die Umsetzung von bestehenden BVT-(Beste Verfügbare Techniken)-Schlussfolgerungen zur Richtlinie über Industrieemissionen, die Berücksichtigung neuer Anlagenarten sowie die Anpassung an die Luftqualitätsrichtlinie bzw. die 39. BImSchV (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen).

Die ersten drei Arbeitspakete des Bundesumweltministeriums (BMU) wurden im Sommer 2015 veröffentlicht, der erste offizielle Referentenentwurf inklusive Begründung im September 2016. Die Vielzahl der darin enthaltenen und zum Teil extrem verschärften und/oder neuen Regelungen, wie beispielsweise vermehrte Messverpflichtungen und Nachweispflichten, verschärfte Emissions- und Immissionsgrenzwerte, und erstmalig eingeführte Regelungen zum Naturschutz führten zu einer starken Kritik seitens der Industrie. Die offizielle Verbändeanhörung zur TA-Luft-Novelle fand im Dezember 2016 statt; darüber hinaus wurden zahlreiche Fachgespräche zu Einzelaspekten zwischen Industrie, BMU und Umweltbundesamt (UBA) geführt. Mit Spannung wurde daraufhin der offizielle zweite Referentenentwurf nebst Begründung erwartet, der schließlich im April 2017 veröffentlicht wurde.

#### Anlagenspezifischer Teil Regelungen für Zementwerke

Der Entwurf sieht für Öfen, Mühlen, Trockner, Kühler und Brecher eine jährliche Messverpflichtung für Gesamtstaub an

Quellen mit einem Abgasvolumenstrom > 10000 m<sup>3</sup>/h vor. Für Brecheranlagen führt dieses zu einem bedeutenden Mehraufwand gegenüber dem Status quo. Der Emissionswert für Formaldehyd von 5 mg/m<sup>3</sup> ist nach wie vor als Grenzwert und nicht – wie industrieseitig gefordert – als Zielwert definiert. Nur wenn die Emissionswerte nicht mit verhältnismäßigem Aufwand eingehalten werden können, sind die Emissionen im Einzelfall und unter Beachtung des Emissionsminimierungsgebotes zu begrenzen. Ebenfalls unverändert ist die Verschärfung des Emissionsgrenzwertes für Benzol (3 statt 5 mg/m<sup>3</sup>), was aufgrund rohmaterialbedingter Emissionen für einzelne Anlagen zukünftig problematisch sein kann.

Im Juli 2018 wurde eine aktualisierte Fassung zum Referentenentwurf auf der Internetseite des BMU veröffentlicht. Mit einem Kabinettsbeschluss ist im September 2018 zu rechnen.

#### Novelle Umweltverträglichkeitsprüfung

Ende Juli 2017 ist das Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) neu gefasst worden. Grundlage war die europäische UVP-Änderungsrichtlinie aus dem Jahr 2014. Nach §§19, 20 des neuen UVPG müssen nun bestimmte antragsrelevante Unterlagen, wie z.B. UVP-Berichte, über ein Internetportal elektronisch zur Verfügung gestellt werden. Alle 16 Bundesländer haben gemeinsam ein zentrales Internetportal für Informationen entwickelt: <https://www.uvp-verbund.de/startseite>. Die Internet-Veröffentlichungspflicht gilt grundsätzlich für alle ab dem 16.05.2017 beantragten Vorhaben. Sensible Unternehmensdaten in Berichten sollten daher zukünftig als Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse gekennzeichnet und von der Veröffentlichung ausgenommen werden.

#### Minderung von Quecksilberemissionen

Das Minamata-Übereinkommen als verbindliches, völkerrechtliches Übereinkommen zur Eindämmung der weltweiten anthropogenen Quecksilberemissionen ist im August 2017 in Kraft getreten. Nach der Auflegung zur Unterzeichnung im Oktober 2013 wurde im Mai 2017 die Grenze von 50 Ratifizierungen überschritten (bei 128 Unterzeichnerstaaten, Stand: Februar 2018).

Unter anderem sollen Import, Export und Produktion von quecksilberhaltigen Produkten bis 2020 verboten und Emissionen durch den Goldbergbau im kleinen Maßstab durch quecksilberfreie alternative Techniken eingedämmt werden. Emissionen aus industriellen Prozessen wie Kohlekraftwerken, Müllverbrennungsanlagen und Zementwerken sollen durch die Anwendung der besten verfügbaren Techniken (BVT) und der besten Umweltpaxis (BUP) minimiert werden.

Als Vertreter der ECRA und in Zusammenarbeit mit der Cement Sustainability Initiative (CSI) hat der VDZ mit seiner Expertise aktiv an der Erarbeitung von Leitfäden zur BVT/BUP der CSI und des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) teilgenommen, die auf internationaler Ebene erarbeitet und im Jahr 2016 veröffentlicht wurden. Es ist zu erwarten, dass diese in die anstehenden Revisionen der europäischen BVT-Dokumente für die Zement-, Kalk-, und Magnesiumindustrie einfließen, wie es bereits in der 2017 erschienenen Neuauflage des BVT-Referenzdokuments für Großkraftwerke geschehen ist.

Die Leitfäden von CSI und UNEP können über die jeweilige Webseite bezogen werden:

- CSI: <https://vdz.info/sdelg>
- UNEP: <https://vdz.info/ct9dg>

Vor dem Hintergrund dieser globalen Bemühungen kann die deutsche Zementindustrie bereits auf bewährte Techniken zurückgreifen, die zu einer Reduktion der Quecksilberemissionen beitragen. Darüber hinaus werden derzeit neue Technologien und Maßnahmen weiter untersucht, um eine darüber hinaus gehende Eindämmung zu erreichen.

### Maßnahmen zur $\text{NO}_x$ -Minderung

In Deutschland werden die  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte für Zementwerke ab dem 1. Januar 2019 auf  $200 \text{ mg/m}^3$  gesenkt. Auch gilt bereits seit dem 1. Januar 2016 ein Emissionsgrenzwert für  $\text{NH}_3$  von  $30 \text{ mg/m}^3$ , sofern das SNCR- oder SCR-Verfahren angewendet wird. Vor diesem Hintergrund haben die deutschen Zementhersteller in den letzten Jahren ihre  $\text{NO}_x$ -Minderungseinrichtungen umfassend optimiert bzw. erneuert.

An Voralcalcinieranlagen bestehen günstige Voraussetzungen für das SNCR-Verfahren, da hier ausreichend lange Verweilzeiten der Ofenabgase im geeigneten Temperaturfenster gegeben sind. Anders ist die Situation dagegen bei herkömmlichen Ofenanlagen mit Zyklonvorwärmer, an denen insbesondere der  $\text{NH}_3$ -Grenzwert in vielen Fällen nicht eingehalten werden kann.

Als Folge dieser Entwicklung wird in Deutschland an den verschiedenen Ofenlinien in neuste SNCR- und SCR-Anlagen investiert. Bei der katalytischen Abgasreinigung wird mehrheitlich das High-Dust-SCR-Verfahren verwendet, doch auch eine weitere Tail-End-Anlage ist 2016 in Betrieb gegangen. Weitere SCR-Anlagen werden in den Jahren 2018 und 2019 folgen.

Auch die Inbetriebnahme einer ersten  $\text{DeCONO}_x$ -Anlage in einem deutschen Zementwerk ist im Jahr 2018 vorgesehen. Dabei handelt es sich um die Kombination einer Low-Dust-SCR-Anlage mit einer RTO (Regenerative Thermische Oxidation), d. h. neben einer Verminderung der  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NH}_3$ -Emissionen ist auch ein deutlicher Abbau der Gesamt-Kohlenstoff- und Kohlenstoffmonoxid-Emissionen zu erwarten. Betriebserfahrungen liegen bereits aus einem österreichischen Zementwerk vor. Da das Verfahren hier im Zusammenhang mit einem besonderen Brennstoffkonzept vorgesehen ist, soll es in einem öffentlich geförderten Demonstrationsprojekt weiter erprobt werden. Im Rahmen eines umfangreichen Messprogramms werden dabei mit Beteiligung des VDZ nicht nur das  $\text{DeCONO}_x$ -Verfahren, sondern auch andere emissionsmindernde Maßnahmen systematisch untersucht.

Weitere große Investitionen wurden in zwei süddeutschen Zementwerken getätigt, in denen neue Ofenlinien mit Calcinator gebaut wurden. Die Anlagen sollen in 2018 bzw. 2019 in Betrieb gehen. Neben der Stufenverbrennung im Calcinator soll dabei als Sekundärmaßnahme zur  $\text{NO}_x$ -Minderung das SNCR-Verfahren angewendet werden.

Die aktuell getätigten Investitionen zur weiteren Absenkung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen liegen im dreistelligen Millionenbereich. Damit nimmt die deutsche Zementindustrie weltweit eine führende Stellung bei der  $\text{NO}_x$ -Minderung ein und trägt auch zur Einhaltung der nationalen Emissionshöchstmengen (NEC: National Emission Ceilings) für die Komponenten  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$  in Deutschland bei.

### Umweltmesstechnik

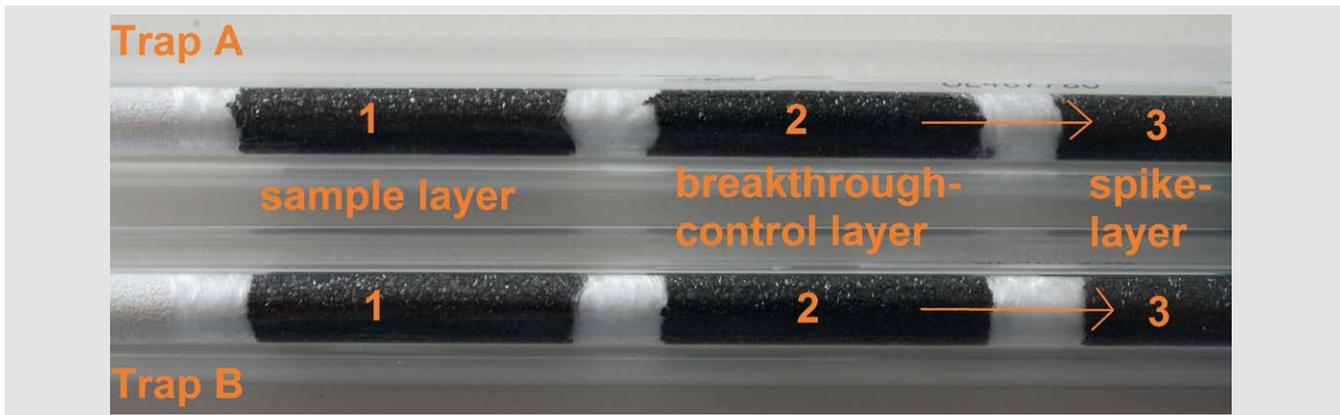
#### Entwicklungen Quecksilbermesstechnik

Vor dem Hintergrund sehr niedriger Grenzwerte für Quecksilberemissionen ist eine nachweisstarke und zuverlässige Analytik notwendig, um die Einhaltung der Grenzwerte zu belegen.

Im Allgemeinen sollte die Nachweisgrenze maximal 10 % des Grenzwertes betragen, damit das Ergebnis zur Konformitätsbewertung herangezogen werden kann. Unter der Nachweisgrenze versteht man die Konzentration, ab der eine Substanz qualitativ nachgewiesen werden kann. Bei einem Grenzwert von  $30 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  darf die Nachweisgrenze demnach nicht über  $3,0 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  liegen. Im europäischen Referenzverfahren nach DIN EN 13211 wird eine Nachweisgrenze von  $2,6 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  angegeben, sodass diese Bedingung nur sehr knapp eingehalten wird. Um die Belastbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen und die Einhaltung auch bei zukünftig ggf. sinkenden Grenzwerten nachweisen zu können, sind weitere Entwicklungen und ggf. neue Verfahren notwendig. Ein vielversprechendes Verfahren, das auf der Probenahme mit Quecksilberabsorbent, so genannten „Sorbent-Traps“, beruht, wird aktuell im VDZ auf seine Anwendbarkeit z. B. in der Zementindustrie untersucht.

In der Praxis werden Quecksilberemissionen in der Industrie kontinuierlich überwacht. Hierzu muss neben elementarem Quecksilber  $\text{Hg}(0)$  auch die oxidierte Form  $\text{Hg}(II)$  erfasst werden. Da die für die kontinuierliche Überwachung verfügbaren UV-Photometer Quecksilber nur in elementarer Form detektieren, ist eine gut funktionierende Reduktionseinheit notwendig, die regelmäßig und sorgfältig geprüft werden muss. Die Kalibrierung dieser Geräte nach DIN EN 14181 erfolgt unter Verwendung des europäischen Referenzverfahrens nach DIN EN 13211. Bei diesem Verfahren wird das Quecksilber in einer oxidierenden Absorptionslösung aufgefangen und anschließend mittels Kaltdampf-AAS (Atomabsorptionsspektrometrie) analysiert. Hierbei wird ein relativ kleines Teilvolumen der Absorptionslösung analysiert, sodass sehr geringe absolute Quecksilbergehalte detektiert werden müssen. Dadurch sind sehr niedrige Nachweis- und Bestimmungsgrenzen erforderlich, um die oben genannten Anforderungen zu erfüllen. Bei Verwendung der Sorbent-Traps wird das Quecksilber an iodierter Aktivkohle adsorbiert. Die Probenahme kann hierbei über kurze Zeiträume wie z. B. 30 min. erfolgen, aber auch Langzeitprobenahmen sollen mit dieser Methode möglich sein. Im Anschluss wird das gesamte Quecksilber thermisch desorbiert und direkt in einer AAS-Messzelle analysiert. Da nicht nur eine Teilprobe, sondern das gesamte Sorptionsmittel in der Analyse betrachtet wird, sind deutlich niedrigere Nachweisgrenzen in einer Größenordnung von  $0,02 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  zu erwarten. Die Anwendbarkeit des Verfahrens wird aktuell im Vergleich zu der Referenzmethode DIN EN 13211 untersucht. Es wird zudem auf europäischer Ebene an einer Technischen Spezifikation zum „Sorbent-Trap“-Verfahren gearbeitet. In den USA wird dieses Verfahren bereits als Referenzmethode für Quecksilberkalibrierungen (US EPA 30B) sowie als quasi-kontinuierliches Verfahren zur Überwachung niedriger Emissionsgrenzwerte (US EPA 12B) eingesetzt.

Die Sorbent-Traps bestehen aus mindestens zwei voneinander getrennten Schichten. Die erste Schicht dient zur Absorption des zu messenden Quecksilbers. Mit der zweiten Schicht wird nachgewiesen, dass das gesamte Quecksilber in der ersten Schicht sorbiert wurde und kein Durchbruch vorliegt. Zu Qualitätskontrollzwecken können Sorbent-Traps mit einer dritten Schicht verwendet werden, in der eine bekannte Konzentration an Quecksilber vorliegt, sodass einerseits die analytische Bestimmung geprüft und andererseits Verluste während der Probenahme ausgeschlossen werden können. Die Probenahme erfolgt parallel in zwei Sorbent-Traps, um eine Doppelbestimmung zu erreichen. Dies ist beispielhaft in **Bild 1.3.3-1** gezeigt.



**Bild 1.3.3-1** Aufbau der Sorbent-Trap-Röhrchen

Da die Analyseneinheit für Quecksilber mobil ist, kann das Verfahren – sofern keine kontinuierlich arbeitende Quecksilbermessung betrieben wird – auch vor Ort eingesetzt werden, sodass die Ergebnisse unmittelbar vorliegen. Dies ermöglicht auch Untersuchungen zu Prozessoptimierungen und deren Auswirkung auf die Emission von Quecksilber.

Erste Ergebnisse zum Vergleich des Referenzverfahrens und der Sorbent-Trap-Methode liegen bereits vor und sind in **Bild 1.3.3-2** dargestellt. Die Ergebnisse der beiden Methoden liegen in der gleichen Größenordnung, jedoch ist die Anzahl der Vergleichsmessungen noch sehr gering, sodass die Ergebnisse lediglich als Vorausschau zu verstehen sind. Weitere Vergleichsmessungen werden aktuell durchgeführt, um einen belastbaren Vergleich der Methoden zu erhalten.

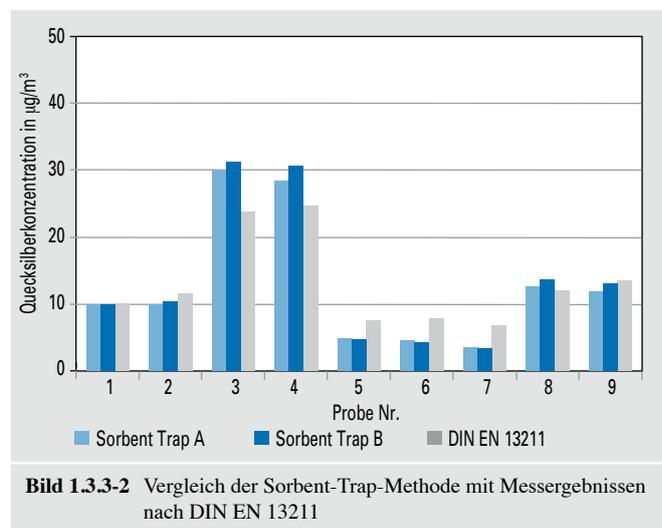
### 1.3.4 Verwertung von Abfällen ■

Mit der Substitution natürlicher Roh- und Brennstoffe durch geeignete alternative Materialien reduzieren die Zementwerke den Verbrauch natürlicher Rohstoffe und die Verbrennung fossiler Energieträger wie Öl und Kohle.

In Deutschland wurden im Jahr 2016 mehr als 65 % der insgesamt erforderlichen Brennstoffenergie durch geeignete alternative Brennstoffe substituiert. Das bedeutet, dass durch diese alternativen Brennstoffe heizwertäquivalent ein Einsatz von mehr als 2 Mio. t an Steinkohle zur Produktion des erforderlichen Zementklinkers vermieden werden konnte.

Im Jahr 2017 betrug die durchschnittliche in Europa erreichte Substitutionsrate für die Zementindustrie 41 %. Innerhalb der europäischen Länder gibt es allerdings noch deutliche Unterschiede. Während auf der einen Seite Länder wie Deutschland, Österreich oder Tschechien zeigen, dass es möglich ist, jährliche durchschnittliche Substitutionsraten von mehr als 60 % zu erreichen, gibt es auf der anderen Seite noch Mitgliedsstaaten der EU, in denen die Substitutionsraten deutlich unterhalb von 30 % der benötigten Brennstoffenergie liegen.

Das CEMBUREAU hatte im Jahr 2017 eine Studie in Auftrag gegeben, in der die Gründe für die unterschiedlichen Substitutionsraten untersucht wurden. Die Studie kommt zu dem interessanten Ergebnis, dass insbesondere diejenigen Länder, in denen noch überproportional viele Abfälle deponiert werden, nur eine niedrige Substitutionsrate im Bereich der Mitverbrennung aufwei-



**Bild 1.3.3-2** Vergleich der Sorbent-Trap-Methode mit Messergebnissen nach DIN EN 13211

sen. Deshalb ist es zu begrüßen, dass die europäische Kommission nun versucht, insbesondere den immer noch zu hohen Deponierungsquoten in einzelnen Mitgliedsländern den Kampf anzusagen.

In diesem Zusammenhang ist insbesondere der im Dezember 2015 von der Kommission veröffentlichte Aktionsplan für eine Kreislaufwirtschaft in Europa zu erwähnen. Darin macht die EU-Kommission ambitionierte Zielvorgaben. So ist beispielsweise vorgesehen, bis zum Jahr 2030 65 % der Siedlungsabfälle zu verwerten. Gleichzeitig sollen ebenfalls bis zum Jahr 2030 insgesamt 75 % der Verpackungsabfälle dem Recycling zugeführt werden. Weiterhin sollen bis zum Jahr 2030 nur noch maximal 10 % aller anfallenden Abfälle deponiert werden.

In einer Mitteilung zur Bedeutung der energetischen Nutzung von Abfällen in der Kreislaufwirtschaft hat die Europäische Kommission im Januar 2017 anerkannt, dass die energetische Verwertung im Klinkerbrennprozess eine besonders effiziente und hochwertige Nutzung der Abfälle ermöglicht. Die European Cement Research Academy (ECRA) hat gleichfalls im Jahr 2017 für das CEMBUREAU eine technische Studie erstellt mit deren Hilfe die jeweilige energetische Effizienz einzelner Anlagen berechnet werden kann. Die ECRA-Studie belegt, dass die Energieeffizienz in einer Größenordnung von 70 % und höher liegt. Dies bestätigt die zuvor von der europäischen Kommission getroffenen Aussagen.

Weiterhin ist es aus Sicht der europäischen Zementindustrie wichtig, dass die stoffliche Nutzung der Brennstoffaschen tatsächlich als Recycling anerkannt wird. Ein aktuell positives Beispiel hierfür ist die energetische Verwertung von Altreifen. Seit dem Jahr 2018 erkennt die französische Regierung für Altreifen, die in Klinkeröfen verwertet werden, eine Recyclingquote von 23,75 % an. Angesichts der hohen Bedeutung, die einer stofflichen Verwertung (Recycling) von Abfällen im europäischen Abfallrecht zukommt, sollte ein solcher Ansatz auch auf andere Abfälle ausgedehnt werden. So beinhalten aufbereitete hochkalorische Fraktionen aus Gewerbe- und Industrieabfällen üblicherweise ungefähr 10 % Ascheanteile, die gleichfalls stofflich verwertet werden. Bei anderen Ersatzbrennstoffen, wie beispielsweise Klärschlämmen, kann die stoffliche Nutzung sogar in einer Größenordnung von 40 % und mehr liegen.

### 1.3.5 Nachhaltiges Bauen ■

In einer nachhaltigen Entwicklung werden die Bedürfnisse der gegenwärtigen Generation zufriedengestellt, ohne die Lebenschancen künftiger Generationen zu gefährden. Diesem Leitbild folgt das Bauwesen, wenn funktionsgerechte Bauwerke mit geringen Kosten und geringen Belastungen für die Umwelt erstellt und dauerhaft genutzt werden.

#### Normung zum Nachhaltigen Bauen

Die europäische Normungsorganisation CEN hat in den letzten Jahren im Technischen Komitee CEN/TC 350 „Nachhaltigkeit von Bauwerken“ Normen zur Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken erarbeitet. Über die internationale Zusammenarbeit mit dem CEMBUREAU war der VDZ an der Entwicklung dieser Normen beteiligt.

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. Derzeit werden ergänzend zu den bereits veröffentlichten Normen für die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden auch entsprechende europäische Regelungen für Ingenieurbauwerke entwickelt. Ein so genanntes „Rahmendokument“ zur Nachhaltigkeitsbewertung von Ingenieurbauwerken wurde mit der Norm EN 15643-5 im Jahr 2017 veröffentlicht.

Eine wichtige vom CEN/TC 350 erarbeitete Norm ist die EN 15804. Diese Norm enthält Regelungen für die Erarbeitung von Ökobilanzen und Umweltproduktdeklarationen von Bauprodukten. Da die EN 15804 für alle Bauprodukte gilt, sind die Regelungen z. T. recht allgemein gehalten. Unter der Obmannschaft eines VDZ-Mitarbeiters wurde daher in einer Arbeitsgruppe des CEN/TC 51 („Zement und Baukalk“) die Norm EN 16908 „Zement und Baukalk Produktkategorieeregeln in Ergänzung zu EN 15804“ erarbeitet, die im Jahr 2017 veröffentlicht wurde. Diese Norm ergänzt die Regeln der EN 15804 um baustoffspezifische Regeln zur Ökobilanzierung von Zement und Baukalk. In ähnlicher Weise erfolgte in einer Arbeitsgruppe der CEN/TCs 104 („Beton und zugehörige Produkte“) und TC/229 („Vorgefertigte Betonzeugnisse“) die Erarbeitung der Norm EN 16757, die Produktkategorieeregeln für Beton und Betonelemente enthält. Auch diese Norm wurde im Jahr 2017 veröffentlicht.



**Bild 1.3.4-1** Altreifen zur Verwendung als alternativer Brenn- und Rohstoff

#### Umweltproduktdeklarationen

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). Für die Erstellung von EPDs gilt die o. g. Norm EN 15804. 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.

Da die Gültigkeit einer vom VDZ erarbeiteten EPD für einen Zement, dessen Zusammensetzung dem Mittelwert der in Deutschland hergestellten Zemente entspricht, Anfang 2017 endete, wurde auf Grundlage von umweltrelevanten Produktionsdaten der Mitgliedsunternehmen eine aktualisierte EPD erarbeitet, die bis Anfang 2022 gültig ist. Die überarbeitete EPD steht unter <https://vdz.info/q27el> zum Download bereit.

Die vorliegenden Umweltproduktdeklarationen für Betone verschiedener Festigkeitsklassen (herunterzuladen auf der Informationsplattform des InformationsZentrums Beton: <https://vdz.info/0rxvm>) sollen im Jahr 2018 durch den VDZ im Auftrag des Bundesverbands der Deutschen Transportbetonindustrie (BTB) und der Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau (fdb) aktualisiert werden. Die hierzu benötigten Daten werden vom BTB und der fdb ermittelt und dem VDZ zur Verfügung gestellt. Zur Berechnung der Ökobilanz eines durchschnittlichen Betons werden für jede betrachtete Druckfestigkeitsklasse zunächst Ökobilanzen für Transportbeton und für Fertigteilbeton für die jeweilige Festigkeitsklasse auf Grundlage der Produktionsdaten erstellt. Die Durchschnittsbildung wird anschließend, gewichtet nach Produktionsvolumen von Transportbeton und Fertigteilbeton, für die jeweilige Festigkeitsklasse erfolgen.



**Bild 1.3.5-1** EPD für Beton der Druckfestigkeitsklasse C 20/25



**Bild 1.3.5-2** Broschüre „Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton“

### Product Environmental Footprint

Mit dem Product Environmental Footprint (PEF) möchte die Europäische Kommission einen methodischen Ansatz etablieren, der es den Mitgliedstaaten und dem Privatsektor ermöglichen soll, die Umweltleistung von Produkten, Dienstleistungen und Unternehmen anhand einer umfassenden Bewertung der Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu beurteilen, darzustellen und schließlich auch zu benchmarken. In einem ersten Schritt haben mehr als 20 Produktgruppen im Zuge einer Pilotphase Regeln für eine Ökobilanzierung ihrer Produkte im Kontext des PEF entwickelt. Die europäische Zementindustrie war an dieser Pilotphase nicht beteiligt.

Aufgrund eines Mandats der Europäischen Kommission werden derzeit die im CEN/TC 350 entwickelten Normen mit dem Ziel überarbeitet, eine Angleichung an die Regeln des PEF zu erreichen. Dies beinhaltet insbesondere eine verpflichtende Bewertung der Umweltwirkungen, die mit dem Lebensende von Bauwerken und Bauprodukten, also mit dem Abbruch und gegebenenfalls mit Abfallverwertung, Recycling oder Deponierung verbunden sind. Des Weiteren sollen grundlegende Regeln festgelegt werden,

nach denen zu einem späteren Zeitpunkt ein Benchmarking von Bauprodukten stattfinden kann.

In einem ersten Schritt wurde die Norm EN 15804 ergänzt. Dem Mandat folgend sind gemäß der aktualisierten Regeln dieser Norm in Zukunft in Umweltproduktdeklarationen auch Abschätzungen für das Lebensende von Baustoffen auszuweisen. Im vorliegenden Normentwurf konnte für Zwischenprodukte wie Zement eine Ausnahme von dieser Regel erwirkt werden, sodass für Zement wie bisher nur die Lebenszyklusmodule „Von der Wiege bis zum Werkstor“ verpflichtend zu erklären sind. Gemäß dem Normentwurf kann in Zukunft die CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch die Carbonatisierung zementgebundener Baustoffe in Umweltproduktdeklarationen als negatives Treibhauspotenzial ausgewiesen werden.

Die CEN-Umfrage zur Ergänzung der EN 15804 ist für das zweite Quartal 2018 vorgesehen, die Veröffentlichung derzeit für Anfang 2019 geplant. Auch für weitere in CEN/TC 350 erarbeitete Normen ist für die nächsten Monate einer Überarbeitung geplant, um so dem Mandat der Europäischen Kommission zu folgen und die Normen an die Regeln des „PEF“ anzugleichen.

## 1.4 Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz

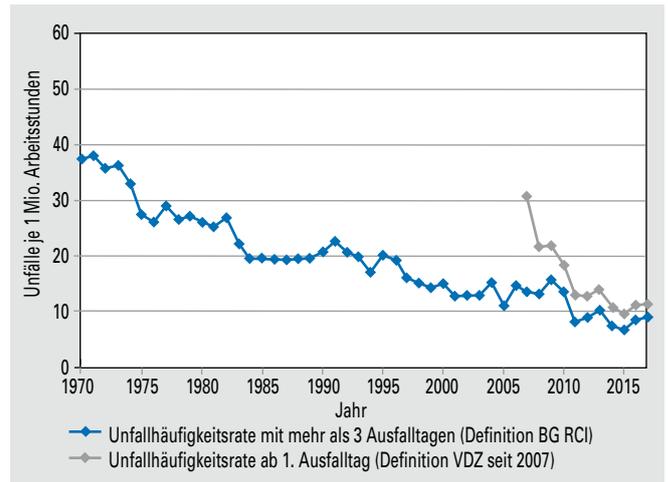
### 1.4.1 Arbeitssicherheit ■

#### Sicherheitsarbeit auf hohem Niveau

Die Verbesserung der Arbeitssicherheit in den Werken der Zementindustrie gehört zu den satzungsgemäßen Aufgaben des VDZ. Seit über 55 Jahren leistet der Arbeitskreis „Arbeitssicherheit“ hierfür einen wichtigen Beitrag. Zu seinen Aufgaben gehören neben der Analyse des Unfallgeschehens in den Mitgliedswerken und der Aufnahme der Unfallzahlen auch die Erarbeitung und Empfehlung von Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit. Diese werden, unterstützt durch die Sicherheits-Merkblätter und Sicherheits-Prüflisten, in den Werken umgesetzt. Gemeinsames Ziel ist einerseits die Einrichtung sicherer Arbeitsplätze und Arbeitsmittel und andererseits eine nachhaltige Stärkung des Sicherheitsbewusstseins der Mitarbeiter. Die Entwicklung der Unfallhäufigkeitsrate (= Unfälle je 1 Mio. verfahrens Arbeitsstunden) zeigt, dass die Sicherheitsarbeit der Werke zusammen mit dem VDZ zu einer kontinuierlichen Verbesserung über die Jahre geführt hat. Für das Berichtsjahr 2015 wurde der niedrigste Stand seit Beginn der Aufzeichnungen erfasst. **Bild 1.4.1-1** stellt den Verlauf der Unfallhäufigkeitsrate ab 1970 nach der Definition der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) dar und ab 2007 zusätzlich den Verlauf der verschärften Beurteilung für den VDZ-Sicherheitswettbewerb.

#### VDZ-Unfallstatistik

Seit 1965 werden die Zahlen der meldepflichtigen Betriebs- und Wegeunfälle in den deutschen Mitgliedswerken des VDZ jährlich erhoben, ausgewertet und in der Unfallstatistik zusammengefasst. Die wichtigsten Ergebnisse und Kennzahlen der Unfallstatistik aus den Jahren 2014 bis 2017 sind in **Tabelle 1.4.1-1** aufgeführt. Bis zum Jahr 2008 galt ein Werk solange als unfallfrei, wie ein Mitarbeiter nicht länger als drei Arbeitstage aufgrund einer Verletzung dem Betrieb fernblieb. Ab 2008 wurde dieses Kriterium verschärft, sodass ein Unfall bereits ab einem Ausfalltag in die



**Bild 1.4.1-1** Unfallhäufigkeitsrate für meldepflichtige Unfälle

Quelle: VDZ

Wertung mit einget. Dies bezieht sich auf den ersten Arbeitstag bzw. die erste geplante Schicht nach dem Unfallereignis. Dies entspricht der CSI-Definition des „Lost time incident“ (LTI).

Seit 2014 ist die erfasste Belegschaft in den Werken geringfügig gesunken (-5,7 %), was jedoch teilweise dadurch zu erklären ist, dass aktuell nur noch 46 statt 47 Werke betrachtet werden. Im Jahr 2015 fiel die Zahl der gemeldeten Unfälle von 94 im Vorjahr auf 80 ab, worauf diese in den Folgejahren jedoch wieder auf 95 im Jahr 2016 und 92 im Jahr 2017 anstieg. Dementsprechend hat sich auch die Unfallhäufigkeitsrate entwickelt. Diese lag im Jahr 2015 mit 9,45 Unfällen je 1 Mio. Arbeitsstunden auf dem bisher niedrigsten Wert, worauf diese 2016 auf 11,3 anstieg und mit 11,7 im Jahr 2017 nahezu konstant blieb. Einen ähnlichen Verlauf zeigen auch die Unfälle gemäß BG-Kriterium. Deren Anteile am Gesamtunfallgeschehen nahmen jedoch von 2014 bis 2017 kontinuierlich von 70 auf 80 % zu. Ein Rückschluss auf eine mögliche Zunahme der Schwere der Unfälle kann hierdurch jedoch nicht getroffen werden.

**Tabelle 1.4.1-1** Unfallkennzahlen für die Belegschaft im Betrieb der VDZ-Mitgliedswerke in den Jahren 2014 bis 2017

Jahr	2014	2015	2016	2017
Anzahl der erfassten Werke	47	46	46	46
Anzahl der Arbeitnehmer	5 562	5 315	5 276	5 263
Geleistete Arbeitsstunden	8 883 495	8 464 771	8 410 590	8 233 417
Betriebsunfälle gesamt (einschließlich nicht meldepflichtiger Betriebsunfälle)	94	80	95	92
Meldepflichtige Betriebsunfälle	66	57	72	75
Unfallhäufigkeitsrate (Definition bis 2007, Meldepflichtige Unfälle je 1 Mio. Arbeitsstunden)	7,4	6,7	8,6	9,1
Unfallhäufigkeitsrate (Definition ab 2008, Meldepflichtige Unfälle je 1 Mio. Arbeitsstunden)	10,6	9,5	11,3	11,2
Kalenderausfalltage durch Betriebsunfälle	2 419	2 367	2 260	2 577
Ausgefallene Arbeitstage je Arbeitnehmer	0,4	0,4	0,4	0,5
Kalenderausfalltage je Betriebsunfall	25,7	29,6	23,8	28,0
100-Mann-Quote (alte Definition, meldepflichtige Unfälle je 100 Arbeitnehmer)	1,2	1,1	1,4	1,4
100-Mann-Quote (neue Definition, meldepflichtige Unfälle je 100 Arbeitnehmer)	1,7	1,5	1,8	1,7

Quelle: VDZ



**Bild 1.4.1-2** Sieger des VDZ-Arbeitssicherheitswettbewerbes 2016

Die durchschnittliche Zahl an Kalenderausfalltagen je Unfallereignis lag zwischen 23,8 und 29,6. Im Vergleich zu den Vorjahren 2004 bis 2013 stellt dies eine Erhöhung von ca. 60 % dar. Die wirtschaftliche Bedeutung der Betriebsunfälle lässt sich dabei mithilfe des Jahresleistungsausfalls beurteilen. Diese Kennzahl gibt die durch Betriebsunfälle verursachten Kalenderausfalltage bezogen auf die Zahl der Mitarbeiter im Betrieb an. Der mittlere Jahresausfall hat sich dabei seit 2012 bei einem Wert von etwa 0,45 eingependelt. Ein weiteres Kriterium stellt die 100-Mann-Quote dar. Dies ist die Zahl der Betriebsunfälle bezogen auf 100 Mitar-

beiter im Betrieb. Nach den neuen Kriterien hat sich diese nach einer stärkeren Abnahme im Zeitraum von 2011 bis 2013 auf etwa 2,1 Unfälle pro 100 Mitarbeiter und zwischen 2014 und 2017 bei etwa 1,7 eingependelt.

**Bild 1.4.1-2** zeigt die Preisträger des VDZ-Arbeitssicherheitswettbewerbes 2016 nach der Verleihung im September 2017. Die Auszeichnung, die seit über 30 Jahren vom VDZ vergeben wird, besteht für Klinkerwerke aus einer Tafel mit dem Symbol für Arbeitssicherheit des VDZ und der Aufschrift „Sicher arbeiten VDZ“. Sie ist Ausdruck der Anerkennung der Bemühungen von Leitung und Belegschaft des Werkes um die Arbeitssicherheit. Für das Jahr 2017 wurden neun Klinkerwerke und acht Mahlwerke für unfallfreie Arbeit ausgezeichnet.

#### VDZ-Sicherheitsmerkbblätter

Zur Förderung der Arbeitssicherheit werden pro Jahr drei Sicherheits-Merkblätter mit der Beschreibung besonders bemerkenswerter Unfälle oder Thematiken sowie drei Sicherheits-Prüflisten für die Überprüfung von Sicherheitseinrichtungen und Maßnahmen in verschiedenen Arbeitsbereichen veröffentlicht. Die Dokumente dienen als Arbeitshilfe für die Praxis und werden von Sicherheitsfachkräften und Industriemeistern eingesetzt. Auf diese Weise werden die Mitarbeiter kontinuierlich auf verschiedenste Gefahren hingewiesen. Zu den Themen der vergangenen Jahre zählten u.a. die sichere Begehung von Kugelmühlen, Arbeiten in Höhen, Absturz einer Plattform bei Trennarbeiten, Mehlschuss und Gefahr des Einziehens bei Förderbändern. Zudem wurde das Merkblatt Nr. 100 zur Ladungssicherung aktualisiert.

#### VISION ZERO

Im Rahmen der 112. Sitzung des VDZ-Arbeitskreises Arbeitssicherheit am 26. April 2017 wurde die neue Kooperationsvereinbarung „VISION ZERO. Null Unfälle – gesund arbeiten!“ zwischen dem Verein Deutscher Zementwerke e.V.

(VDZ) und der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) unterzeichnet. Ziel ist es, zusammen mit den Mitgliedern des VDZ die Arbeitssicherheit in den Zementwerken durch zusätzliche Präventionsmaßnahmen noch weiter zu steigern und so das Ziel „Null Unfälle“ zu erreichen.



**Bild 1.4.1-3** Helmut Ehnes (BG RCI, links) und Kai Wagner (Leiter Arbeitskreis Arbeitssicherheit des VDZ, rechts) nach Unterzeichnung der Vision-Zero-Kooperationsvereinbarung

Dabei kann der VDZ bereits auf eine lange und enge Zusammenarbeit mit der BG RCI zurückblicken. Die Entwicklung der Unfallzahlen zeigt, dass kontinuierlich am Umgang mit Gefahren und dem Verhalten am Arbeitsplatz gearbeitet wird. Die Motivation der Mitarbeiter und besonders des Führungspersonals spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund führt der VDZ in Zusammenarbeit mit der BG RCI seit 1993 regelmäßig Seminare für Meister und Vorarbeiter durch. Die Seminare dauern jeweils zwei Tage und werden in Gruppen zu 15 bis 20 Teilnehmern außerhalb der Betriebe von Seminarleitern der BG organisiert und durchgeführt.

Während in den vergangenen Jahren schwerpunktmäßig zementspezifische Themen wie der Umgang mit Heißmehl und der Einsatz alternativer Brennstoffe im Vordergrund standen, wurden ab dem Jahr 2015 neue Impulse gegeben. Die neuen Inhalte basieren auf einer Ausbildungsserie des Bundesverbandes Mineralische Rohstoffe e. V. (MIRO). Im Besonderen werden die Themen Instandhaltung, plötzliche Störungen und Arbeitsorganisation behandelt. Weitere Inhalte stellen die Gesundheit des Rückens und die arbeitsmedizinische Versorgung dar.

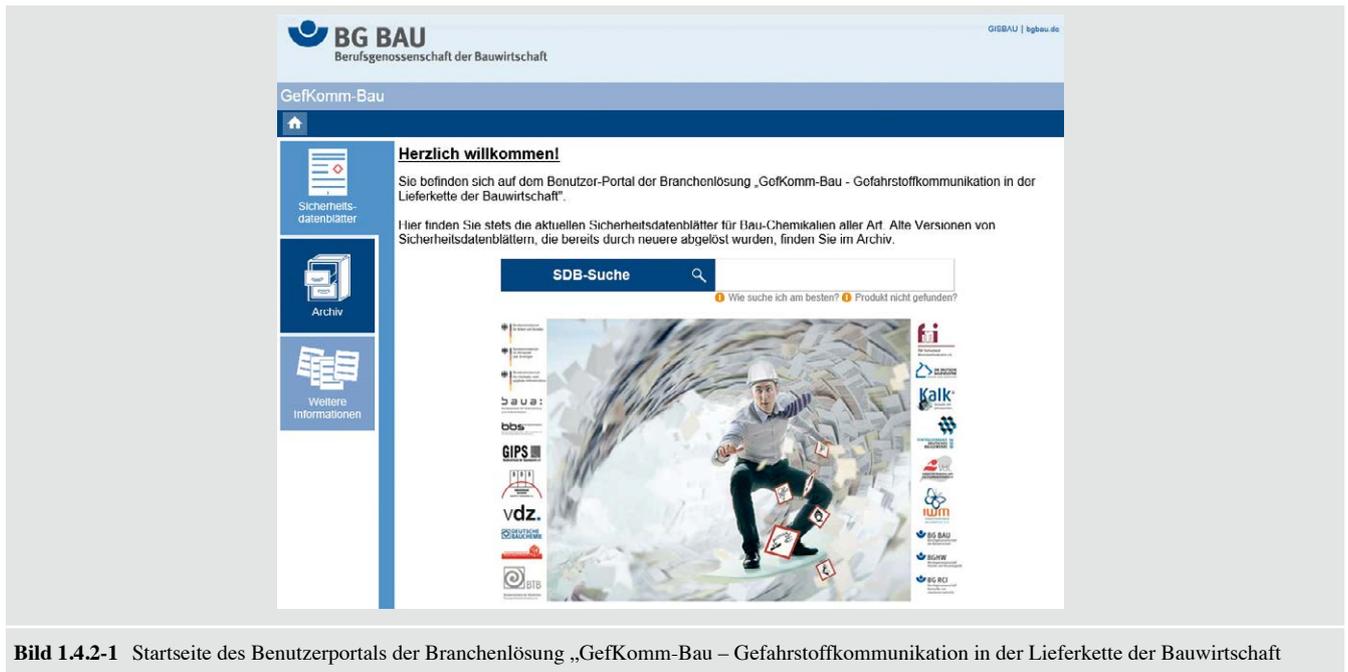


Bild 1.4.2-1 Startseite des Benutzerportals der Branchenlösung „GefKomm-Bau – Gefahrstoffkommunikation in der Lieferkette der Bauwirtschaft

## 1.4.2 Produktbezogener Arbeits- und Gesundheitsschutz ■

### Einstufung und Kennzeichnung

Seit 1. Juni 2015 sind alle Stoffe und Gemische allein nach der CLP-(Classification, Labelling and Packaging)-Verordnung einzustufen und zu kennzeichnen. Die Umsetzung für Zemente und andere zementhaltige Produkte erfolgte gemäß der mit der CEM-BUREAU-Arbeitsgruppe „TF REACH, CLP & SDS“ europäisch abgestimmten Vorgabe.

### GefKomm Bau

Zur Gefahrstoff-Kommunikation in der Lieferkette der Bauwirtschaft, insbesondere zur einfachen Übermittlung von Sicherheitsdatenblättern, gibt es seit Anfang 2016 eine neue Vorgehensweise. Auf einen zentralen Branchenpool für Sicherheitsdatenblätter aller gefahrstoffhaltigen Baustoffe, der bei der BG Bau angesiedelt ist, haben alle beteiligten Akteure jederzeit Zugriff und können gezielt die Informationen abrufen, die vor Ort in den Betrieben benötigt werden. Für die Betriebe der Bauwirtschaft ist der Branchenpool eine wertvolle Unterstützung, da die Sicherheitsdatenblätter der verwendeten Produkte dann nicht mehr im eigenen Betrieb wie gesetzlich vorgeschrieben zehn Jahre aufbewahrt werden müssen. Der VDZ und seine Mitgliedsunternehmen beteiligen sich aktiv an dieser Branchenlösung.

### Meldung an Giftinformationszentren

Bei Vergiftungs- und Vergiftungsverdachtsfällen ist eine schnelle und unkomplizierte medizinische Notfallberatung erforderlich. Hierzu bedarf es der Kenntnis der Inhaltsstoffe von Produkten. Durch den 2017 verabschiedeten neuen Anhang VIII zur CLP-Verordnung soll die hierfür erforderliche Vorgehensweise europaweit vereinheitlicht werden und sich Vereinfachungen für die zuständigen Behörden und Unternehmen ergeben. Die neuen Regelungen treten ab 2020 in Kraft und gelten für alle Gemische, die aufgrund gesundgefährdender oder physikalischer Eigenschaften als gefährlich eingestuft sind. Damit gelten sie auch für Zemente und andere zementhaltige Produkte. Den zentralen nationalen Stellen, in Deutschland ist dies das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), sind von den Herstellern zahlreiche Informationen zu ihren

Produkten zu übermitteln. Hierzu gehören viele der im Sicherheitsdatenblatt enthaltenden Angaben sowie eine relativ genaue Angabe zur stofflichen Zusammensetzung und eine so genannte Identifizierungsnummer, die UFI. Schon bei kleinen Änderungen in der Zusammensetzung ist jedoch die UFI zu erneuern und eine Neumeldung beim BfR vorzunehmen.

Da es bei Zementen und erst recht bei Mörtel und Betonen häufig zu Änderungen in der Zusammensetzung kommt, würde die Umsetzung der neuen Regelung bei den betroffenen Industrien zu einem unnötigen bürokratischen Aufwand führen, ohne in der Sache selbst einen Mehrwert zu generieren. Daher versucht die europäische Zementindustrie, gemeinsam mit anderen Industrien, bei den zuständigen Gremien in Brüssel noch vor 2020 Vereinfachungen für die erforderlichen Abläufe zu erzielen.

### Quarzfeinstaub

2016 und 2018 fanden die alle zwei Jahre erforderlichen Berichterstattungen zum europäischen Sozialübereinkommen „Quarzfeinstaub“ statt, bei dem es um einen verbesserten Gesundheitsschutz für Arbeitnehmer geht, die Umgang mit Quarzfeinstaub oder quarzfeinstaubhaltigen Produkten haben. Mit der Berichterstattung wird die Umsetzung der im Übereinkommen vereinbarten Maßnahmen in den Unternehmen verfolgt. Die Beteiligungsquote der europäischen und damit auch der deutschen Zementindustrie war vorbildlich.

Allerdings beschäftigt das Thema Quarzfeinstaub auch darüber hinaus die Branchen, bei denen Arbeitnehmer mit Quarz in Kontakt kommen können. Zum einen wurde Quarz in Form von „Arbeiten mit Exposition gegenüber im Arbeitsprozess erzeugtem Quarzfeinstaub“ und einem zugehörigen Arbeitsplatzgrenzwert von  $0,1 \text{ mg/m}^3$  für alveolengängigen Quarzstaub (Quarzfeinstaub) in die europäische Krebsrichtlinie (CMD) aufgenommen. Für die Umsetzung der Krebsrichtlinie in nationales Recht haben die EU-Mitgliedstaaten bis Anfang 2020 Zeit. Es bleibt abzuwarten, wie der Grenzwert in Deutschland ausfallen wird. Vermutlich wird er sich an dem 2016 neu definierten Beurteilungsmaßstab für Quarzfeinstaub von  $0,05 \text{ mg/m}^3$  orientieren und damit unter dem europäischen Grenzwert liegen, der als Mindestwert gilt.

## 1.5 Personalentwicklung und Qualifizierung

### 1.5.1 Kurse und Lehrgänge des VDZ ■

Die Qualifizierung und Weiterbildung der Mitarbeiter gehören zu den Kernaufgaben des VDZ. Das Angebot erstreckt sich von der Schulung technischer Grundlagen über die Vermittlung von speziellem Fachwissen bis hin zu langfristigen Weiterbildungskursen für Führungskräfte. Dabei gewährleisten der Austausch im VDZ-Arbeitskreis Personalentwicklung und die Zusammenarbeit mit den Werken ein effizientes und praxisnahes Lernen mit aktuellen Inhalten.

#### Industriemeister-Lehrgang (IML)

Seit rund 60 Jahren führt der VDZ in Zusammenarbeit mit dem Bundesverband der deutschen Kalkindustrie e. V. den Industriemeisterlehrgang Kalk/Zement (IML) durch. In den Meisterlehrgängen konnten bisher insgesamt 643 Meister ausgebildet werden. Die 23 Teilnehmer des 27. Lehrgangs, 21 aus der Zementindustrie und zwei aus der Kalkindustrie, konnten im März 2017 ihren Meisterbrief in Empfang nehmen, nachdem sie zuvor ihr Können vor dem Prüfungsausschuss der Industrie- und Handelskammer zu Düsseldorf unter Beweis gestellt hatten (**Bild 1.5.1-1**). Der 28. Industriemeisterlehrgang hat im März 2018 mit 15 Personen begonnen.

In insgesamt 28 Unterrichtsfächern mit ca. 860 Unterrichtsstunden müssen die Industriemeisteranwärter ihr theoretisches Rüstzeug für die spätere Tätigkeit im Zement- bzw. Kalkwerk erlernen. In der insgesamt 18-monatigen Weiterbildungsmaßnahme erlernen die Teilnehmer nicht nur die theoretischen Grundlagen der Kalk- und Zementherstellung. Sie 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 Anwärter als Team funktionieren und sich gegenseitig unterstützen. Während der Präsenzphasen werden zunächst die Grundlagenfächer Mathematik, Physik, Chemie und stoffkundliche Grundlagen unterrichtet. Unterbrochen von zwei 4- und 6-monatigen Fernlehrgängen in den heimischen Werken werden die Anwärter anschließend schwerpunktmäßig in den spezifischen Fächern geschult. Ein weiterer Schwerpunkt der Ausbildung liegt in den Fächern Arbeitssicherheit und Verhalten im Betrieb. Letztendlich wird die anerkannte Weiterbildungsmaßnahme durch den Erwerb der Ausbildereignung (AEVO) abgerundet. Nach erfolgreicher Prüfung sind die Meister dazu befähigt, Mitarbeiter auszubilden.

#### Produktionssteuerer-Lehrgang (PSL)

Die zunehmende Komplexität der verfahrenstechnischen Anlagen in Verbindung mit den hohen Anforderungen an die Umweltvorsorge, die Arbeitssicherheit und einen effizienten Betrieb erfordern auch von den Leitstandfahrern moderner Drehofen- und Mahlanlagen exzellente Fachkenntnisse und vernetztes Denken. Um den kontinuierlich gestiegenen Anforderungen gerecht zu werden, führt der VDZ seit den 1990er-Jahren sehr erfolgreich die so genannten Produktionssteuerer-Lehrgänge (PSL) durch. Bis 2017 wurden in insgesamt 23 Lehrgängen 453 Personen zu Produktionssteuerern Zement weitergebildet (**Bild 1.5.1-2**). Die Maßnahme umfasst einen theoretischen Teil, der im Rahmen eines siebenwöchigen Präsenzunterrichts angeboten wird, sowie einen praktischen Teil, der im Zementwerk zu absolvieren ist. Ziel ist es, dem Leitstandpersonal den aktuellen Kenntnisstand in der



**Bild 1.5.1-1** Teilnehmer des 27. Industriemeister-Lehrgangs Kalk/Zement



**Bild 1.5.1-2** Teilnehmer des 23. Produktionssteuerer-Lehrgangs

Verfahrens- und Umwelttechnik der Zementherstellung sowie die Anforderungen an einen effizienten, sicheren und störungsfreien Betrieb zu vermitteln. Den Teilnehmern wird ein tiefes Verständnis in den Fächern Stoffkunde, Brenntechnik, Umwelttechnik, Aufbereitungstechnik, Mess- und Regelungstechnik sowie den naturwissenschaftlichen Grundlagenfächern 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 von der Inbetriebnahme einzelner Aggregate und der gesamten Anlage bis hin zur Diagnose komplizierter Störungen werden die Teilnehmer ausgiebig geschult. Neben den Fachthemen sind aber auch der praktische Erfahrungsaustausch und das Arbeiten in der Gruppe Bestandteile des Kurses.

#### Seminare und Workshops

Seit 1998 bietet der VDZ im Rahmen seines Weiterbildungsangebots eine Reihe von ein- und mehrtägigen Seminaren an. Neben Themen zur Verfahrenstechnik der Zementherstellung, der chemischen Analytik, dem Immissions- und Umweltschutz und der Überwachung der Zementqualität werden auch Seminare zu betontechnologischen Themen sowie zur VDZ-Lernplattform angeboten. Die Seminare des VDZ wenden sich sowohl an Neueinsteiger als auch an erfahrene Mitarbeiter der Steine-und-Erden- und der Zulieferindustrie.

Insgesamt wurden vom VDZ-Weiterbildungswerk seit 2015 im Schnitt 24 Seminare pro Jahr mit jeweils wechselnden Schwer-

**Tabelle 1.5.1-1** Themenauswahl aus den Weiterbildungsangeboten des VDZ 2018/2019

Zementproduktion
Grundlagen der Rohmaterialgewinnung
Grundlagen der Zementchemie
Grundlagen der Zementproduktion und -verwendung
Installation von Feuerfestmaterialien
Moderne Instandhaltungssysteme und Anwendungen
Moderne Ofen- und Brenntechnik
Neues für Industriemeister und Produktionssteuerer
Praxisseminar Waagen und Dosiertechnik
Verschleiß von Feuerfestmaterialien
Zement und Beton für Nicht-Techniker
Zementherstellung für junge Ingenieure
Zerkleinerungs- und Mahltechnik
Mitarbeiterführung
Führen von Kritikgesprächen
Führen von Mitarbeitergesprächen
Umgang mit schwierigen Mitarbeitern
Qualitätssicherung
Güteüberwachung nach DIN EN 196
Interne Auditoren
Lichtmikroskopie an Zement und Hüttensand
Röntgenbeugungsanalyse (RBA)
Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)
Praxisseminar repräsentative Analysenergebnisse
Umweltschutz
Emissionsminderung für Leitstandfahrer
Fachseminare Immissionsschutz
Fortbildung für Immissionsschutzbeauftragte
Betontechnik
Dauerhaftigkeit von Beton
Praxisseminar Mahlbetrieb und Produkteigenschaften

**Tabelle 1.5.2-2** Übersicht der Themen der VDZ-Onlinekurse zur Betontechnologie (derzeit nur in Deutsch verfügbar)

Nr.	Thema
BE 0.1	Zement und Beton im Wandel der Zeit
BE 0.2	Ausgangsstoffe für Beton
BE 0.3	Entwurfsgrundlagen für Beton
BE 0.4	Betonentwurf
BE 0.5	Gesteinskörnungen
BE 0.6	Nachbehandlung
BE 1.1	Frischbetoneigenschaften und -prüfung
BE 1.2	Festigkeit und Verformung
BE 1.3	Betongefüge und Dichtigkeit
BE 1.4	Dauerhaftigkeit von Beton
BE 2.1	Normung und Bestandteile
BE 2.2	Zementeigenschaften/Prüfverfahren
BE 2.3	Grundlagen Zementchemie
BE 3.1	Betonverflüssiger und Fließmittel
BE 3.2	Luftporenbildner
BE 4.1	SVB
BE 4.2	Sichtbeton
BE 4.3	Recycling im Betonbau

punkten angeboten. Seit 2015 haben sich die Teilnehmerzahlen weiterhin positiv entwickelt. Das jeweils aktuelle Kursangebot wird sowohl in Form einer Broschüre als auch über das Internet unter [www.vdz-online.de/weiterbildung](http://www.vdz-online.de/weiterbildung) bekannt gemacht. Über die Internetseite besteht zudem die Möglichkeit der Onlineanmeldung; auch ein Newsletter, der drei- bis viermal jährlich über die jeweils nächsten Seminare des VDZ informiert (**Tabelle 1.5.1-1**), kann dort abonniert werden.

### Inhouse Training

Darüber hinaus bietet das VDZ-Bildungswerk maßgeschneiderte Trainingseinheiten durch Mitarbeiter des VDZ vor Ort an. Sie ermöglichen eine individuelle Qualifizierung und Weiterbildung der Schulungsteilnehmer.

Die Experten des VDZ gewährleisten die Schulung in der vollen Bandbreite von chemischen Grundsatzfragen über die Prozesstechnologie bis hin zur Anlagenoptimierung. Für ein erfolgreiches Training wird hier jedem Schulungsteilnehmer eine individuelle Unterstützung geboten.



## 1.6 Güteüberwachung und Zertifizierung

### 1.6.1 Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle ■

Bauprodukte können sich unmittelbar auf die Festigkeit und damit die Sicherheit von Gebäuden und anderen Bauwerken auswirken. Deshalb existieren seit Langem detaillierte Anforderungen an Bauprodukte und deren Überwachung. Beispielsweise wurde in Deutschland bereits im Jahr 1879 eine erste Norm für Zement in Kraft gesetzt.

Die Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Zement und zementartigen Bindemitteln gehören zu den traditionellen Kernaufgaben des VDZ. Er trägt damit zur Erfüllung der Schutzziele entsprechender Regelwerke für Bauprodukte bei. Innerhalb des VDZ ist die Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle) für diese Aufgaben zuständig. Die Ergebnisse der Fremdüberwachung werden zweimal jährlich im Fachausschuss der Überwachungsgemeinschaft des VDZ beraten.

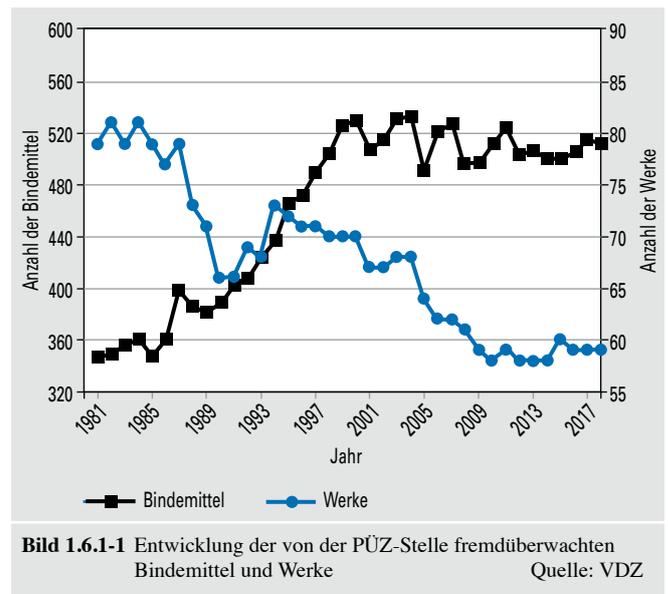
Bauprodukte nach Bauproduktenverordnung (BauPVO) dürfen in der Europäischen Union (EU) nur mit einem gültigen CE-Zeichen gehandelt werden. Für viele Bauprodukte, die nicht der BauPVO unterliegen, ist in Deutschland die Kennzeichnung mit dem Ü-Zeichen verpflichtend. In einigen anderen Ländern werden privatrechtliche Zeichen verwendet, z. B. das BENOR-Zeichen in Belgien, das Dancert-Zeichen in Dänemark, das KOMO-Zeichen in den Niederlanden und das NF-Zeichen in Frankreich. In all diesen Fällen ist die Durchführung so genannter Konformitätsbewertungsverfahren vorgeschrieben, durch die die Sicherheit und der Gesundheitsschutz bei der Verwendung der Produkte und die Sicherheit der Bauwerke gewährleistet werden sollen. Für die meisten der von der PÜZ-Stelle überwachten Bauprodukte sehen die entsprechenden Regelwerke Erstprüfungen, die Besichtigung des Herstellwerks, die Prüfung der werkseigenen Produktionskontrolle sowie die Beurteilung der Ergebnisse dieser Prüfungen vor. Anschließend ist eine regelmäßige Überwachung der Produkte, der werkseigenen Produktionskontrolle und der Herstellwerke durch eine unabhängige Stelle vorgesehen. Diese stellt, wenn alle Anforderungen erfüllt sind, entsprechende Zertifikate aus.

#### Anerkennung und Akkreditierung

Die PÜZ-Stelle des VDZ ist durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAKKS) nach DIN EN ISO/IEC 17025 (Prüflabor) und DIN EN ISO/IEC 17065 (Zertifizierungsstelle) akkreditiert. Außerdem ist sie durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBT) als zuständige Bauaufsichtsbehörde nach BauPVO notifiziert und national nach Landesbauordnung (LBO) anerkannt. Die Notifizierung und Anerkennung beziehen sich insbesondere auf Zemente und zementartige Bindemittel. Weiterhin gilt die Anerkennung für Betonzusatzstoffe und -mittel, Gesteinskörnungen sowie zementhaltige Zubereitungen (z. B. Mauermörtel), sowohl für genormte als auch für bauaufsichtlich zugelassene Produkte.

#### Fremdüberwachung von Zement nach gesetzlichen Regelwerken

Im Jahr 2017 hat die PÜZ-Stelle 514 Bindemittel aus 59 Zementwerken im In- und Ausland nach gesetzlichen Regelwerken überwacht. Hierin enthalten waren 477 Zemente. Für 128 Zemente wurden Mehrfachzertifikate für identische Zemente mit verschiedenen Zusatzeigenschaften ausgestellt.



**Bild 1.6.1-1** Entwicklung der von der PÜZ-Stelle fremdüberwachten Bindemittel und Werke  
Quelle: VDZ

Die Anzahl der überwachten Bindemittel und Werke ist in den letzten Jahren nahezu unverändert geblieben (**Bild 1.6.1-1**). Die mittlere Anzahl der überwachten Bindemittel pro Werk nahm bis zum Jahr 2009 zu und liegt seitdem bei Werten zwischen 8,4 und 9 Bindemitteln pro Werk (**Bild 1.6.1-2**).

Außerdem wurden im Jahr 2017 auch 46 Zemente mit Verwendungsgenehmigung für Betonfahrbahnen, 15 Putz- und Mauerbinder nach EN 413-1 sowie 22 hydraulische Tragschichtbinder nach EN 13282-1 überwacht.

Die Anzahl der überwachten Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 hat sich verringert und die der Festigkeitsklassen 42,5 und 52,5 erhöht. 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.

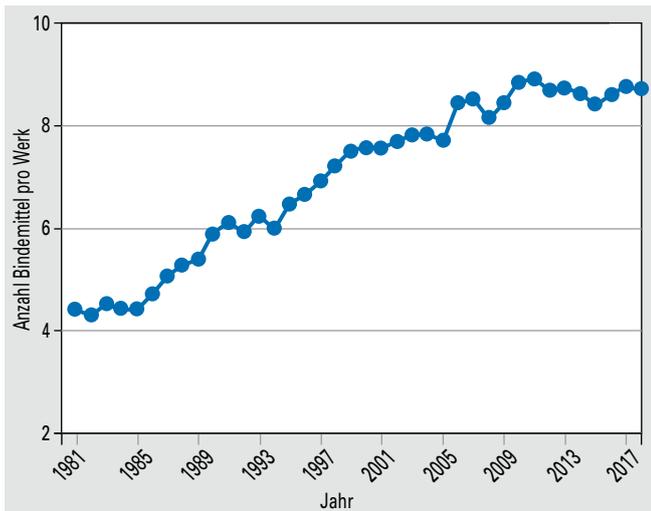
#### Fremdüberwachung von Zement nach freiwilligen Regelwerken

Zwischen der PÜZ-Stelle des VDZ und den entsprechenden belgischen, dänischen, französischen und niederländischen Stellen bestehen seit vielen Jahren bilaterale Vereinbarungen über die gegenseitige Anerkennung von Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungstätigkeiten. Dies umfasst Fremdüberwachungen nach privatrechtlichen, 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. Dadurch lässt sich der Zusatzaufwand für die Zementhersteller deutlich reduzieren.

Im Jahr 2017 wurden von der PÜZ-Stelle 60 Zemente nach belgischen Regelwerken (BENOR), zwölf Zemente nach dänischen Regelwerken (Dancert), 48 Zemente nach französischem Règlement (NF) und 125 Zemente nach niederländischen Beurteilungskriterien (KOMO) überwacht.

#### Weitere Bauprodukte

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



**Bild 1.6.1-2** Mittlere Anzahl überwachter Bindemittel je PÜZ-überwachtem Werk  
Quelle: VDZ

dadurch mittlerweile auch zahlreiche weitere Bauprodukte. Beispielsweise wird die werkseigene Produktionskontrolle verschiedener Pigmenthersteller nach der Norm EN 12878 überwacht und zertifiziert. Außerdem zertifiziert die PÜZ-Stelle Hüttensandmehle nach EN 15167-1 sowie Flugaschen nach EN 450-1.

### Vergleichsprüfungen

Die Akkreditierung der VDZ-Prüflaboratorien nach DIN EN ISO/IEC 17025 fordert, dass Labore an Vergleichsprüfungen teilnehmen. Die PÜZ-Stelle beteiligt sich seit vielen Jahren regelmäßig an verschiedenen Ringversuchen. 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 der VDZ an der jährlich durchgeführten Zement-Vergleichsprüfung der Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques (ATILH) teil, an der sich regelmäßig fast 200 Prüflaboratorien aus über 30 Ländern beteiligen. Zusätzlich zu diesen internationalen Ringversuchen wurden auch auf nationaler Ebene Vergleichsversuche an Zement und anderen Baustoffen wie z. B. Flugasche durchgeführt.

### Prüflabor

Im Zusammenhang mit Fremdüberwachungsprüfungen sowie zugehörigen Auftrags- und Vergleichsprüfungen werden jährlich rund 3 800 Bindemittelproben in den VDZ-Prüflaboren geprüft.

Bei durchschnittlich zwölf zu prüfenden Eigenschaften entspricht das über 45 000 Prüfungen. Dieser hohe Probendurchsatz erfordert effiziente 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 regelmäßige Schulungen erzielt. Über Vergleichsprü-

fungen sowie durch die Akkreditierung wird die Kompetenz der Prüflabore ständig nachgewiesen.

## 1.6.2 Qualitätssicherung von Zement und Bindemitteln ■

Normalzemente, die mit dem CE-Zeichen gekennzeichnet sind, dürfen 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/TR 14245 Leitlinien für die Anwendung der EN 197-2. Außerdem hat die europäische Sektorgruppe SG 02 der notifizierten Stellen (Notified Bodies) verschiedene Positionspapiere mit zusätzlichen Hinweisen erarbeitet. Der CEN-Bericht, in deutscher Version als DIN SPEC 18098 (vormals DIN-Fachbericht 197) veröffentlicht, und die Positionspapiere ermöglichen eine einheitliche Anwendung der Überwachungsnorm durch die notifizierten Stellen in Europa.

### Konformitätsnachweis nach EU-Bauproduktenverordnung

Die Konformitätsbewertungsverfahren für die verschiedenen Bauprodukte werden durch die EU-Kommission festgelegt und durch die europäische Normungsorganisation CEN in harmonisierten Normen ausgestaltet. In der Bauproduktenverordnung sind vier Systeme der Konformitätsbescheinigung definiert (**Tabelle 1.6.2-1**). 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.

Bei System 4 ist keine Aufgabe für eine anerkannte Stelle vorgesehen. Hier reicht es aus, dass der Hersteller die Bewertung der Leistung des Bauprodukts (Erstprüfung) und eine werkseigene Produktionskontrolle durchführt. Im System 3 muss eine Prüfstelle die Erstprüfung des Produkts vornehmen. Das strengere System 2+ ist beispielsweise für hydraulische Tragschichtbinder anzuwenden. Neben der Erstinspektion des Werks und der werkseigenen Produktionskontrolle ist die notifizierte Stelle hierbei auch zuständig für die kontinuierliche Überwachung, Bewertung und Evaluierung der werkseigenen Produktionskontrolle. Regelmäßige Fremdüberwachungsprüfungen sind bei einer Produktzertifizierung nach dem System 1+ vorgeschrieben. Dies wird nur für wenige Baustoffe gefordert, beispielsweise für Normalzemente, Zemente mit besonderen Eigenschaften und Sonderbindemittel, da diese Bauprodukte eine besonders hohe Bedeutung für die Sicherheit und Dauerhaftigkeit von Bauwerken haben.

Die Bauproduktenverordnung enthält im Unterschied zu vielen anderen entsprechenden europäischen Richtlinien und Verordnungen keine direkten Produktnormen. Hierzu dienen vielmehr europäisch harmonisierte Produktnormen sowie europäische technische Bewertungen (ETAs), in denen die erforderlichen Nachweise des Herstellers einschließlich durchzuführender Prüfungen mit Prüfhäufigkeiten und -verfahren festgelegt sind. 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 Hüttensand.

### Marktüberwachung

Die europäische Verordnung über die Vorschriften für die Akkreditierung und Marktüberwachung verpflichtet die EU-Mitglieds-

**Tabelle 1.6.2-1** Systeme zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit nach Anhang V der Bauproduktenverordnung

System	Aufgaben des Herstellers	Aufgaben der notifizierten Stelle	Bauprodukte
1+	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Werkseigene Produktionskontrolle WPK</li> <li>- Prüfung von Proben nach festgelegtem Prüfplan</li> </ul>	<p><b>Produkt-Zertifizierung</b> auf Basis einer</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erstinspektion des Werks und der werkseigenen Produktionskontrolle</li> <li>- Bewertung der Leistung des Bauprodukts (Erstprüfung)</li> <li>- kontinuierlichen Überwachung, Bewertung und Evaluierung der werkseigenen Produktionskontrolle</li> <li>- Stichprobenprüfung</li> </ul>	Zement <sup>1)</sup>
1			- Wie System 1 + aber ohne Stichprobenprüfung
2+	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bewertung der Leistung des Bauprodukts (Erstprüfung)</li> <li>- Werkseigene Produktionskontrolle</li> <li>- Prüfung von Proben nach festgelegtem Prüfplan</li> </ul>	<p><b>Zertifizierung der werkseigenen Produktionskontrolle</b> auf Basis einer</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erstinspektion des Werks und der werkseigenen Produktionskontrolle</li> <li>- kontinuierlichen Überwachung, Bewertung und Evaluierung der werkseigenen Produktionskontrolle</li> </ul>	Hüttensandmehl
			Flugasche
			Silicastaub
			Zusatzmittel
			Hydraulischer Tragschichtbinder
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Werkseigene Produktionskontrolle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Feststellung der Leistung des Produkts (Erstprüfung)</li> </ul>	Gesteinskörnungen <sup>2)</sup>
			Pigmente
			Baukalk
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bewertung der Leistung des Bauprodukts (Erstprüfung)</li> <li>- Werkseigene Produktionskontrolle</li> </ul>	-	Mauermörtel <sup>3)</sup>
			Mauermörtel <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Normalzement nach EN 197-1, Sonderzement mit sehr niedriger Hydratationswärme nach EN 14216, Tonerdezement nach EN 14647, Sulfathüttenzement nach EN 15743  
<sup>2)</sup> bei hohen Sicherheitsanforderungen System 2+, sonst System 4  
<sup>3)</sup> Mauermörtel nach Eignungsprüfung System 2+, Mauermörtel nach Rezept System 4

der zu einer 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 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 nach Bauproduktenverordnung 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 schreibt die Bauproduktenverordnung eine regelmäßige Beteiligung notifizierter Stellen an einem Erfahrungsaustausch als wesentliche Voraussetzung für die Anerkennung vor. Entsprechend den Vorgaben der EU-Kommission organisieren die notifizierten Stellen ihre Zusammenarbeit 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 des VDZ beteiligt sich regelmäßig an dem Erfahrungsaustausch sowohl innerhalb der relevanten europäischen als auch der nationalen Gremien. Hierbei hat sie u.a. maßgeblich an den Positionspapieren für Zement, Flugasche, Silicastaub und Hüttensand mitgewirkt.

## 1.7 Normen und Regelwerke für Zement und Beton

### 1.7.1 Weiterentwicklung der Normen für Zement und andere Bindemittel ■

#### Zementnorm EN 197-1

Im Jahr 2000 wurde die EN 197-1 „Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement“ veröffentlicht und war damit die erste europäisch harmonisierte Norm für ein Bauprodukt. 2011 erschien eine überarbeitete Version, die zusätzlich Zemente mit hohem Sulfatwiderstand (so genannte SR-Zemente) und Hochofenzemente mit niedriger Anfangsfestigkeit (so genannte L-Zemente) regelt. Auch diese Norm wurde wieder überarbeitet, da die Bauproduktenverordnung (siehe Abschnitt 1.7.3) Anpassungen formeller Art erforderlich macht. Im Zuge dieser Revision hat das zuständige europäische Normungsgremium CEN/TC 51 „Zement und Baukalk“ außerdem die Aufnahme weiterer Zementarten in die Norm beschlossen. Hierbei handelt es sich um Zemente, die die bewährten Hauptbestandteile Klinker, Hüttensand, kieselsäurereiche Flugasche, natürliches Puzzolan und Kalkstein enthalten. Allerdings sollen niedrigere Klinkergehalte als bislang ermöglicht werden. Die neuen Zementarten mit mindestens 50 M.-% Klinker werden als Portlandkompositzemente CEM II/C-M bezeichnet, solche mit weniger als 50 M.-% Klinker als Kompositzement CEM VI. Aus diesem Grund sollen die bisherigen Kompositzemente CEM V in „Hüttensand-Puzzolan-Zemente“ umbenannt werden. **Tabelle 1.7.1-1** gibt einen Überblick über die Zusammensetzung der vorgesehenen neuen Zemente.

Darüber hinaus fordern die Europäischen Kommissionsdienste, dass die nächste Ausgabe der EN 197-1 auch Regeln zum Alkaligehalt enthält. Zementhersteller sollen den Alkaligehalt von Zementen zukünftig in Leistungserklärungen angeben können, wenn dies für den jeweiligen Zement bzw. seine Anwendung relevant ist. Eine Erweiterung der Zementbezeichnung (z. B. mit „LA“ für „Low Alkali“) ist allerdings nicht vorgesehen, da eine solche Bezeichnung aufgrund derzeit unterschiedlicher nationaler Alkaligrenzwerte missverständlich wäre.

Die beschriebenen Neuerungen wurden in einer überarbeiteten Version des Mandats M/114 aufgenommen. Allerdings wurde das neue Mandat bislang nicht von der EU-Kommission freigegeben.

Deshalb kann auch die Revision der Zementnorm noch nicht abgeschlossen werden.

#### Konformitätsbewertung von Zement

2014 wurde die überarbeitete Version der DIN EN 197-2 „Zement – Teil 2: Konformitätsbewertung“ veröffentlicht. Im Vergleich zur Vorgängerversion aus dem Jahr 2000 fanden keine gravierenden inhaltlichen Änderungen statt. Es wurden lediglich einige notwendige Klarstellungen vorgenommen. Beispielsweise enthält die Norm jetzt eine Aussage zur Bewertung der Messunsicherheit von Prüfergebnissen und eine Konkretisierung der Vorgehensweise bei Nichtkonformität der werkseigenen Produktionskontrolle. Parallel zur Revision der EN 197-2 wurden auch die Leitlinien für die Anwendung der Norm überarbeitet und als europäischer technischer Bericht CEN/TR 14245 (in Deutschland als DIN SPEC 18098:2014) veröffentlicht.

#### Hydraulische Tragschichtbinder

Im Juni 2013 erschien die EN 13282-1 „Schnell erhärtende hydraulische Tragschichtbinder“. Die europäische Norm stimmt inhaltlich weitgehend mit der früheren deutschen DIN 18506 überein und hat diese ersetzt. Zeitgleich mit der Produktnorm wurde die EN 13282-3 veröffentlicht, die die Konformitätsbewertung für hydraulische Tragschichtbinder regelt.

Darüber hinaus wurde in 2015 die EN 13282-2 „Normal erhärtende hydraulische Tragschichtbinder“ veröffentlicht. Die Norm enthält allerdings Anforderungen, die nicht im Mandat M/114 der Europäischen Kommission vorgegeben waren. Deshalb wurde die Norm bislang nicht im EU-Amtsblatt veröffentlicht und kann nicht als Grundlage für die Zertifizierung entsprechender Produkte genutzt werden.

#### Weitere Bindemittel

CEN/TC 51 hat eine Reihe von Normen für Spezialzemente und andere Bindemittel erarbeitet. Ein Beispiel hierfür ist die EN 14647 für Tonerdezement, der z. B. als Reparaturmörtel eingesetzt werden kann. Weitere genormte Bindemittel sind Putz- und Mauerbinder, Sulfathüttenzemente und hydraulische Bindemittel für nichttragende Anwendungen. **Tabelle 1.7.1-2** fasst den derzeitigen Stand der bestehenden Produktnormen für Zemente und andere hydraulische Bindemittel zusammen.

#### Prüfverfahren

Parallel zu den Produktnormen werden auch die Prüfnormen in regelmäßigen Abständen überarbeitet. **Tabelle 1.7.1-3** gibt einen

**Tabelle 1.7.1-1** Zusammensetzung der neuen Zemente nach EN 197-1

Zementart			Klinker	Hüttensand	Kiesel-säurereiche Flugasche	Natürliches Puzzolan	Kalkstein
			K	S	V	P	L/LL
Portlandkompositzement	CEM II/C-M	S-L S-LL	50–64	16–44	–	–	6–20
		V-L V-LL		–	16–44	–	
		P-L P-LL		–	–	16–44	
		S-V		16–44	6–20	–	
Kompositzement	CEM VI	S-L S-LL	31–59	–	–	–	6–20
		S-V		–	6–20	–	–

**Tabelle 1.7.1-2** Produktnormen für Zemente und andere hydraulische Bindemittel

Norm-Nr.	Zement/Bindemittel	Zement-/Bindemittelart		Festigkeits- klasse	Zusätzliche Klassen	Stand
		Anzahl	Bezeichnung			
EN 197-1	Normalzement	27	CEM I	32,5 L/N/R	SR, SR 0, SR 3, SR 5 LH (≤ 270 J/g)	2011, Revision eingeleitet
			CEM II	42,5 L/N/R		
			CEM III	52,5 L/N/R		
			CEM IV			
			CEM V			
EN 14216	Sonderzement mit sehr niedriger Hydratationswärme	6	VLH III VLH IV VLH V	22,5	VLH (≤ 220 J/g)	2015
EN 14647	Tonerdezement	1	CAC	40	–	2005/AC:2006, Revision eingeleitet
EN 15743	Sulfathüttenzement	1	CSS	32,5 L/N 42,5 L/N 52,5 L/N	–	2015
EN 13282-1	Schnell erhärtender hydraulischer Tragschichtbinder	1 <sup>1)</sup>	HRB	E 2 E 3 E 4 E 4-RS <sup>2)</sup>	RS <sup>2)</sup>	2013, Revision eingeleitet
EN 13282-2	Normal erhärtender hydraulischer Tragschichtbinder	1 <sup>1)</sup>	HRB	N 1 N 2 N 3 N 4		2015, nicht im EU Amtsblatt veröffentlicht
EN 413-1	Putz- und Mauerbinder	1	MC	5 12,5 22,5	12,5X und 22,5X (ohne LP-Mittel)	2011, Revision eingeleitet
EN 15368	Hydraulisches Bindemittel für nichttragende Anwendungen	1	HB	1,5 3	–	2008+A1:2010, Revision eingeleitet
EN 459-1	Baukalk	5	CL, DL, NHL, FL, HL	2 3,5 5	Q, S, S PL, S ML, A, B, C	2015, nicht im EU Amtsblatt veröffentlicht

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

<sup>2)</sup> RS = schnell erstarrend

**Tabelle 1.7.1-3** Prüfnormen der Reihe EN 196 für Zement

EN 196 Teil	Inhalt	Stand
1	Festigkeit	2016
2	Chemische Analyse	2013
3	Erstarren, Raumbeständigkeit	2016
(4) <sup>1)</sup>	Zusammensetzung	2007
5	Puzzolanität	2011
6	Mahlfeinheit	2017 Entwurf
7	Probenahme	2007
8	Hydratationswärme – Lösungsverfahren	2010
9	Hydratationswärme – Teiladiabatisches Verfahren	2010
10	Wasserlösliches Chromat	2016
11	Hydratationswärme – Isotherme Wärmeflusskalorimetrie	2017 Entwurf

<sup>1)</sup> Veröffentlichung als CEN-Bericht CEN/TR 196-4

Überblick über den aktuellen Stand der Prüfverfahren der Reihe EN 196. Nicht einbezogen sind in dieser Darstellung die Performanceprüfverfahren, die von CEN/TC 51 gemeinsam mit CEN/TC 104 „Beton und zugehörige Produkte“ in der Arbeitsgruppe WG 12 „Zusätzliche Leistungskriterien“ entwickelt werden.

## 1.7.2 Normen für das Bauen mit Beton ■

### Weiterentwicklung der Qualitätskette im Betonbau in Deutschland

Die Anforderungen an die Planung und die Errichtung von Betonbauwerken sind so vielfältig wie die Leistungsfähigkeit des Betons selbst. Insofern ist der Aufwand für die Planung und den Bau komplexer Ingenieurbauwerke naturgemäß aufwändiger als bei Vorhaben des üblichen Hochbaus. Auch für die dahinter liegende Qualitätssicherung gilt, dass diese entlang aller Planungs- und Bauphasen dem Anspruch des jeweiligen Bauwerkes gerecht werden muss. Allerdings ist eine solche differenzierte Betrachtung in den Normen des Betonbaus derzeit nur in Ansätzen vorgesehen.

Mit dem Konzept zur Betonbauqualität BBQ soll diese Lücke geschlossen werden. Der erste konzeptionelle Entwurf für eine Richtlinie liegt vor und wird intensiv diskutiert.

### Ausgangssituation

Auch heute schon gibt es für besondere Bauvorhaben differenzierte Anforderungen, die in der Zusammenarbeit zwischen Planung, Betontechnik und Ausführung die Qualitätskette sicherstellen. Beispiele hierfür sind das DBV/VDZ-Merkblatt „Sichtbeton“ oder die zusätzlichen technischen Vertragsbedingungen für den Wasserbau. Hierin werden vom Bauherrn Anforderungen an die Planung und Ausführung des Bauwerkes formuliert. Diese sind dann für alle Beteiligten verbindlich und gewährleisten eine dem Bauvorhaben angepasste Qualitätskette, die in diesen Fällen über die Anforderungen der Betonnormen hinausgeht.

Von daher ist die Betonnorm DIN EN 206-1/DIN 1045-2 gleichsam eine bewährte „Einheits-Grundnorm“. Die Diskussion um die Weiterentwicklung dieser Norm hat dabei gezeigt, dass es durchaus sinnvoll erscheint, bereits in den Normen nach der Komplexität der Bauaufgabe zu differenzieren. Das betrifft die Verantwortungsbereiche der Planer, Baustoffhersteller und der Bauausführenden. Erst im Zusammenspiel aller Beteiligten ergibt sich dann die beste Lösung für das Bauvorhaben. Wie wichtig dieses Zusammenspiel ist, zeigen zum Beispiel die Annahmen des Planers zur Betonzugfestigkeit im frühen Alter. Diese führten regelmäßig dazu, dass die aufgrund der weiteren betontechnischen Randbedingungen (Dauerhaftigkeit, Baufortschritt) in der Praxis verwendeten Betone nicht zu diesen Anforderungen passten. Um solchen Fragestellungen besser als bisher gerecht zu werden, wurde ein erstes Konzept für eine Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) vorgelegt. Fazit der bisherigen Arbeit: Die Intensität der Kommunikation über die Schnittstellen wird ein zentrales Unterscheidungsmerkmal zwischen den Anwendungssituationen sein.

### Das Konzept

Vorgesehen ist eine Unterteilung der Bauwerke in drei Betonbauqualitätsklassen:

- BBQ-N: normale Anforderungen
- BBQ-E: erhöhte Anforderungen
- BBQ-S: besonders festzulegende Anforderungen

**Tabelle 1.7.2-1** zeigt den ersten Entwurf eines Entscheidungsbaums, mit dessen Hilfe die Zuordnung zu den drei Klassen vorgenommen werden könnte. Die Klasse ist z.B. von der Nutzungsdauer, dem eingesetzten Bauverfahren oder der Art des Betons abhängig.

Während im allgemeinen Hochbau (BBQ-N) das Handeln der Beteiligten auch ohne vertieften Informationsaustausch untereinander in der Regel zum Erfolg führt, soll der Austausch relevanter Informationen und die Abstimmung wesentlicher Entscheidungen bei BBQ-E und BBQ-S durch

- ein verbindliches BBQ-Ausschreibungsgespräch bzw.
- verbindliche BBQ-Ausführungsgespräche mit einem Startgespräch und ggf. mehreren Nachverfolgungsgesprächen

sichergestellt werden. Neben diesen Elementen sind fallweise erweiterte Erstprüfungen am Beton bzw. deskriptive Vorgaben an die Betonzusammensetzung im Gespräch, wie bspw. der Leimgehalt. Hierdurch soll die Robustheit der Frischbetoneigenschaften unter Baustellenbedingungen sichergestellt werden.

### Die Umsetzung

Eine Richtlinie des DAfStb bietet die Möglichkeit, schnittstellenübergreifend die Teilbereiche Planung, Betontechnik und Ausführung anzusprechen. Die Komplexität des Bauwerks bzw. einzelner Bauteile, aufgeteilt nach Planungsklassen, Betonklassen und Bauausführungsklassen, entscheidet über die Zuordnung. Die BBQ-Klasse ergibt sich aus der höchsten Teilkategorie. So sind Erfolg bzw. Misserfolg beispielsweise bei WU-Konstruktionen erfahrungsgemäß in stärkerem Maße von Konstruktion und Ausführung als vom Beton an sich abhängig.

### Diskussionsstand

Die Festlegung der BBQ-Klasse ist eine Planungsaufgabe. Die Zuordnung zu den Klassen ergäbe sich wie in **Tabelle 1.7.2-1** dargestellt. Weitere Fälle wären sinngemäß einzuordnen. **Tabelle 1.7.2-2** gibt auch einen Hinweis, in welche Leistungsphase entsprechende Entscheidungen bzw. Maßnahmen fallen. Die Planer haben zwar noch gewisse Bedenken, dass ihnen Entscheidungen und Verantwortlichkeiten zu einem Zeitpunkt abverlangt werden, zu dem die Details der Bauaufgabe noch fehlen. Sie begrüßen aber die geplante Verbesserung der Kommunikation über die Schnittstellen und sehen, wie die weiteren im DAfStb organisierten Kreise, eine Chance für die Qualität der Betonbauweise darin, dass es mit den BBQ-Klassen leichter fällt, den Bauherrn von der unterschiedlichen Komplexität des Bauablaufs zu überzeugen. Damit würde eine zentrale Forderung der seinerzeit gemeinsam vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein (DBV) und vom VDZ vorgenommenen Analyse umgesetzt.

### Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken

Die aktuelle Generation der Betonnormen, DIN EN 206-1 und DIN 1045-2, enthält zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit des Baustoffs „Beton“ ein System aus deskriptiven Anforderungen (z.B. höchstzulässige Wasserzementwerte, Mindestzementgehalte etc.) und Klassen (z.B. Expositionsklassen, Konsistenzklassen, Mindestdruckfestigkeitsklassen). Mit dem heutigen komplexen Fünfstoffsystem „Beton“, bestehend aus Gesteinskörnung, Zement, Wasser, Zusatzstoffen und Zusatzmitteln, lassen sich vielfältige Bauaufgaben bewältigen. Trotz der Vielzahl möglicher Kombinationen aus Zementen, Zusatzmitteln und Betonzusätzen ist dieses System grundsätzlich robust und wenig anfällig für Fehlanwendungen. Mit Blick auf die Dauerhaftigkeit stößt dieses System in einigen Fällen aber an seine Grenzen:

- Eine Mindestlebensdauer >> 50 Jahre ist nachzuweisen (z.B. ZTV-W).
- Neue Baustoffe bzw. Baustoffe ohne Langzeiterfahrung sollen zur Anwendung kommen (z.B. Zulassungsverfahren).
- Es liegen besondere Umgebungsbedingungen/Beanspruchungen vor (z.B. AKR im Betonstraßenbau).

Ein wesentlicher Aspekt, warum die EN 206 bis zum heutigen Tag nicht harmonisiert ist, sind die Regelungen zur Dauerhaftigkeit des Betons. Eine einheitliche europäische Basis zur Bewertung der Dauerhaftigkeit von Beton konnte bis heute nicht erreicht werden.

Ansprüche an die Dauerhaftigkeit von Beton sind in der bestehenden europäischen Betonnorm EN 206 durch Expositionsklassen („genormte Umgebungsbedingungen“) definiert, die durch nationale Anforderungen umgesetzt werden.

Nun wird diskutiert, die Dauerhaftigkeit in so genannte Expositions-Widerstands-Klassen (engl. Exposure Resistance Class (RX)) zu beschreiben. Die Definition dieser Klassen auf der Bauwerks-

Tabelle 1.7.2-1 Mögliche Zuordnung von Anwendungsfällen zu Planungs-, Beton-, Ausführungs- und BBQ-Klassen

Z	Bezug	Anwendung	L-Phase (HOAI)	PK <sup>2)</sup>	BK <sup>2)</sup>	AK <sup>2)</sup>	BBQ
S	1	2	3	4	5	6	7
1	Bauteil	Bauteile in Expositionsklasse X0	3	1	1	1	N
2	Bauteil	Innenbauteile in Expositionsklasse XC1	3	1	1	1	N
3	Bauteil	Bauteile in Expositionsklasse XC3 oder Außenbauteile in Expositions-klassen XC4/XF1/XA1/XD1/XS1	3	1	1	1	N
4	Bauteil	Bauteile in den Feuchtigkeitsklassen WO oder WF	3	1	1	1	N
5	Bauteil	Gründungsbauteile in den Expositionsklassen XC1/XC2	3	1	1	1	N
6	Bauteil	Bauteile mit geplanten und auf das Einbauverfahren angepassten Betonieröffnungen und Rüttelgassen	5	1	1	1	N
7	Bauteil	Bauteile mit Ebenheitsanforderungen nach Zeile 1 gemäß DIN 18202 bzw. Bauteile ohne Ebenheitsanforderungen	?	1	1	1	N
8	Ausführung	Normalbeton für Ortbeton mit Druckfestigkeitsklasse $\leq C25/30$ <sup>1)</sup>	5	1	1	1	N
9	Bauteil	Bauteile in Expositionsklassen XF2/XF3, XD2/XD3, XS2/XS3, XA2, XM2	3	1	1/2	2	E
10	Planung/Beton	Betone mit künstlichen Luftporen (LP-Beton), z.B. XF2/XF3/XF4	5	2	2	2	E
11	Bauteil	Bauteile in Feuchtigkeitsklasse WA	3	1	2	1	E
12	Bauteil	Sichtbetonklassen SB1, SB2 oder SB3	0	2	2	2	E
13	Bauteil	massige Bauteile nach DAfStb-RL	3	2	2	2	E
14	Bauteil	Bauteile im Spezialtiefbau (Pfähle, Schlitzwände etc.)	3	2	1	2	E
15	Planung/ Bauteil	WU-Konstruktionen nach DAfStb-RL mit NK B	0	2	1	2	E
16	Planung/ Bauteil	WU-Konstruktionen nach DAfStb-RL mit NK A	0	2	1	2	E
17	Planung/ Bauteil	WU-Konstruktionen nach DAfStb-RL mit NK A***	0	2	1	2	E
18	Planung/ Bauteil	Behälter (Fermenter, Biogasanlagen etc.)	0	2	2	2	E
19	Bauteil	Bauteile mit Vorspannung (Spannbeton)	2 oder 3	2	2	2	E
20	Beton	Faserbeton ohne Leistungsklasse	5	1	1	1	N
21	Beton	Beton mit Kunststofffasern für den Brandschutz	3	2	2	2	E
22	Beton	Faserbeton mit Leistungsklasse (nach RL Stahlfaserbeton)	3	2	2	2	E
23	Bauteil	Bauteile mit Ebenheitsanforderungen nach DIN 18202, Tabelle 3, Zeilen 2 oder 3 sowie 5 oder 6	?	1	1	2	E
24	Ausführung	Normalbeton $\geq C30/37$ und $\leq C60/75$	5	1	1	2	E
25	Planung/ Beton	Leichtbeton $\leq LC35/38$ für $\geq D1,6$ bis D2,0	5	2	2	2	E
26	Planung/ Beton	Leichtbeton $\leq LC25/28$ für $\geq D1,0$ bis D1,4	5	2	2	2	E
27	Planung/ Beton	Schwerbeton	0 oder 3	2	2	2	E
28	Bauteil	erhöhte Anforderungen an die Begrenzung der Verformung (z.B. Durchbiegung)	3	2	2	2	E
29	Beton	Selbstverdichtender Beton	5	1	2	2	E
30	Planung	Abminderung des Vorhaltemaßes der Betondeckung (MP: nur Fälle nach DIN EN 1992-1-1/NA, 4.4.1.3 (3))	3 oder 5	2	1	2	E

Z	Bezug	Anwendung	L-Phase (HOAI)	PK <sup>2)</sup>	BK <sup>2)</sup>	AK <sup>2)</sup>	BBQ
S	1	2	3	4	5	6	7
31	Bauteil	WHG-Anlagen (LAU) nach DAfStb-RL	0	2	2	2	E
32	Bauteil	Bauwerke der Schadensfolgeklasse CC3	0	?	?	?	?
33	Bauteil	von 50 Jahren abweichende Nutzungsdauer (z. B. Dauerhaftigkeitsbeurteilung für Nutzungsdauerklasse 5)	0	3	1	1	S
34	Bauteil	befahrene Verkehrsflächen mit Instandhaltungsplan zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit (z. B. Parkdecks)	3	3	1	1	S
35	Bauteil	Bauteile, bei denen die Mindestbewehrung (Zwang) mit abgeminderter Zugfestigkeit ermittelt wird	3 oder 5	3	1	2	S
36	Planung	besonders hoher Bewehrungsgehalt ( $A_s \geq 9\%$ bei überwiegend vertikalen Bauteilen (inkl. Übergreifungsstöße) und $A_s \geq 4\%$ bei überwiegend horizontalen Bauteilen)	3 oder 5	3	1	2	S
37	Planung	Bauteile, bei denen die Anordnung von Betonieröffnungen oder Rüttelgassen nicht möglich ist und deswegen das Einbauverfahren besonders zu planen ist	5	3	1	3	S
38	Bauteil	Expositionsklassen XM3 und chemischer Angriff XA3 oder stärker	2 oder 3	3	1	1	S
39	Bauteil	Bauteile, bei denen zusätzlich eine Beschichtung oder Abdichtung zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit erforderlich ist	3	3	1	1	S
40	Planung/ Beton/ Ausführung	von 28 Tagen abweichendes Nachweisalter für die Druckfestigkeit des Betons <sup>3)</sup>	5	1	2	2	E
41	Planung/Beton	Normalbetone $\geq C70/85$ bzw. $\geq LC40/44$	5	1	2	2	E
42	Bauteil	nicht geschalte, flächige Bauteile mit planmäßigem Gefälle (z. B. $> 5\%$ )	5	2	1	2	E
43	Bauteil	Sichtbetonklasse SB4	0	3	3	3	S
44	Bauteil	Bauteile mit Ebenheitsanforderungen nach DIN 18202, Tabelle 3, Zeilen 4 oder 7	0,1 oder 2	1	1	3	S
45	Bauteil	Toleranzklasse 2 gemäß DIN EN 13670	3	3	1	3	S
46	Bauteil	JGS-Anlagen	0	2	2	2	E
47	Beton/ Ausführung	Pumpbeton mit Übergabe vor der Pumpe <sup>4)</sup>	nach 5	1	1	3	S
48	Beton	Pumpbeton mit Übergabe nach der Pumpe	nach 5	1	1	1	N
49	Ausführung	Besondere Förderverfahren (z. B. Transport des Betons mittels Pumpen über lange Strecken oder bei größeren Höhenunterschieden oder bei geringen Rohrdurchmessern) <sup>4)</sup>	nach 5	1	3	3	S
50	Ausführung	Gleitbauverfahren	3 oder 5	3	3	3	S
51	Beton	Betone der Konsistenzklassen F1 bis F5 oder C0 bis C4	nach 5	1	1	1	N
52	Ausführung	Einbau unter Wasser (Unterwasserbeton)	nach 5	1	2	2	E
53	Ausführung	Maschineller Einbau (z. B. Deckenfertiger, Walzbeton)	nach 5	1	1	2	E
54	Ausführung	zusätzliche Oberflächenbearbeitung (über Abscheiben und Abziehen hinaus) und Oberflächen mit besonderer Textur (z. B. Besenstrich)	nach 5	1	1	2	E
55	Ausführung	Betone mit langsamer oder sehr langsamer Festigkeitsentwicklung	3	1	2	2	E
56	Beton	Betone der Konsistenzklasse F6	nach 5	1	2	2	E
57	Bauteil	Stahlverbundkonstruktionen	3	2	2	2	E
58	Bauteil	Deckelbauweise	3	2	2	2	E

Z	Bezug	Anwendung	L-Phase (HOAI)	PK <sup>2)</sup>	BK <sup>2)</sup>	AK <sup>2)</sup>	BBQ
S	1	2	3	4	5	6	7
59	Beton	Besondere Arten oder Klassen von Zement oder besondere Arten oder Kategorien von Gesteinskörnungen (s. DIN EN 206, 6.2.3, Spiegelstriche 1 und 2) <sup>5)</sup>	0	3	3	3	S
60	Beton/Bauteil	Andere technische Anforderungen (s. DIN EN 206, 6.2.3, letzter Spiegelstrich), sofern in dieser Tabelle nicht bereits enthalten <sup>5)</sup>	0	3	3	3	S

PK = Planungskategorie; BK = Betonklasse; AK = Ausführungskategorie

<sup>1)</sup> Hinweis: kommt aus den Überwachungsklassen in DIN 1045-3

<sup>2)</sup> Mindestklasse, je nach Anwendungsfall kann eine höhere Klasse erforderlich sein

<sup>3)</sup> Hinweis: GÜB-QS-Plan zur Ausführung in RL übernehmen

<sup>4)</sup> Festlegungen werden in den Gesprächen gemäß Anhang A getroffen, daher BK3/AK3

<sup>5)</sup> Nach den Ausschreibungs- und Ausführungsgesprächen gemäß Anhang A kann gegebenenfalls eine Umstufung vorgenommen werden

Quelle: DAfStb (Stand März 2018)

**Tabelle 1.7.2-2** Expositionswiderstandsklassen – Beispiel zur Erläuterung des Prinzips

Widerstands-klasse	Carbonatisierung RXC			Chlorid RXSD			Frost-Tausalz RXF	
	RXC20	RXC30	RXC40	RXSD45	RXSD60	RXSD75	RXF 1,0	RXF 0,5
Definition	50 Jahre in Expositionsklasse <b>XC3 (65 % r. F.)</b> mit 10%-iger Wahrscheinlichkeit, dass die Carbonatisierungsfrent (mm) folgenden Wert überschreitet			50 Jahre in Expositionsklasse <b>XS2</b> mit 10%-iger Wahrscheinlichkeit, dass die <b>Chloridkonzentration 0,5 % v. Z. in einer Tiefe von (mm)</b> überschritten wird			XF1 und XF2 mit DtS-Regeln <sup>2)</sup> sowie <b>XF3 und XF4</b> mit <b>Abwitterungsmenge m<sub>56</sub> in kg/m<sup>2</sup></b> ergänzt um DtS-Regeln	
Einstufung nach Norm	20	30	40	45	60	75	1,0	0,5
	EN 12390-10 <sup>1)</sup>			EN 12390-11 <sup>1)</sup>			CEN/TS 12390-9	CEN/TC 12390-9

<sup>1)</sup> Voraussetzung: EN 12390-10 und EN 12390-11 können als Grundlage zur Entwicklung geeigneter Prüfnormen verwendet werden

<sup>2)</sup> DtS = Deemed to satisfy rules = deskriptive Regeln

Quelle: CEN/TC 104/SC 1/WG 1 N 72

ebene ergäbe sich beispielsweise anhand einer maximalen Carbonisierungstiefe nach 50 Jahren unter definierten Randbedingungen (siehe **Tabelle 1.7.2-2**). Die Vorgabe der Klasse würde durch den Planer erfolgen, der auf dieser Basis die Mindestbetondeckung festlegt. In der Betonnorm EN 206 wären anhand eines entsprechenden Laborprüfverfahrens die zugehörigen Klassen des Betons so zu definieren, dass aufbauend auf der deklarierten Leistung (z. B. einer Carbonisierungsgeschwindigkeit in mm/a<sup>0,5</sup>) bei Extrapolation auf 50 Jahre national festgelegt werden kann, mit welcher Betondeckung der Beton z. B. in der Expositionsklasse XC3 verwendet werden kann. Was zunächst relativ einfach klingt, wird derzeit intensiv und auch kontrovers diskutiert. Denn es ergeben sich eine Reihe von Fragestellungen, die in den entsprechenden CEN-Arbeitsgruppen zunächst beantwortet werden müssen. So muss im Eurocode eine Bemessungslebensdauer (engl. design working life) definiert werden. Dies kann mit den heute zur Verfügung stehenden Methoden bezüglich Bewehrungskorrosion nur der Grenzzustand „Depassivierung der Bewehrung durch Karbonatisierung“ oder der Grenzzustand „Erreichen eines kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts“ sein. Vertreter der CEN Komitees für Zement, Beton, Fertigteile sowie Bemessung haben gemeinsam die zu beantwortenden Fragen formuliert und einen groben Zeitplan festgelegt (**Tabelle 1.7.2-3**).

### 1.7.3 Europäische Bauproduktenverordnung ■

Am 4. April 2011 wurde die Bauproduktenverordnung (BauPVO) im EU-Amtsblatt veröffentlicht und trat 20 Tage später in Kraft. Mit Wirkung zum 1. Juli 2013 hat sie die aus dem Jahr 1988 stammende Bauproduktenrichtlinie vollständig abgelöst. Die Verordnung beschreibt die Pflichten aller an der Liefer- und Vertriebskette beteiligten Wirtschaftsakteure, d. h. von Herstellern, Bevollmächtigten und Importeuren. Außerdem hat die BauPVO die Anforderungen an notifizierte Stellen neu festgelegt und enthält Regelungen hinsichtlich europäischer technischer Bewertungen und zur Marktüberwachung.

Die Verordnung fordert, dass nur solche Bauprodukte auf dem europäischen Binnenmarkt gehandelt werden dürfen, die für die vorgesehene Verwendung geeignet sind und die folgenden sieben „Grundanforderungen an Bauwerke“ erfüllen:

- Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
- Brandschutz
- Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
- Sicherheit und Barrierefreiheit bei der Nutzung
- Schallschutz

**Tabelle 1.7.2-3** Fragestellungen und Zeitplan zur Bearbeitung für die Umsetzung des Konzepts der Expositions-Widerstands-Klassen (ERC) in den europäischen Normen des Betonbaus

Pos.	Aufgabe	vorgeschlagener Zeitplan
1	Festlegung, welches Ereignis das Ende der Nutzungsdauer darstellt (z. B. Depassivierung der Bewehrung, Korrosionsgrad oder Schädigungsgrad infolge Korrosion)	Herbst 2018
2	a) Definition der Expositions-Widerstands-Klassen (Carbonatisierung/Chlorid) und des entsprechenden Zuverlässigkeitsindex ( $\beta$ -Wert)	Herbst 2018
	b) Definition von zwei Klassen (bestanden/nicht bestanden) für den Frostwiderstand (ohne und mit Tausalzen); Festlegung entsprechender Grenzwerte	
3	Durchsicht/Überarbeitung der Expositions-klassen	Frühjahr 2019
4	Überprüfung und ggf. Bestätigung des Modells unter Berücksichtigung der Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons (Expositions-Widerstands-Klassen) in Bezug auf das Ende der Nutzungsdauer in der entsprechenden Expositions-klasse für Carbonatisierung, Chloridangriff und Frost-Tau-Wechsel	Frühjahr 2019
5	Festlegung der dauerhaftigkeitsrelevanten Mindestbetondeckung des Bewehrungsstahls gemäß EN 10080 in Relation zur ERC für die Expositions-klassen und die entsprechende Nutzungsdauer	Frühjahr 2019
6	Festlegung der dauerhaftigkeitsrelevanten Mindestbetondeckung für Spannstahl und Spannglieder bei unterschiedlichen Schutzniveaus	Frühjahr 2020
7	Festlegung der dauerhaftigkeitsrelevanten Mindestbetondeckung für beschichtete Bewehrungen, Edelstahl, Polymerfaser-Verstärkungen, andere zusätzliche Schutzmaßnahmen (Membrane usw.) oder für besondere Bedingungen	Frühjahr 2020
8	Entwicklung von Prüfverfahren zur Bereitstellung geeigneter Daten für die Einstufung in Expositions-Widerstands-Klassen für Carbonatisierung, Chlorideindringen, Frostangriff	
9	Vergleich der ERC aus dem Entwurf der EN 1992-1-1 mit Daten bzw. Erfahrungen aus Dauerhaftigkeitsprüfungen	Herbst 2019
10	Vergleich der ERC und der Mindestbetondeckung aus dem Entwurf der EN 1992-1-1 mit den aktuellen deskriptiven Regeln und Erfahrungen in der Praxis	Herbst 2019
11	Klassifizierung von Betonen in ERCs auf der Grundlage von (i) Leistungstests und (ii) auf der Grundlage deskriptiver Regeln. Regelungen für Erstprüfungen und werkseigene Produktionskontrolle festlegen	Ende 2020
12	Zusammenstellung verfügbarer Daten zur Dauerhaftigkeit in Abhängigkeit der Nachbehandlungsbedingungen	Sommer 2021
13	Ausführungsregeln (z. B. Nachbehandlung) zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit im Bauwerk auf dem Niveau, wie in der Planung in Form der ERC angenommen	Sommer 2021
14	Verfahren für Annahmeprüfung festlegen (z. B. durch Auftragnehmer oder Bauherrn)	Sommer 2021

Quelle: CEN/TC 104/SC 1/WG 1 N 72 (nach Diskussion in CEN/TC 104/SC 1/WG 1 am 14.05.2018) – redaktionelle Anpassung durch VDZ

- Energieeinsparung und Wärmeschutz sowie
- nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen

Die konkreten Vorgaben für Bauprodukte werden, anders als bei anderen europäischen Richtlinien, nicht direkt in der BaupVO formuliert. Hierzu dienen vielmehr europäisch harmonisierte Normen und europäische technische Bewertungen (ETAs).

### EuGH-Urteil gegen Deutschland

Der Europäische Gerichtshof (EuGH) hat die Bundesrepublik Deutschland mit Urteil vom 16.10.2014 (Rs. C-100/13) wegen Handelshemmnissen bei Bauprodukten verurteilt. Das Gericht urteilte, dass in nationalen Regelwerken enthaltene Zusatzanforderungen an Bauprodukte, die europäisch harmonisierten Normen entsprechen, unzulässige Handelshindernisse darstellen.

Als Konsequenz aus dem Urteil wurde das deutsche Bauordnungsrecht überarbeitet. Die novellierten Rechtsvorschriften, zu denen auch die Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) gehört, sehen eine Abgrenzung zwischen Anforderungen an Bauprodukte und Regelungen für das Zusammenfügen von Bauprodukten zu baulichen Anlagen, so genannte Bauarten, vor. Änderungen ergeben sich insbesondere für Bauprodukte, an die bislang nationale Zusatzanforderungen in Form deutscher „Rest-Normen“ gestellt wurden, ob-

wohl sie bereits einer harmonisierten Norm entsprechen. Hierzu zählen auch „NA-Zemente“ mit niedrigem Alkaligehalt nach DIN 1164-10. Diese Zemente müssen nunmehr als Zemente nach EN 197-1 in Verkehr gebracht werden. Deshalb ist die Erweiterung der Zementbezeichnung um „NA“ nicht mehr möglich. Der VDZ hat empfohlen, stattdessen die Normbezeichnung um die beiden Kleinbuchstaben „na“ in Klammern zu ergänzen, beispielsweise „Portlandzement EN 197-1 – CEM I 32,5 R (na)“. Die „NA-Eigenschaft“ muss in einer Herstellererklärung zugesichert und von einer unabhängigen Stelle z. B. durch ein privatrechtliches Produktzertifikat bestätigt werden.

### 1.7.4 Umwelanforderungen an zementgebundene Baustoffe in Kontakt mit Grundwasser und Boden ■

#### Europäische Aktivitäten

Für die zukünftige Aus- und Überarbeitung harmonisierter europäischer Produktnormen fordert die Europäische Kommission, dass in diesen Normen Angaben zur Freisetzung gefährlicher Substanzen vorgesehen werden. Die dafür notwendigen generischen horizontalen Prüfverfahren werden von dem Technischen Komitee CEN/TC 351 „Construction products: Assessment of release of dangerous substances“, das im Jahr 2005 gegründet wurde, ausge-

**Tabelle 1.7.4-1** Gegenüberstellung der GFS-Werte 2004 und 2016

Parameter	GFS 2004	GFS 2016
	[ $\mu\text{g/L}$ ]	[ $\mu\text{g/L}$ ]
Antimon (Sb)	5	5
Arsen (As)	10	3,2
Barium (Ba)	340	175
Blei (Pb)	7	1,2
Bor (B)	740	180
Cadmium (Cd)	0,5	0,3
Chrom (Cr)	7	3,4
Kobalt (Co)	8	2
Kupfer (Cu)	14	5,4
Molybdän (Mo)	35	35
Nickel (Ni)	14	7
Quecksilber (Hg)	0,2	0,1
Selen (Se)	7	3
Thallium (Tl)	0,8	0,2
Vanadium (V)	4	4
Zink (Zn)	58	60
Chlorid (Cl <sup>-</sup> )	250 [mg/L]	250 [mg/L]
Cyanid (CN <sup>-</sup> )	5 (50)	10 (50)
Fluorid (F <sup>-</sup> )	750	900
Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	240 [mg/L]	250 [mg/L]

arbeitet. Für den Bereich Boden und Grundwasser hat die WG 1 des TC 351 Entwürfe für einen Standtest „Horizontal dynamic surface leaching test“ für monolithische Bauprodukte und für einen Säulentest „Horizontal up-flow percolation test“ für körnige Bauprodukte vorgelegt.

Nach den entsprechenden Robustheitsprüfungen wurde das Prüfverfahren für monolithische Bauprodukte, das weitgehend mit dem in Deutschland eingesetzten Verfahren des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) identisch ist, im November 2014 als DIN CEN/TS 16637-2 veröffentlicht. Hinsichtlich des Prüfverfahrens für körnige Bauprodukte konnte zunächst keine Einigung erzielt werden, da die bislang festgelegten Prüfbedingungen in verschiedenen Mitgliedsstaaten deutliche Unterschiede aufweisen. So sind z. B. in den Niederlanden eine generelle Zerkleinerung der Bauprodukte auf 100 M.-% < 10 mm mit einem Anteil von 90 M.-% < 4 mm und eine geringe Durchflussrate von 150 mm/d vorgesehen. Dagegen sollen körnige Bauprodukte in Deutschland ohne Zerkleinerung so geprüft werden, wie sie zum Einsatz kommen, und die Durchflussrate beträgt etwa 450 mm/d. Nach intensiven Diskussionen wurde der folgende Kompromiss gefunden: Der Kornanteil < 4 mm muss mindestens 45 M.-% betragen, das Größtkorn wird auf 22,4 mm begrenzt und die Durchflussrate soll 300 mm/d betragen. Mit diesem Kompromiss wurde der Normentwurf im Dezember 2016 als DIN CEN/TS 16637-2 veröffentlicht. Im September 2017 wurden die europäischen Ringversuche zu den beiden Technischen Spezifikationen gestartet. Das heißt, dass die endgültigen europäischen Prüfnormen Ende 2018/Anfang 2019 vorliegen können. Ab diesem Zeitpunkt müssen die

europäischen Produktkomitees bei der Aus- bzw. Überarbeitung der entsprechenden Produktnormen auf die obigen Prüfnormen zurückgreifen.

### Nationale Aktivitäten

Ein Dossier der European Concrete Platform (ECP) empfiehlt die Einstufung von Beton und Betonausgangsstoffen in die europäische Kategorie „Without Further Testing“ (WFT).

Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) hat das Dossier geprüft und kann der vorgeschlagenen generellen WFT-Einstufung nicht folgen. Stattdessen sieht das DIBt „Überarbeitungsbedarf bei Normen für Beton und Stahlbetonbauteile im Hinblick auf die Auswirkungen auf Boden und Grundwasser“.

Das ECP-Dossier wurde unter Federführung von Hans van der Sloot – einem niederländischen, international anerkannten Experten für Auslauguntersuchungen – erstellt. Die Basis für das Dossier bildeten Auslaugergebnisse, die in einer sehr umfangreichen Datenbank zu weltweit hergestellten Mörteln und Betonen zusammengefasst sind. Durch den Vergleich dieser Ergebnisse mit niederländischen gesetzlich festgelegten Anforderungen für die Freisetzung umweltrelevanter Parameter aus Bauprodukten kommen die Autoren zu dem Schluss, dass eine generelle WFT-Einstufung für Beton und Betonausgangsstoffe – abgesehen von wenigen Ausnahmen – möglich ist, da die ermittelten Freisetzungen für viele Parameter weniger als 10 % der zulässigen Freisetzung betragen.

Werden die vorliegenden Auslaugergebnisse jedoch mit den Umweltaanforderungen des DIBt in Deutschland verglichen, hätten 23 % der untersuchten Mörtel und Betone die Anforderungen an die Vanadiumfreisetzung nicht eingehalten. Diese Differenz ergibt sich aus unterschiedlichen Bewertungskonzepten. Während z. B. in den Niederlanden eine Risikobewertung erfolgt, die dann dort zu einer zulässigen Freisetzung von 320 mg/m<sup>2</sup> Vanadium führt, ergibt sich für Deutschland ein entsprechender Wert von nur 4,4 mg/m<sup>2</sup>.

Die bestehenden, sehr niedrigen deutschen Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) wurden im Jahr 2016 durch die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) aktualisiert und in vielen Fällen deutlich abgesenkt. **Tabelle 1.7.4-1** enthält die GFS-Werte für anorganische Parameter aus den Jahren 2004 und 2016. Sollten die aktualisierten GFS-Werte bei Umweltbewertungen von Beton und Betonausgangsstoffen als Grundlage herangezogen werden, können insbesondere die Parameter für Blei, Kobalt und Vanadium die Verwendbarkeit von Betonen erschweren. Es wird noch geklärt, ob angesichts der verschärften GFS-Werte eine Anpassung des Übertragungsmodells (vom GFS-Wert zum Auslaugversuch) möglich ist.

## 1.7.5 Hygienische Anforderungen an zementgebundene Baustoffe in Kontakt mit Trinkwasser ■

### Europäische Aktivitäten

Auf der Basis des Mandats M 136 der Europäischen Kommission erarbeitet die WG 3 des CEN/TC 164 „Wasserversorgung“ Prüfverfahren für Werkstoffe, die in Kontakt mit Trinkwasser kommen. Während die Prüfnormen DIN EN 14944-1 „Einfluss fabrikmäßig hergestellter zementgebundener Produkte auf organoleptische Parameter“ und DIN EN 14944-3 „Migration von

Substanzen aus fabrikmäßig hergestellten zementgebundenen Produkten“ bereits seit den Jahren 2006 und 2007 vorliegen, wurden die entsprechenden Arbeiten zu baustellenseitig hergestellten Produkten im Jahre 2005 gestoppt, da noch zu viele regulatorische Fragen offen blieben.

Nachdem das europäische „Akzeptanzsystem für Bauprodukte in Kontakt mit Trinkwasser“ im Jahr 2006 endgültig gescheitert war, kamen die vier EU-Mitgliedsstaaten Deutschland, Frankreich, Niederlande und Vereinigtes Königreich (4MS-Gruppe) im Jahr 2007 überein, einen gemeinsamen Ansatz zur Produktbewertung zu erarbeiten, um die entsprechenden hygienischen Anforderungen im jeweiligen Mitgliedsstaat umzusetzen. Dazu wurde im Jahr 2012 von der 4MS-Gruppe das Dokument „Bewertung zementgebundener Produkte in Kontakt mit Trinkwasser“ veröffentlicht. Dieses Dokument umfasst auch die notwendigen regulatorischen Anforderungen, weshalb die Arbeitsgruppe für zementgebundene Produkte reaktiviert wurde. Zwischenzeitlich wurden die bestehenden Teile 1 und 3 der Norm überarbeitet und Entwürfe für die Teile 2 und 4 für baustellenseitige Produkte fertiggestellt und 2015 in die Arbeitsgruppenumfrage gegeben. Leider ist diese Umfrage aufgrund formaler Fehler gescheitert, sodass das Work Item von CEN zurückgezogen wurde. Im Jahr 2017 hat die WG 3 beschlossen, die Arbeiten zu den Prüfverfahren unter einer neuen Leitung der entsprechenden Projektgruppe zu reaktivieren.

### Nationale Aktivitäten

Zurzeit gilt in Deutschland für zementgebundene Werkstoffe in Kontakt mit Trinkwasser das Arbeitsblatt W 347 „Hygienische Anforderungen an zementgebundene Werkstoffe im Trinkwasserbereich“ des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW). Bislang hat das Umweltbundesamt (UBA) Leitlinien oder Empfehlungen zur Beurteilung von Materialien und Werkstoffen mit Trinkwasserkontakt herausgegeben oder auf entsprechende DVGW-Arbeitsblätter verwiesen. Die zweite Änderungsverordnung zur Trinkwasserverordnung (TVO) weist jetzt dem UBA die Aufgabe zu, hygienische Bewertungsgrundlagen für Metalle, Kunststoffe, Elastomere usw. sowie für zementgebundene Werkstoffe zu erarbeiten. Diese Grundlagen werden die Prüfvorschriften mit den Prüfparametern, Prüfkriterien und methodische Vorgaben umfassen. Außerdem sollen sie Positivlisten der Ausgangsstoffe oder der verwendbaren Materialien und Werkstoffe beinhalten. Diese Positivlisten sollen durch das UBA geführt und bei Bedarf überarbeitet werden.

Im Gegensatz zu den freiwillig anwendbaren Leitlinien und Empfehlungen werden die Bewertungsgrundlagen zwei Jahre nach ihrer Festlegung rechtsverbindlich. Das heißt, dass Betreiber von Wasserversorgungsanlagen – dazu gehören auch Trinkwasserinstallationen in Gebäuden – dann nur noch solche Bauteile verwenden dürfen, deren Materialien und Werkstoffe der jeweiligen Bewertungsgrundlage entsprechen. Dabei ist vorgesehen, dass die Übereinstimmung mit den Anforderungen zum Beispiel durch den Prüfbericht eines akkreditierten Prüfinstituts nachgewiesen werden kann.

Das Umweltbundesamt hat Fachgremien eingerichtet, die es bei der Ausarbeitung der Bewertungsgrundlagen beraten sollen. Zementgebundene Werkstoffe werden in dem UBA-Fachgremium „Kunststoffe und andere nichtmetallene Materialien im Kontakt mit Trinkwasser (KTW-FG)“, in dem der VDZ vertreten ist, bearbeitet. Im Jahr 2013 wurde vom UBA der Entwurf „Bewertungsgrundlagen für zementgebundene Werkstoffe im Kontakt mit Trinkwasser – Zement – Bewertungsgrundlagen (ZTW)“ vorgelegt.

Die Basis für den ZTW-Entwurf bildete das bewährte DVGW-Arbeitsblatt W 347. So findet sich in dem Entwurf – sowie auch in dem zuvor angeführten 4MS-Dokument – das Prinzip wieder, dass bei Einhaltung festgelegter Spurenelementgehalte im Zement keine Auslaugprüfungen hinsichtlich dieser Parameter notwendig sind. Die zurzeit im DVGW-Arbeitsblatt W 347 aufgeführten Gehaltswerte sind 100 ppm für Arsen, 10 ppm für Cadmium sowie 500 ppm für Blei, Chrom und Nickel. Allerdings beabsichtigt das UBA, zusätzlich Gehaltswerte für die Elemente Antimon, Kobalt, Thallium und Vanadium festzulegen. Weiterhin werden die bestehenden Gehaltswerte hinterfragt. Das UBA ist jedoch bereit, die derzeitigen Werte, die von allen deutschen Normzementen eingehalten werden, zu akzeptieren, wenn der experimentelle Nachweis erbracht wird, dass die zulässigen Auslaugmengen sicher eingehalten werden. Der VDZ hat in Abstimmung mit dem UBA die für die Auslaugversuche erforderlichen Mörtelprismen hergestellt. Dabei wurden Zemente mit möglichst hohen Spurenelementgehalten eingesetzt. Um die zuvor angegebenen Gehaltswerte jedoch überhaupt erreichen zu können, war in den meisten Fällen eine Dotierung mit dem entsprechenden Spurenelement notwendig. Bei den Auslauguntersuchungen konnten die Gehaltswerte für einige Elemente bestätigt werden, allerdings sind die Untersuchungen dann aus verschiedensten Gründen ins Stocken geraten. Es wird angestrebt die noch fehlenden Parameter in 2018 erneut zu untersuchen.

Das Umweltbundesamt geht davon aus, dass die Entwicklung der Bewertungsgrundlage für zementgebundene Werkstoffe noch einige Zeit in Anspruch nimmt. Bis dahin kann die hygienische Bewertung zementgebundener Werkstoffe weiterhin nach dem bewährten DVGW-Arbeitsblatt W 347 (Ausgabe 2006) erfolgen.

## 1.7.6 Regelungen AKR in Deutschland und Europa ■

Eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) in Beton kann die Nutzungsdauer, die Gebrauchstauglichkeit und in seltenen Fällen die Tragsicherheit verringern. Betone nach EN 206-1 müssen daher über die Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren (Nutzungsdauerklasse 4 gemäß DIN EN 1990) einen ausreichend hohen AKR-Widerstand aufweisen. Die dafür erforderlichen Regeln sind in Europa bisher national festgelegt.

### Situation in Europa

Europäisch existieren bislang keine einheitlichen AKR-bezogenen Expositions- bzw. Feuchtigkeitsklassen, Verfahren zur Prüfung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität von Gesteinskörnungen oder Klassen für deren Kategorisierung. Eine gemeinsame Arbeitsgruppe der europäischen Normungsgremien für Zement, Gesteinskörnungen und Beton (CEN/TC 51, 154 und 104) war zu dem Schluss gekommen, dass AKR-Regelungen aufgrund ihrer nationalen Ausprägung und Vielfalt bislang nicht in den harmonisierten Produktnormen festgelegt werden können (DIN CEN/TR 16349). Europäische AKR-Expositionsklassen wären zukünftig ggf. definierbar. Die national existierenden Klassen sind zum Teil ähnlich.

Die Normung von „low alkali“-Zementen erschien aufgrund der unterschiedlichen nationalen Regelungen bisher nicht möglich. Die Europäische Kommission besteht allerdings darauf, dass mindestens der Alkaligehalt in der zukünftigen europäischen Zementnorm DIN EN 197-1 als wesentliches Merkmal aufgenommen wird (siehe auch Abschnitt 1.7.1). Die Zementhersteller können

Tabelle 1.7.6-1 AKR-Regelungen in Deutschland

Regelungsbereich	Feuchtigkeitsklassen	Regelwerke
Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Ingenieurbauwerke nach ZTV-ING	WO, WF, WA	- DIN EN 1992-1-1 + NA/DIN1045-2 - Alkali-Richtlinie 2013
Ingenieurwasserbauwerke	WF, WA	- Erlass WS 12/5257.6/2 für den Geschäftsbereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) - Alkali-Richtlinie 2013
Bahnschwellen	WA	- DB Standard 918 143 in Kombination mit Alkali-Richtlinie 2013
Fahrbahndecken aus Beton nach ZTV Beton-StB 07	WA	- TL Beton-StB 07 in Kombination mit Alkali-Richtlinie 2013
	WS	- TL Beton-StB 07 - Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 04/2013
Flugbetriebsflächen	ähnlich WS	- Festlegungen werden in Ausschreibungen festgelegt; i. d. R. Nachweis eines ausreichend hohen AKR-Widerstands des Betons durch AKR-Performance-Prüfung mit einer Alkalizufuhr durch enteisungsmittelhaltige Lösungen

dann den Alkaligehalt ihrer Zemente angeben, wenn dies für die jeweilige Anwendung des Zements relevant ist. Nationale Regeln zur Vermeidung einer schädigenden AKR, beispielsweise die deutsche Alkali-Richtlinie, könnten sich zukünftig auf die Angaben der Hersteller zum Alkaligehalt der Zemente beziehen. Die nationale Definition von „low alkali“-Zementen wäre weiterhin möglich.

CEN/TC154 (Gesteinskörnungen) kündigte an, das wesentliche Merkmal „Alkali-Kieselsäure-Reaktivität“ von Gesteinskörnungen in der harmonisierten DIN EN 12620 durch Angabe der aus Gesteinskörnungen freisetzbaren Alkalien abschließend regeln zu wollen. AKR-vorbeugende Maßnahmen aufbauend auf dieser Information könnten ggf. in der EN 206 und den nationalen Anwendungsdokumenten festgelegt werden. Diese Entwicklung ist aufmerksam zu beobachten und zu begleiten, damit europäische Festlegungen mit den in Deutschland seit Jahrzehnten bewährten Regelungen kompatibel bleiben.

### Bauteile aus Stahl- und Spannbeton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2

In Deutschland ist bei Bauteilen aus Stahl- und Spannbeton nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 die „Alkali-Richtlinie“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) anzuwenden, um einen ausreichend hohen AKR-Widerstand von Bauteilen zu erzielen und AKR-Schäden zu vermeiden. Die Richtlinie regelt, wie Gesteinskörnungen zu prüfen und in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse einzustufen sind. Außerdem legt sie mit den AKR-vorbeugenden Maßnahmen deskriptive Vorgaben an die Betonzusammensetzung fest. Die ggf. zu ergreifenden Maßnahmen hängen von den Umgebungsbedingungen des Betons in Form der Feuchtigkeitsklasse, der Alkaliempfindlichkeitsklasse der Gesteinskörnung und des Zementgehalts des Betons ab. Die Maßnahmen sind:

- Austausch der alkaliempfindlichen Gesteinskörnung
- Reduzierung des Alkaligehaltes der Porenlösung des Betons durch Verwendung eines Zements mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt (Zement nach DIN EN 197-1 mit zusätzlichen Eigenschaften nach DIN 1164-10)

### Betonschwellen

Der DB Standard 918 143 (DBS), Ausgabe Mai 2015 legt zum Thema AKR neben Anforderungen an die Gesteinskörnung und den Zement zusätzlich die Prüfung des Schwellenbetons fest. Der Anhang G des DBS sieht vor, dass für jede Schwellenbetonrezeptur ein ausreichend geringes AKR-Potenzial durch eine AKR-Performance-Prüfung in einem Gutachten nachzuweisen ist. Das Vorgehen und die Verfahren sind vergleichbar mit jenen bei Fahrbahndecken aus Beton. Der Anhang G ist zunächst informativ und soll nach weiteren Prüfungen an Schwellenbetonen 2019 normativ werden.

### Wasserbauwerke

Für den Geschäftsbereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltungen des Bundes (WSV) gelten die Alkali-Richtlinie und der Erlass WS 13/5257.6/2 vom 19.06.2015 als ergänzende Festlegungen. Mit dem Erlass führte das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) für Verkehrswasserbauwerke eigene Maßnahmen ein. Im Vergleich zur Alkali-Richtlinie sind die vorbeugenden Maßnahmen strenger. So muss beispielsweise bei Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S, Bauteilen der Feuchtigkeitsklasse WF und Zementgehalten  $\leq 350 \text{ kg/m}^3$  ein Zement mit der zusätzlichen Eigenschaft „niedriger wirksamer Alkaligehalt“ nach DIN 1164-10 eingesetzt werden.

### Betonfahrbahndecken

Bei Fahrbahndecken aus Beton von Bundesfernstraßen gelten mit dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 04/2013 des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung gesonderte Regeln, um AKR-Schäden zu vermeiden. Verkehrsflächen der Belastungsklassen Bk1,8 bis Bk100 gemäß den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO) 12 sind der Feuchtigkeitsklasse WS zuzuordnen. Es ist entweder ein hoher AKR-Widerstand des Betons durch ein Gutachten, in der Regel durch eine AKR-Performance-Prüfung (Verfahren V1), oder eine geringe Alkali-Kieselsäure-Reaktivität der groben Gesteinskörnungen mit  $d \geq 2 \text{ mm}$  durch eine WS-Grundprüfung (Verfahren V2) nachzuweisen. Beide Verfahren dauern rund 14 Monate.

Nach einer bestandenen Prüfung sind darauf aufbauend Nachweise nach Verfahren V3 wie folgt zu erbringen:

- Rezepturbewertungen durch Prüfung der Betonausgangsstoffe bei Vorliegen einer bestandenen AKR-Performance-Prüfung
- WS-Bestätigungsprüfungen der groben Gesteinskörnung bei Vorliegen einer bestandenen WS-Grundprüfung

In Bayern ist unabhängig von den Verfahren 1 bis 3 auch ein vereinfachter Nachweis mit dem Verfahren 4 möglich (Bekanntmachung IID9-43435-002/08 der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr). Dazu muss der Hersteller erklären, dass mit seiner Gesteinskörnung positive Erfahrungen im Straßenbau in Bayern für die Feuchtigkeitsklasse WS vorliegen. Zusätzlich muss die Gesteinskörnung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I eingestuft sein und jährlich petrografisch und mit dem Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie untersucht werden.

### Flugbetriebsflächen

Bei Flugbetriebsflächen (z.B. Start-, Lande- und Rollbahnen) und Betonfertigteilen, die auf Flughäfen mit flughafenspezifischen Enteisungsmitteln in Kontakt kommen, ist es in Deutschland mittlerweile vielfach üblich, eine AKR-Performance-Prüfung mit Alkalizufuhr von außen durch enteisungsmittelhaltige Lösungen durchzuführen.

## 1.7.7 Brandschutz ■

### Revision der Eurocodes

Die Tragwerksbemessung in Europa erfolgt nach einheitlichen Normen, den so genannten „Eurocodes“. Dies gilt auch für die Heißbemessung, also die Bemessung für den Brandfall.

Im Dezember 2014 erteilte die Europäische Kommission ein Mandat zur „Änderung bestehender Eurocodes und zur Erweiterung des Gegenstands tragwerksrelevanter Eurocodes“ an die europäische Normungsorganisation CEN. Die Veröffentlichung der zu überarbeitenden Eurocodes ist für das Jahr 2020 vorgesehen.

Für die Revision der Eurocodes zur Bemessung von Stahlbeton hat sich das zuständige Normungsgremium CEN/TC 250/SC 2 so organisiert, dass unter einer übergeordneten koordinierenden Arbeitsgruppe (WG 1) mehrere Untergruppen (Task Groups) gebildet wurden, die sich jeweils mit einzelnen Problemstellungen beschäftigen. Die Arbeitsgruppe TG 5 beschäftigt sich mit der Überarbeitung des Eurocodes für die Brandbemessung von Beton. Im Rahmen der europäischen Zusammenarbeit mit der European Concrete Platform (ECP) und CEMBUREAU begleitet die European Cement Research Academy (ECRA) die Arbeiten an den Eurocodes zur Heißbemessung von Beton aktiv in der TG 5. Zudem wird das deutsche Spiegelgremium zur TG 5 von einem VDZ-Mitarbeiter geleitet.

In der TG 5 wurde eine Methode zur Stützenbemessung (Annex C der Norm) in einer Ergänzung zur EN 1992-1-2 durch eine neue Methode ersetzt, nachdem sie als potenziell unsicher eingestuft worden war. Mit Hilfe der neuen Bemessungstabellen können im Gegensatz zu den bisher vorliegenden Methoden zur Stützenbemessung auch Kragstützen für den Brandfall bemessen werden. Die Veröffentlichung der Normergänzung soll im Jahr 2018 erfolgen.

Folgende weitere wichtige Änderungen sind für die Heißbemessung von Stahlbeton (EN 1992-1-2) vorgesehen:

- Die Regelungen zum explosiven Abplatzen von Beton im Brandfall sollen erweitert werden, da die aktuelle Norm hierbei bei laut Ergebnissen aktueller Forschung zu sehr auf den Feuchtegehalt von Beton fokussiert.
- Die thermische Leitfähigkeit von Beton soll in Europa einheitlich geregelt werden.
- Die Regeln zur Bemessung von hochfesten Betonen sollen so ergänzt werden, dass aktuelle Erkenntnisse zur Festigkeitsentwicklung dieser Betone bei hohen Temperaturen Berücksichtigung finden.

## 1.7.8 Verkehrswegebau ■

Das Regelwerk für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton besteht aus den drei Teilen

- TL Beton-StB 07: Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische,
- ZTV Beton-StB 07: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau,
- TP Beton-StB 10: Technische Prüfvorschriften

und wird in den maßgebenden Gremien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) seit Mitte 2014 überarbeitet.

Die Prüfvorschriften sollen zukünftig in einer Loseblattsammlung „Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen Betonbauweisen“ zusammengestellt werden. Dies hat den Vorteil, dass bei einer Änderung des Regelwerks die entsprechende Prüfvorschrift zeitnah ausgetauscht werden kann. Die bisher in den TP Beton aufgeführten Prüfungen werden nach und nach in die Loseblattsammlung überführt. Bei Prüfvorschriften, die noch nicht bearbeitet wurden, enthält die Loseblattsammlung einen Hinweis auf den Abschnitt der TP Beton, der für diesen Fall noch gültig ist.

Die Arbeiten an der ZTV sind am weitesten fortgeschritten. Mit den Arbeiten an der TL Beton wurde 2017 begonnen. Folgende Anforderungen für Fahrbahndeckenzemente werden diskutiert:

Für die Herstellung der Decken sind in der Regel

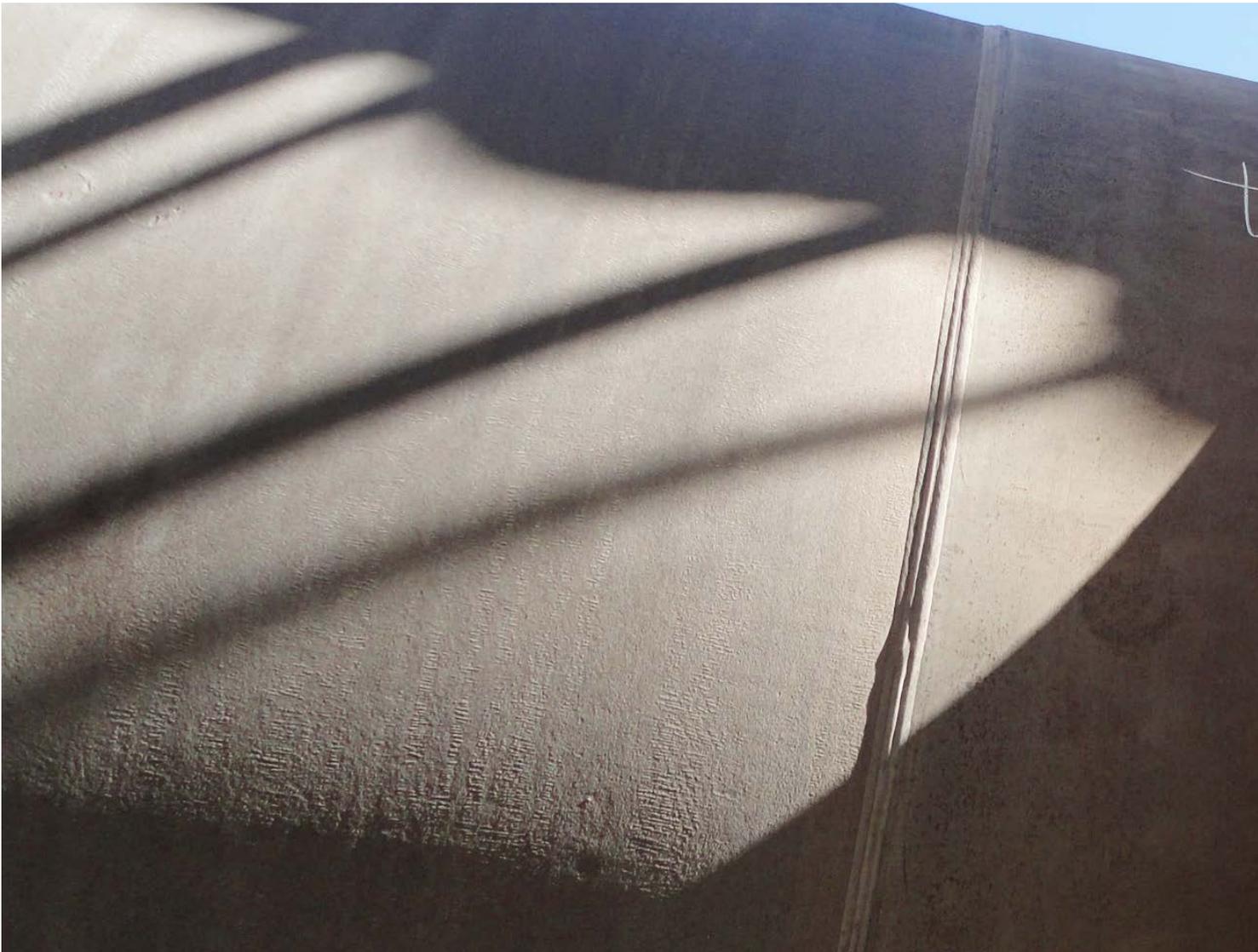
- für den Oberbeton CEM I und CEM II/A-S
- für den Unterbeton CEM I, CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM II/A-LL und CEM III/A

(max. 50 M.-% S) der Festigkeitsklasse 42,5 nach DIN 197-1 zu verwenden. Dabei dürfen sich die Zemente für Ober- und Unterbeton um maximal eine Festigkeitsklasse unterscheiden.

In Abstimmung mit den Bauherren können für den Oberbeton auch Zemente CEM II/B-S, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM II/A-LL und CEM III/A (max. 50 M.-% S) nach DIN 197-1 verwendet werden. In diesem Fall muss der Zement eine Druckfestigkeit nach 2 Tagen bei Prüfung nach DIN 196-1 von mindestens 20 N/mm<sup>2</sup> aufweisen.

# 2

## Leistungsangebote des VDZ





## Leistungsangebote des VDZ

Aufgrund seiner Wurzeln in der Zementindustrie und seines umfangreichen Knowhows ist der VDZ heute auch ein international agierender technisch-wissenschaftlicher Dienstleister für die Zement- und Baustoffindustrie. Von der fundierten Analyse über die kompetente Beratung bis zu komplexen Gutachten bietet der VDZ alle Dienstleistungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Zement und Beton aus einer Hand.

### Umwelt und Betriebstechnik

Das Leistungsspektrum des VDZ umfasst alle Untersuchungen und Beratungsleistungen der thermischen und mechanischen Verfahrenstechnik. Seine erfahrenen Experten optimieren Prozesse, verbessern die Leistungsfähigkeit und die Effizienz von Anlagen und bewerten die Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit der Produktionsprozesse.

### Chemie und Mineralogie

Der VDZ ist ein anerkannter Spezialist für die Analyse und Charakterisierung von anorganisch-mineralischen Stoffen und die Optimierung der Laborarbeiten in der Zementindustrie. Die Mitarbeiter des VDZ beraten bei der Auswahl von geeigneten Einsatz- und Brennstoffen und helfen, Zemente und die damit hergestellten zementgebundenen Bauprodukte zu optimieren.

### Beton und Ausgangsstoffe

Das akkreditierte Betonlabor des VDZ bietet alle wichtigen Prüfungen an Frisch- und Festbeton sowie Betonausgangsstoffen. Darüber hinaus führen die VDZ-Experten Zulassungsprüfungen durch, verfassen komplexe Schadensgutachten und bewerten die Umweltverträglichkeit von Produkten.

### Zertifizieren und Verifizieren

Die Zertifizierungsstelle FIZ-Zert der FIZ GmbH zertifiziert Managementsysteme nach ISO 9001, ISO 14001, ISO 50001 und OHSAS 18001 bzw. ISO 45001. FIZ-Zert ist durch die Deutsche Akkreditierungsstelle nach ISO 17021 akkreditiert.

### Produktzertifizierung

Traditionell gehört die Überwachung und Zertifizierung von Zementen und weiteren Bauprodukten zu den Kernkompetenzen des VDZ. Die Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle ist nach ISO 17025 (Bauwesen) und EN 45011 akkreditiert.

### Messungen und Analytik

Die FIZ GmbH ist durch die Deutsche Akkreditierungsstelle nach ISO 17025 (Immissionsschutz) akkreditiert. Die FIZ GmbH ist zudem als offiziell anerkannte, unabhängige Messstelle nach §29b BImSchG, 13. BImSchV, 17. BImSchV sowie TA Luft amtlich bekanntgegeben. Zum Kern des Angebotes gehören sowohl qualifizierte und verlässliche Umweltmessungen als auch die Kalibrierung und Funktionsprüfung von Emissionsmessgeräten.

### Weiterbildung

Seit mehr als 60 Jahren unterstützt der VDZ die Unternehmen der Steine-Erden-Industrie bei der Qualifizierung von Mitarbeitern. Neben dem Industriemeisterkurs bietet der VDZ mittlerweile zahlreiche weitere Lehrgänge, Seminare und Onlinekurse sowie kundenspezifische Trainings in verschiedenen Sprachen weltweit an.

## 2.1 Umwelt- und Verfahrenstechnik

Im Bereich der Umwelt- und Betriebstechnik umfasst das Leistungsspektrum des VDZ alle Untersuchungen der thermischen und mechanischen Verfahrenstechnik sowie Untersuchungen zu den Ursachen und zur Minderung von Emissionen im Zementwerk. Der VDZ übernimmt die vollständige Planung und Organisation von Werksversuchen sowie deren Abwicklung und Auswertung. Daher können auch komplexe umwelt- und verfahrenstechnische Fragestellungen bearbeitet werden.

### Technische Audits und Energie-Audits

In den vergangenen Jahren hat der VDZ eine Vielzahl von Ofen- und Mühlenaudits im In- und Ausland durchgeführt. Auf Basis dieser Erfahrungen bietet der VDZ standardisierte Audits mit unterschiedlicher Detailtiefe an:

- A-Level-Audit:  
Begutachtung basierend auf Informationen, die in der Anlage verfügbar sind
- B-Level-Audit:  
Begutachtung basierend auf Informationen, die in der Anlage verfügbar sind und Vor-Ort-Inspektion
- C-Level-Audit:  
Komplexe Messungen vor Ort und Ergebnisanalyse (Massen- und Volumenströme, Emissionen, Korngrößenverteilung usw.)

Im Rahmen der Audits werden Themen und Problemstellungen wie die Feuerungstechnik für alternative Brennstoffe und deren Auswirkungen auf den Ofenbetrieb, die Verminderung von Stoffkreisläufen, primäre und sekundäre Maßnahmen zur Emissionsminderung, die Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, die verfahrenstechnische Modellierung von Ofen- und Mahlanlagen sowie die betriebstechnische Optimierung behandelt. Diese technischen Audits werden den jeweiligen Kundenwünschen und Anlagenanforderungen angepasst.

### Umweltechnik

Die Mitarbeiter des VDZ verfügen über umfassende und langjährige Erfahrungen im Genehmigungsmanagement bei Anlagen der Zement- und Kalkindustrie. Zusammen mit den aktuellsten zementspezifischen Kenntnissen aus Wissenschaft, Beratung und Forschung bietet dies die Grundlage für die Beratungstätigkeit des VDZ im Bereich der Umweltverträglichkeit. So übernimmt der VDZ für seine Kunden neben der Erstellung von Umweltgutachten auch die Erarbeitung und Prüfung von Genehmigungsanträgen sowie die vollständige Begleitung und Beratung bei immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren. Dank der kontinuierlichen Mitarbeit an aktuellen Forschungsvorhaben und der regelmäßigen Teilnahme an Schulungen und Arbeitskreisen wird dabei stets der aktuelle Stand des Wissens zugrunde gelegt.

Die Unterstützung des Kunden erfolgt in den Teilbereichen:

- Begleitung bei immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren
- Ermittlung und Beurteilung emissions- und immissionsseitiger Auswirkungen eines Projektes
- Bestimmung der chemischen und physikalischen Eigenschaften der relevanten Einsatzstoffe

Ergänzend zu den Leistungen des VDZ bietet die akkreditierte Messstelle der FIZ GmbH hinaus die Durchführung von

Emissions- und Immissionsmessungen an (siehe Abschnitt 2.6). Im Bereich Klimaschutz/Energie- und Ressourceneffizienz erweitert die Zertifizierungsstelle FIZ-Zert der FIZ GmbH das Leistungsspektrum des VDZ in den Bereichen Zertifizierung von Umwelt- und weiteren Managementsystemen sowie durch die Verifizierung von CO<sub>2</sub>-Emissionsberichten (siehe Abschnitt 2.5).

Wichtige Themen in Zeiten steigender Energiekosten und erhöhter Umweltauflagen sind die Minderung von Emissionen und die Reduzierung des thermischen sowie elektrischen Energiebedarfs. Das Dienstleistungsangebot des VDZ umfasst hierzu die nachfolgenden Auftragsuntersuchungen:

- Anlagentechnische Analysen und Bewertungen im Rahmen von technischen Audits (Stand der Technik/Beste Verfügbare Technik, s. o.)
- Empfehlung von Maßnahmen zur Verbesserung der Emissions- bzw. Immissionssituation
- Emissions- und Immissionsprognosen
- Ableitbedingungen von Emissionen/Berechnung der Schornsteinhöhe
- Umweltverträglichkeitsstudien
- Komplexe Ausbreitungsrechnungen
- Betreuung bei Genehmigungsverfahren
- Bodenuntersuchungen
- Studien, z. B. zu den Themen Umweltschutz, Klimaschutz, Energieeffizienz bei der Zementherstellung

### Thermische Verfahrenstechnik

Das VDZ-Leistungsportfolio im Bereich der thermischen Verfahrenstechnik umfasst ein breites Spektrum, von Messungen in Hochtemperaturprozessen über die Beratung zur Prozessoptimierung, Produktqualität, Energieeffizienz sowie zum Einsatz alternativer Brenn- und Rohstoffe bis hin zur verfahrenstechnischen Prozessmodellierung. Die erfahrenen Messtechniker und Ingenieure des VDZ verfügen über umfangreiche, in der Praxis bewährte Kenntnisse insbesondere im Bereich der Zementindustrie, aber auch in anderen Steine- und Erden-Industrien wie z. B. der Kalkindustrie.

Der VDZ führt regelmäßig Projekte zu Messungen und zur Optimierung von industriellen Anlagen durch (z. B. Drehofenanlagen in der Zementindustrie). Im Rahmen von Auftragsforschung und öffentlich geförderten Forschungsvorhaben im Bereich der Zementindustrie arbeitet der VDZ systematisch am besseren Verständnis der verfahrenstechnischen Prozesse und entwickelt seine Methoden kontinuierlich weiter.

Eine regelmäßige Überprüfung des Produktionsprozesses bildet die Grundlage für den Erhalt und die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit. Sie legt offen, inwieweit zukunftsstaugliche Anpassungen der Anlage oder der Einbau neuer Technologien erforderlich sind. Im Bereich Prozessoptimierung bietet der VDZ unter anderem folgende Leistungen an:

- Technische Analyse des Klinkerbrennprozesses bzw. der gesamten Drehofenanlage
- Schwachstellenanalyse
- Chemische und physikalische Analyse aller Materialien in Zusammenarbeit mit dem Bereich Chemie und Mineralogie
- Überprüfung und Optimierung der Klinker- und Zementqualität
- Optimierung von primären und sekundären Maßnahmen zur Emissionsminderung (wie z. B. NO<sub>x</sub>, Quecksilber, SO<sub>2</sub> oder organische Emissionen) und Minimierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen

- Optimierung des Betriebs von Ofenanlagen
- Diagnose und Beratung bei Ansatzbildung

### Mechanische Verfahrenstechnik

Im Bereich der mechanischen Verfahrenstechnik bietet der VDZ seinen Kunden seit jeher eine Vielzahl unterschiedlicher Dienstleistungen an; von der Charakterisierung pulverförmiger Feststoffe über die Durchführung von komplexen Mahl- und Klassierversuchen bis hin zur Optimierung von industriellen Anlagen. Die Labormitarbeiter und Techniker des VDZ verfügen über langjährige Erfahrung mit den teils sensiblen Messverfahren der mechanischen Verfahrenstechnik. Die wichtigsten Analyseverfahren sind akkreditiert und werden regelmäßig durch Ringversuche und interne Qualitätskontrollen überprüft.

Der VDZ bietet die Auditierung und herstellerunabhängige Optimierung von industriellen Mahlanlagen inkl. aller Sub-Systeme an. VDZ-Spezialisten bewerten und optimieren Mahlanlagen zur Zementmahlung, Rohmahlung, Kohlemahlung und weiterer Trockenmahlprozesse in anderen Industriezweigen und schlagen dem Kunden ggfs. ganzheitliche Lösungen vor, die auch die Chemie und Mineralogie von Rohstoff und Produkt mit einbeziehen.

Als wichtigste Optimierungsdienstleistungen sind zu nennen:

- Senkung des spezifischen Energiebedarfs/Verbesserung der Energieeffizienz
- Kapazitätssteigerungen
- Veränderung der Feinheit/Korngrößenverteilung
- Gezielte Beeinflussung der Zementeigenschaften
- Einsatz von Mahlhilfsmitteln
- Senkung von Verschleiß/Erhöhung von Standzeiten
- Planung von mechanischer und verfahrenstechnischer Instandhaltung
- Ganzheitliche Betrachtung von Mahlung und Produktportfolio
- Schwachstellenanalyse („Bottleneck-Analyse“)
- Unabhängige Kostenabschätzungen
- Begleitung von Investitionsprojekten

### Instandhaltung

Präventive Instandhaltung ist zur Gewährleistung eines kontinuierlichen Produktionsbetriebs unverzichtbar. Sie erfordert regelmäßige präzise und zuverlässige Inspektionen und Vermessungen von Drehrohröfen und Kugelmühlen – den Herzstücken der Werke. Das Leistungsangebot des VDZ umfasst hierbei insbesondere die Inspektion und Vermessung von Drehrohröfen, Drehtrocknern, Drehkühlern und Kugelmühlen, die Begutachtung der Mechanik rotierender Anlagen sowie weitere Instandhaltungsaufgaben rund um die Mühlenmechanik (Montageüberwachung, Rissprüfungen, In- und Wiederinbetriebnahmen).

Der VDZ arbeitet für Kunden aus allen Industrien, die rotierende Anlagen betreiben (beispielsweise Zement/Kalk/Gips, Chemie, Düngemittel, Holz, Papier, Lebensmittel, Zucker oder Raffinerien) und bietet für jede Anlage ein spezifisches Dienstleistungsportfolio an, aus dem einzelne Bausteine nach Kundenbedarf zusammengestellt werden können. Alternativ wird auch ein komplett maßgeschneiderter Service geliefert.

### Unregelmäßigkeiten im Betrieb

Im laufenden Betrieb von Drehrohröfen treten immer wieder zahlreiche Probleme auf, die einen geregelten Fortgang der Produktion gefährden und somit Instandhaltungsarbeiten erfordern. Hierzu zählen etwa Schwierigkeiten mit der Ausmauerung oder

der Lauftringbefestigung, Taumelschlag sowie Unrundheit. Zudem kann es zu einem ungleichmäßigen Tragbild zwischen Lauftring und Laufrollen kommen. Ferner sind Risse/Materialbrüche an Lauftringen, Laufrollen, am Zahnkranz, am Ofen-/Mühlenmantel sowie an der Mühlenstirnwand möglich. Darüber hinaus kann der Anlagenantrieb gestört sein. Dies zeigt sich etwa durch ei-

ne hohe Stromaufnahme am Antrieb, „Schlagen“ des Antriebs (Zahnkranz/Ritzel) oder unnatürliche Vibrationen an der Anlage. Weitere Problemfelder sind die ungleichmäßige Abnutzung von Laufrollen bzw. Lauftring, ausbleibendes „Schwimmen“ der Anlage auf den Laufrollen/der Anlagenlängsführung, „Heißläufer“ an den Laufrollen sowie das Abheben des Lauftrings von einer

### Technische Audits in der Praxis

Technische Audits haben eine große Bedeutung für die Evaluierung von Zementwerken. Abhängig von den Erfordernissen der Anlagen oder den Anforderungen des Kunden können die Audits entsprechend angepasst werden. In den vergangenen Jahren lag der Fokus dabei vermehrt auf Energieaudits, da weltweit die Zementwerke sowohl auf der thermischen Seite als auch auf der elektrischen Energieseite großes Einsparpotential sehen bzw. sahen. Bei diesen Audits zeigte sich tatsächlich, dass in vielen Zementwerken Einsparpotentiale vorhanden waren. Der VDZ konnte entsprechende Optimierungsmaßnahmen vorschlagen, die zum Teil ohne größere Investitionen realisiert werden konnten; in solchen Fällen amortisieren sich Energieaudits schnell. Zu allen Audits wird ein detaillierter Bericht erarbeitet, der mit dem Betreiber des Werks im Detail erörtert wird. Im Bericht befindet sich auch eine anlagenspezifische Auflistung von Maßnahmen, die durchgeführt werden sollten, um die Einsparpotenziale realisieren zu können.

In einem Werk eines führenden Zementherstellers konnte vom VDZ während des Energieaudits ein Einsparpotenzial von ca. 2,50 Euro pro Tonne Zement identifiziert werden. Davon entfielen ca. 1,00 Euro auf Einsparpotenziale ohne Investitionen und ca. 1,50 Euro auf Einsparpotenziale, die vertretbare Investitionen benötigten. Dies zeigt, dass sich Energieaudits selbst bei kleinen Zementwerken schnell amortisieren können.

In einem auditierten Werk wurde Schritt für Schritt, beginnend vom Steinbruch bis zur Verladung, jede Abteilung für sich vom VDZ bewertet und im Detail untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass ca.  $\frac{2}{3}$  des Energieeinsparpotenzials auf der Brennstoffseite lagen und ca.  $\frac{1}{3}$  auf der elektrischen Seite. Die Ergebnisse wurden mit der Werksführung diskutiert und mögliche Maßnahmen zum Erreichen der Einsparpotenziale diskutiert und abgestimmt.

In einem anderen Werksaudit wurden von den Experten des VDZ auch Energieoptimierungsmaßnahmen aufgezeigt, die im Rahmen der allgemeinen routinemäßigen Instandhaltung durchgeführt werden können. Oft sind es Schäden an Einlaufdichtungen oder am Stahlgehäuse des Wärmetauschers, aber auch betriebliche Unzulänglichkeiten, die zu einem erhöhten Wärmebedarf führen. Verbesserungsmaßnahmen können beispielsweise das Identifizieren von Falschluchtquellen sein, aber auch die allgemeine Fahrweise des Ofens/Kühlers, oder die Optimierung der Ofenmehl-/Heißmehlqualität. Die Summe aller einzelnen Optimierungsmaßnahmen führt dann zu einer deutlichen thermischen und elektrischen Energieeinsparung.

Mit gezielten instandhalterischen Optimierungsmaßnahmen kann auch elektrische Energie eingespart werden. Dabei werden elektrische Steuerungen und Regelungen optimiert, wie z.B. das korrekte Abschalten von Anlagenteilen oder das Optimieren von Druckregelkreisen bei Ofen- und Mahlanlagen. Arbeiten, die durch Prozessoptimierungen anfallen, wie z.B.

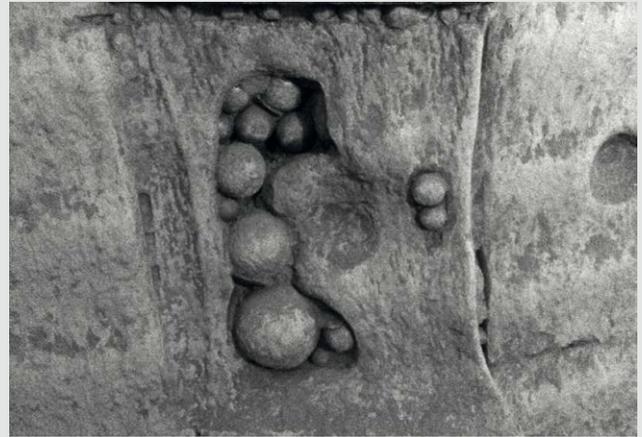


Bild 2.1-1 Schäden an der Panzerung



Bild 2.1-2 „Verpelzte“ Mühle

der Austausch von Mühlenpanzerungen oder die Instandsetzung von Zwischen- oder Austragswänden, können ebenfalls zur Reduktion elektrischer Energie führen.

Im Rahmen eines Mühlenaudits fiel z.B. auch eine „verpelzte“ Mühle auf, die sowohl Schäden an der Panzerung als auch eine „verstopfte“ Austragswand offenbarte (Bilder 2.1-1 und 2.1-2). Diese trivial zu erkennenden Merkmale einer schlecht laufenden Mühle bargen aber ein komplexes Problem, das beispielhaft für die Optimierung von Mühlen steht: Messungen in der Mühle zeigten, dass die Mühlentemperatur als Resultat der verstopften Mühle zu hoch war und so zur Verpelzung der Mühle führte. Das Verstopfen der Austragswand konnte jedoch nicht auf Anhieb geklärt werden, da die Herkunft des verwendeten Eisenschrotts unklar war. Im Verdacht stand eine fehlerhafte Mahlkugelcharge, bei der die Kugeln im Betrieb platzten. Als erste Maßnahmen wurden daher zunächst die Mühle gestürzt, die Austragswand von dem Schrott befreit und die Mühle neu gattiert. Der Mühlenzug war allerdings auch nach dem Gattieren noch zu niedrig, eine Reduktion der Mühlentemperatur daher nur bedingt möglich. Mit weiteren prozesstechnischen Optimierungen wurde der Betriebszustand der Mühle stabilisiert.

Laufrolle. Möglich sind auch Deformationen am Anlagenmantel (z. B. ein „Bananeneffekt“) sowie eine hohe Mantelexzentrizität am Ofenein- bzw. -auslauf.

#### Prüfleistungen des VDZ

Der VDZ übernimmt bei Mahlanlagen für seine Kunden anlagenspezifische Komplettinspektionen und symptombezogene Individualmessungen. Dabei werden je nach Bedarf verschiedenste Prüfleistungen erbracht:

- Geometrie der Lagerstationen
- Thermoprofil des Mühlenmantels/Infrarot-Profil
- Taumelschlag und Unrundheit von Lauftringen, Mühlenflanschen und Zahnkränzen
- Unrundheit von Laufrollen, Lagerzapfen und Halslagern
- Temperaturprofil von Zahnkranz und Ritzel
- Kopfspielmessung zwischen Zahnkranz und Ritzel
- Vibrations- und Thermomessungen, z. B. am Mühlenantrieb (Motor/Getriebe)
- Wandstärkenmessung am Mühlenmantel/Stirnwand
- Wandstärkenmessung an anderen Bauteilen bis 200 mm
- Härtemessung von Bauteilen nach HB, HRB, HRC, HSD, HV
- Rauheitsmessungen nach den Prüfverfahren Ra, Rz, Rq und Rt, z. B. an Lagerwellen

#### Weitere Dienstleistungen zur Mechanik rotierender Anlagen

Die gewonnenen Daten der Vermessung und Inspektion der Anlage können ein sofortiges Handeln erforderlich machen, um Schäden abzuwenden. Hier hat sich der zuverlässige individuelle Service des VDZ bewährt:

- Visuelle Inspektion der Anlage
- Begutachtung/Bewertung der Anlagenmechanik
- Detaillierte Analyse und Bericht der Vermessungsdaten inkl. Bewertung und Empfehlungen für einen weiterhin stabilen Anlagenbetrieb
- Justierung der Rotationsachse
- Kontrolle und Justierung der „Laufrollenschränkung“, der Anlagenbalance und der Tragbilder von Zahnkranz und Ritzel
- Mechanische Bearbeitung der Tragflanken von Zahnkranz und Ritzel
- Inspektion der Zahnkranz/Ritzel-Schmierung auf Funktion, Schmierstoffmenge und Sprühbild
- Rissprüfung Rot/Weiß
- Begleitende Montageüberwachung
- Begleitende Inbetriebnahme von Neuanlagen oder bei Wiederinbetriebnahme nach Reparaturen
- Ausarbeiten von anlagenspezifischen Servicechecklisten
- Schulungen, Training

#### Praxisbeispiel: Instandhaltung einer Kugelmühle

Die Instandhaltungsexperten des VDZ haben es bei ihren regelmäßigen Inspektionen und Vermessungen von Drehrohröfen und Kugelmühlen bisweilen mit wahren „Langläufern“ zu tun. Hierzu zählt auch die im Jahr 1959 in der DDR gebaute Kugelmühle des VEB Schwermaschinenbau Ernst Thälmann, Magdeburg. Man findet sie selten, doch mancherorts sind sie auch nach fast 60 Jahren Betriebszeit noch im Einsatz (**Bild 2.1-3**).

Die Leistungsdaten der Kugelmühle sind beachtlich: Motorisiert mit 1000 kW (19,7 U/min), schafft sie bei einer Länge von 13000 mm und einem Durchmesser von 2600 mm eine Kapazität von 20 Tonnen pro Stunde. Wäre eine solche Mühle in ihren 58 Betriebsjahren an 300 Tagen im Jahr jeweils 24 Stunden pro Tag mit 19,7 Umdrehungen in der Minute in Betrieb gewesen, hätte sie rund 8,4 Millionen Tonnen Zement produziert. Bauteile wie Halslager, Mühlenkörper und Stirnwände kämen dann auf mittlerweile 450 Millionen Umdrehungen.

Nach derart langen Betriebszeiten werden Instandhaltungsarbeiten mehr und mehr zu einer unlösbaren Aufgabe. Ob und wie lange die Mühle noch weiter betrieben werden kann, hängt aber nicht nur von der Beschaffung von Ersatzteilen ab. Vielmehr treten grundsätzliche Fragestellungen in den Vordergrund, etwa im Hinblick auf die Mühlenkapazität, Verfügbarkeit, Energieeffizienz und Mahlqualität. Diese Fragen müssen im Rahmen einer Mühleninspektion beantwortet werden.

Weitere Informationen zum Thema Instandhaltung sind auf den Webseiten des VDZ abrufbar.

<https://www.vdz-online.de/instandhaltung>



**Bild 2.1-3** Arbeiten an der Kugelmühle aus dem Jahr 1959

## 2.2 Chemie und Mineralogie

Der VDZ verfügt über ein leistungsstarkes nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflabor mit qualifiziertem Personal und einer umfangreichen apparativen Ausstattung. So können Untersuchungen durchgeführt werden, die dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechen. Der VDZ bietet im Bereich der Chemie und Mineralogie Dienstleistungen an, die alle wichtigen Untersuchungen zur Stoffcharakterisierung sowie verschiedenste Beratungsleistungen bis hin zu komplexen Gutachten umfassen.

### Stoffcharakterisierung

Der VDZ ist seit Jahren führend bei der Analyse und Charakterisierung von anorganisch-mineralischen Stoffen, von Einsatz- und Brennstoffen der Steine-Erden- und Zementindustrie sowie von Zementen und den damit hergestellten Bauprodukten. Die Bandbreite der Stoffe, die mit Hilfe von physikalischen, chemischen und mineralogischen Untersuchungen analysiert werden, umfasst:

- Zement (Hauptbestandteile: Portlandzementklinker, Hüttensand, Puzzolane, Trass, Flugasche, gebrannter Schiefer, Kalkstein, Silcastaub; Nebenbestandteile; Sulfatträger: Gips, Anhydrit; Zusätze), Rohmehl, Ofenstaub, weitere Bindemittel
- Mineralische Rohstoffe (z. B. Tone, Mergel) und Gesteinskörnungen (Sand, Kies, Splitt)
- Kalk und Kalkprodukte
- Zusatzmittel und Zusatzstoffe für Beton und Mörtel, Pigmente
- Mörtel und Beton
- Fossile und alternative Brennstoffe

Zur Analyse der Stoffe bietet der VDZ zahlreiche physikalische, chemische und mineralogische Untersuchungen an, mit deren Hilfe die normativ erforderlichen Kenngrößen bestimmt werden können. Beispielhaft seien hier die folgenden Methoden erwähnt, denen während der letzten Jahre ein besonderes Interesse galt und bei denen der VDZ über eine besondere Expertise verfügt.

### Hydratationswärmebestimmung mittels isothermer Wärmeflusskalorimetrie

Der VDZ hat während der letzten Jahre maßgeblich dazu beigetragen, die isotherme Wärmeflusskalorimetrie als neue Referenzmethode zur Bestimmung der Hydratationswärme freisetzung zu etablieren. Im Vergleich zur bisher eingesetzten Normmethode, der Lösungskalorimetrie, bietet die isotherme Wärmeflusskalorimetrie zwei wesentliche Vorteile. Zum einen muss nicht mehr mit gefährlichen Säuren hantiert werden. Zum anderen liefert die Methode neben dem gewünschten Endwert auch den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzung.

### Bestimmung von Spurenelementen

In den letzten Jahren sind zunehmend anspruchsvollere Bewertungsmaßstäbe für die Konzentrationen von so genannten „Spurenelementen“ in Emissionen, Abfällen oder Bauprodukten herangezogen worden. Insofern hat auch die Bedeutung der anorganischen Spurenanalytik weiter zugenommen. Mit den Methoden der ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) und AAS (Atom Absorption Spectrometry) können diese vom VDZ mit immer höherer Genauigkeit bestimmt werden. Allerdings setzt dies voraus, dass Matrixeffekte usw. berücksichtigt werden und es im Zusammenhang mit der Probenaufbereitung nicht zu nachträglichen Kontaminationen kommt.

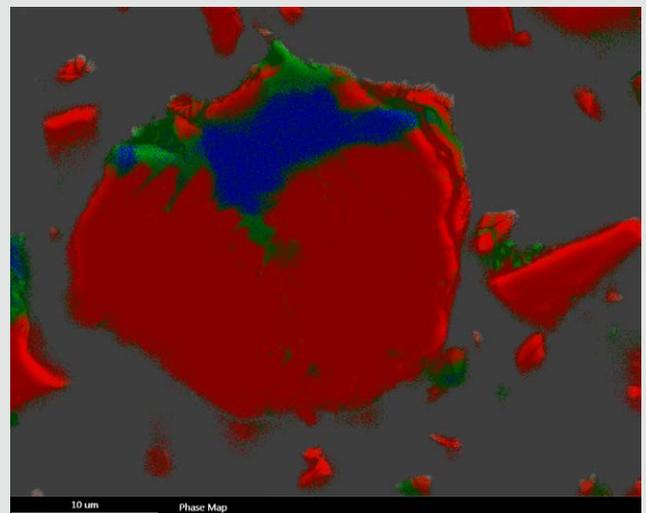
### Neues Rasterelektronenmikroskop (REM)

Anfang 2017 wurde im VDZ ein neues leistungsfähiges Rasterelektronenmikroskop vom Typ Zeiss GeminiSEM 300 (**Bilder 2.2-2 und 2.2-3**) in Betrieb genommen. Es ersetzt das bisherige „ESEM“, das nach rund 20 Jahren außer Dienst gestellt wurde. Zu dem REM gehört auch ein neues energiedispersives Röntgenspektrometer (EDX) vom Typ EDAX Octane Elite, bei dem der Detektor ohne Flüssigstickstoff betrieben werden kann. Möglich wurde die Neuanschaffung durch die Unterstützung der Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff-Stiftung.

Mit dem Inlens SE Detektor des REM können im Hochvakuumbetrieb auch bei relativ niedrigen Elektronenenergien



**Bild 2.2-2** Rasterelektronenmikroskop vom Typ Zeiss GeminiSEM 300



**Bild 2.2-3** REM-Aufnahme mit überlagerter farblicher Phasenzuordnung am Beispiel von Zementpartikeln

Höchstaufösungen erreicht werden. Insbesondere bei der Abbildung von wasserreichen Hydratationsphasen, die empfindlich auf höhere Elektronenenergien reagieren, ist dies von großem Vorteil. Durch den leistungsstarken EDX-Detektor wird für die Erstellung von Elementverteilungsbildern deutlich weniger Zeit als beim vorherigen System benötigt. Auch lassen sich aus den Elementverteilungsbildern mit der zugehörigen Software Phasenverteilungsbilder generieren. Diese sollen zukünftig verstärkt für eine quantitative Analyse von Klinker-, Mörtel- und Betonproben genutzt werden.

### Quantitative Röntgendiffraktometrie

Die Bedeutung der mineralogischen Zusammensetzung vieler Stoffe nimmt immer mehr zu. Bei deren Bestimmung, beispielsweise der verschiedenen Modifikationen von Klinkerphasen oder der komplexen Bestandteile von Bypassstäuben, hat sich die quantitative Röntgendiffraktometrie mittels Rietveld-Auswertung bewährt. Der VDZ verfügt über ausreichende Erfahrung und Sachkenntnis, um die Rietveld-Auswertung fachlich korrekt durchzuführen und die Ergebnisse sinnvoll interpretieren zu können.

### Mikroskopische Untersuchungen

Sowohl die Lichtmikroskopie als auch die Rasterelektronenmikroskopie sind Werkzeuge, die bei speziellen Problemen und Fragestellungen herangezogen werden. Der Blick auf das Mikrogefüge von Klinkern, Mörteln und Betonen ermöglicht oftmals eine Beurteilung, die über das hinausgeht, was mit den chemischen Methoden möglich ist. Durch seine moderne technische Ausstattung und die langjährigen Erfahrungen mit mikroskopischen Untersuchungen kann der VDZ für seine Kunden beispielsweise Element- und Klinkerphasenverteilungsbilder erstellen und sie bei der Interpretation der Ergebnisse unterstützen (siehe Box „Neues Rasterelektronenmikroskop“).

### Beratung und Produktoptimierung

Der VDZ berät seine Kunden in Fragen der Produktoptimierung, unterstützt Unternehmen bei der Erfassung und Bewertung des Status quo im Werk und prüft Einflüsse der Brenn- und Kühlbedingungen sowie der Roh- und Brennstoffe auf die Klinkereigenschaften. Er führt im Kundenauftrag z. B. Untersuchungen zum Sulfatwiderstand und zur Leistungsfähigkeit von Zementen und Zementbestandteilen sowie zur Wirksamkeit von Chromatreduzierern durch. VDZ-Experten auditieren Werkslabore, begleiten die Planung, Ausführung und Auswertung von Betriebsversuchen und führen Vorversuche zur Erlangung von Zulassungen durch. Im Rahmen der Produkt- und Prozessoptimierung bietet der VDZ seinen Kunden darüber hinaus zahlreiche weitere Untersuchungen an:

- Charakterisierung von Portlandzementklinkern (Einflüsse der Brenn- und Kühlbedingungen und alternativer Roh- und Brennstoffe)
- Ansatzbildung in Zement- oder Kalköfen
- Sulfatoptimierung von Zementen (Erstarrungsverhalten/Festigkeiten/Wechselwirkungen mit Zusatzmitteln)
- Wirksamkeit von Chromatreduzierern
- Charakterisierung neuer Bindemittel
- Leistungsfähigkeit von Zementen (z. B. Sulfatwiderstand) und einzelnen Zementbestandteilen
- Hydratationsverhalten von zementhaltigen Bindemitteln
- Wirkungsweise von Betonzusatzmitteln
- Hygienische Eigenschaften zementgebundener Baustoffe (z. B. im Trinkwasserbereich)

Der VDZ unterstützt seine Kunden bei der Zulassungsprüfung zur Erlangung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, beispielsweise als SR-Zement. In diesem Rahmen führt er Vorversuche zur Erlangung von Zulassungen durch, in denen z. B. anhand hydratationsgradbasierter Kennwerte eine Vorhersage der Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons vorgenommen wird. Die Planung, Ausführung und Auswertung von Betriebsversuchen zur Erlangung von Zulassungen sowie die Begleitung der baupraktischen Einführung der Produkte sind ebenfalls Gegenstand der VDZ-Leistungen.



Bild 2.2-1 VDZ-Referenzzemente

### VDZ-Referenzmaterialien für die Laborpraxis

Die Referenzmaterialien des VDZ bieten Laboren die Möglichkeit, ihre Analysenqualität anhand bekannter Materialien zu prüfen. Aktuell sind drei Referenzzemente für die Zementanalytik, ein Referenzmaterial für die Bestimmung des Chlorgehaltes und des Heizwertes in Sekundärbrennstoffen sowie ein Referenzzement zur Bestimmung des wasserlöslichen Chromatgehalts bzw. auch ein AKR-Prüfzement verfügbar.

#### Referenzzemente VDZ100, VDZ200, VDZ300

Die Referenzzemente VDZ100 (CEM I), VDZ200 (CEM II/B-M (S-LL)) und VDZ300 (CEM III/B) wurden in einem Ringversuch des VDZ-Ausschusses Zementchemie und dessen Arbeitskreisen charakterisiert. Jeder dieser Zemente kann in Einheiten von rd. 200 g bezogen werden. Neben den Mittelwerten werden die Vergleichsstandardabweichungen des Ringversuches sowie die daraus abgeleiteten Unsicherheiten der Referenzwerte geliefert. Es sind folgende Referenzwerte verfügbar:

- Röntgenfluoreszenzanalyse
- Nasschemische Analysen nach DIN EN 196-2
- Freikalkgehalt
- Spurenelemente
- Phasenzusammensetzung mittels Röntgenbeugung und Rietveld-Analyse
- Korngrößenverteilung
- Oberfläche nach Blaine
- Dichte

#### Referenzmaterial zur Chlor- und Heizwertbestimmung

In Zusammenarbeit mit der Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e. V. (BGS) wurde vor einigen Jahren ein Ringversuch durchgeführt. Dabei bestimmten 43 Prüflaboratorien den Chlorgehalt und den Brennwert eines als Referenzmaterial vorgesehenen Kunststoffes. Bei dem Material handelt es sich um ein Polymer, dem durch gezielte Zugabe von PVC Chlor in definierter Menge homogen zudosiert wurde. Der mittlere Chlorgehalt des Referenzmaterials liegt bei rd. 0,8 M.-%, der mittlere Brennwert beträgt 39 200 kJ/kg. Dieses Material ist in Einheiten von rd. 180 g erhältlich.

#### Referenzzement zur Bestimmung wasserlöslichen Chromats

Der Arbeitskreis Analytische Chemie initiierte einen Ringversuch zur Erprobung eines Referenzzementes zur Bestimmung des wasserlöslichen Chromatgehaltes. An diesem Ringversuch nahmen 20

Labore der Zementindustrie teil. Bei dem ausgewählten Material handelt es sich um einen Portlandzement, der keine Nebenbestandteile hat und dem kein Chromatreduzierer zugesetzt wurde. Der Zement wird unter Luftabschluss gelagert und sein Chromatgehalt regelmäßig bestimmt. Der mittlere wasserlösliche Chromatgehalt des Referenzzementes gemäß DIN EN 196-10 beträgt rd. 6,8 ppm.

**AKR-Prüfzement nach Alkali-Richtlinie**

Für Prüfungen zur Bestimmung der Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen nach der Alkali-Richtlinie des Deutschen Aus-

schusses für Stahlbeton (DAfStb), Anhang B und C, ist AKR-Prüfzement mit einem hohen Alkaligehalt zu verwenden. Um bei diesen Bestimmungen Schwankungen zwischen den Laboren zu reduzieren, sollen alle Prüflabore den gleichen Zement verwenden. Der VDZ stellt deshalb einen einheitlichen AKR-Prüfzement (**Bild 2.2-1**) sowie Informationen zu den Zementeigenschaften und Hinweise zur Verwendung zur Verfügung.

Die Informationen zu den Referenzmaterialien sind auf der Webseite des VDZ unter <https://vdz.info/rqpt4> abrufbar.

**Praxisbeispiel Revision der Röntgenanalytik im Werkslabor**

Um die Produktion im Zementwerk auf einem hohen Qualitätsniveau zu halten, ist eine präzise Analytik im Werkslabor notwendig. Regelmäßige Überprüfungen der Analysemethoden durch Experten des VDZ helfen den Unternehmen dabei, weitere Optimierungspotenziale in der Laborpraxis aufzudecken.

**Regelmäßige Überprüfung bei RFA und RBA**

Zur Steuerung der Materialströme in der Zementproduktion werden chemische und mineralogische Analysen an den Ausgangsstoffen sowie den Zwischen- und den Endprodukten durchgeführt. Dabei kommen automatisierte Messmethoden wie die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) oder die Röntgenbeugungsanalyse (RBA) zum Einsatz.

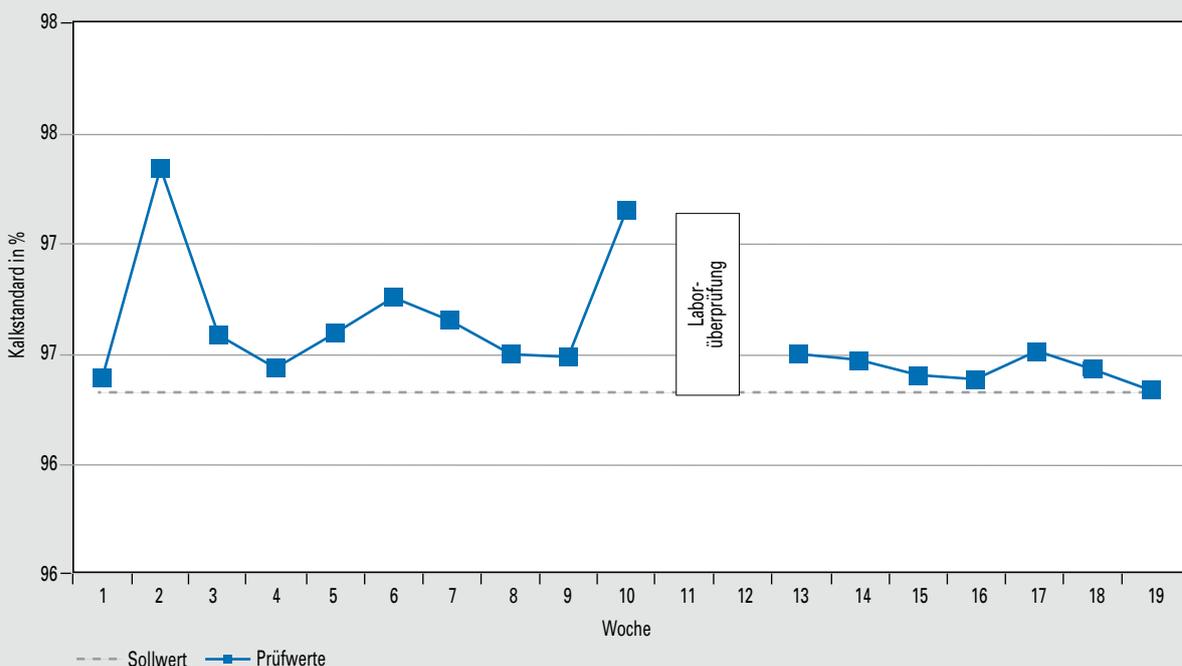
Für präzise Analyseergebnisse mit RFA und RBA ist jedoch nicht nur die Pflege und Wartung der Messgeräte wichtig, sondern auch die regelmäßige Überprüfung und Anpassung der Kalibrierungs- und Auswerteroutinen. Im Kundenauftrag untersucht und optimiert der VDZ in den Werkslaboren diese Routinen. Dabei werden in der Praxis mitunter jahrelang unveränderte Kalibrierungen sowie RBA-Phasenanalysen mittels einer damals vom Gerätehersteller definierten Auswertedatei

gefunden. Änderungen in den Ausgangsstoffen oder der Produktpalette können dadurch von den untersuchten Laboren teilweise nicht korrekt oder im schlimmsten Fall gar nicht berücksichtigt werden.

Die Erfahrungen des VDZ aus zahlreichen Projekten zeigen, dass sich gerade bei Routineanalysen Fehlerquellen einschleichen. Die Labormitarbeiter müssen dann besonders für Fragen der richtigen Probenahme und -aufbereitung sowie der Analyse sensibilisiert werden. **Bild 2.2-4** zeigt beispielhaft die deutliche Verbesserung der Präzision eines Werkslabors durch eine Laborüberprüfung. Es handelte sich bei der Untersuchung um die regelmäßige Präparation und Bestimmung des Kalkstandards einer Referenzprobe von Rohmehl mittels RFA.

**Unterstützung der Werkslabore**

Der VDZ unterstützt seit vielen Jahren unterschiedlichste Werkslabore erfolgreich bei der Optimierung ihrer Abläufe und Analysemethoden. Ein neuer Schwerpunkt des VDZ sind dabei die röntgenografischen Abteilungen. Dabei wird sowohl der Weg der Proben von der Produktion bis zum Messgerät betrachtet, als auch die Routinen für die Kalibrierungen und Auswertung der Daten. Gemeinsam mit den Laboratorien werden vom VDZ u. a. durch Vergleichsversuche kundenspezifische Verbesserungsmöglichkeiten im Probenlauf bzw. in der Analytik ermittelt und die Labormitarbeiter geschult.



**Bild 2.2-4** Vergleich der Präzision bei der wöchentlichen RFA-Messung des Kalkstandards von Rohmehl vor und nach einer Laborüberprüfung durch den VDZ

## 2.3 Beton und Betonausgangsstoffe

Mit seinem interdisziplinären Team gibt der VDZ im Bereich „Beton und Betonausgangsstoffe“ Antworten auf alle Fragen der Herstellung und Verarbeitung von Beton und Mörtel sowie deren Eigenschaften und Leistungsfähigkeit im Bauwerk. Das Dienstleistungsangebot umfasst alle wichtigen Baustoffprüfungen, die Beratung des Kunden in der Optimierung seiner Produkte sowie komplexe Gutachten zur Vermeidung von Schäden bzw. der Aufklärung von Schadensursachen. Bauherren können den VDZ mit Baustellenaudits sowie mit der sachkundigen Planung im Sinne der Instandsetzungs- bzw. Instandhaltungsrichtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) beauftragen. Die Leistungen umfassen im Einzelnen:

- Prüfungen der Betonausgangsstoffe
- Prüfung von Frischbeton und -mörtel
- Prüfung von Festbeton und -mörtel
- Dauerhaftigkeitsuntersuchungen, Performance-Prüfungen und rechnerische Dauerhaftigkeitsprognose (Lebensdauerbemessung)
- Prüfungen und Gutachten zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)
- Zulassungsverfahren von Bauprodukten
- Begleitung und Überwachung des Einbaus von Beton, Baustellenaudits
- BIM-gestützte Schadensaufnahme und Instandsetzungsplanung, Schadensanalytik, Gutachten
- Digitalisierung von Bestandsbauwerken
- Ökobilanzierung und Nachhaltigkeitsbewertung
- Durchführung von Trainingsmaßnahmen, VDZ-Onlinekurse Betontechnologie

Die Leistungen des VDZ orientieren sich dabei an den Vorgaben nationaler, europäischer und internationaler Organisationen. Hierzu zählen: Deutsches Institut für Normung (DIN), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Europäisches Komitee für Normung (CEN), Europäische Bewertungsdokumente (EAD), International Organization for Standardization (ISO), American Society for Testing and Materials (ASTM), International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM), Association française de normalisation (AFNOR), International Federation for Structural Concrete (FIB).

### Prüfungen Betonausgangsstoffe

Beton besteht als modernes 5-Stoff-System üblicherweise aus Zement, Wasser, Gesteinskörnung sowie Zusatzstoffen und Zusatzmitteln. Je nach Anwendungsbereich werden zusätzlich Fasern und Pigmente verwendet. Die Leistungen des VDZ rund um die verschiedenen Betonausgangsstoffe und ihre Leistungsfähigkeit im Beton umfassen alle Prüfungen nach den einschlägigen europäischen bzw. nationalen Normen:

- Chemische und physikalische Untersuchungen an Zement und Mörtel
- Hydratationsbasierte Kennwerte zur Vorhersage der Betondauerhaftigkeit
- C-Wert-Bestimmung von Zement
- Eigenschaften von Gesteinskörnungen
- Untersuchungen an Betonzusatzmitteln
- Eignungsprüfungen von Einpressmörtel für Spannglieder

- Prüfungen an Flugasche
- Prüfungen an Silicastaub
- Prüfungen an Hüttensandmehlen
- Untersuchungen an Stahlfasern:
  - Zugfestigkeit von Stahlfasern
  - Biegezugfestigkeit an Stahlfaserbetonbalken zur Ermittlung von Leistungsklassen nach DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ oder nach DIN EN 14651
  - Konsistenz des Betons (Vebé-Zeit)

### Prüfung von Frisch- und Festbeton

Das nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditierte Betonlabor des VDZ verfügt über eine umfangreiche technische Ausstattung, die alle wichtigen Prüfungen von Frischbeton, Festbeton und Mörtel erlaubt. Auch verschiedene Prüfungen gemäß ASTM-Normen können durchgeführt werden, wie z. B.

- Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory (ASTM C940)
- Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement (ASTM C230)
- Flow of Hydraulic Cement Mortar (ASTM C1437)
- Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle (ASTM C191)
- Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression (ASTM C469)
- Creep of Concrete in Compression (ASTM C512)
- Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete (ASTM C157 / C157M)
- Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage (ASTM C1581)

### Prüfung der Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit von Beton bildet traditionell einen Hauptschwerpunkt der Untersuchungen im Labor des VDZ. Aktuelle Forschungsprojekte bilden dabei die Grundlage für die praxisgerechte Bewertung der Ergebnisse. Relevante Größen sind hierbei z. B.

- der Carbonatisierungswiderstand
- der Chlorideindringwiderstand
- der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand
- die Alkali-Kieselsäure-Reaktion und
- der Verschleißwiderstand

**Tabelle 2.3-1** gibt einen Überblick über die zahlreichen Dauerhaftigkeitsuntersuchungen des VDZ und den dabei zum Einsatz kommenden Verfahren.

Nach dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau (ARS Nr. 04/2013) ist der VDZ vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) bzw. von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als Gutachter für die gutachterliche Beurteilung von Gesteinskörnungen und Betonzusammensetzungen bzgl. einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion anerkannt. Auf dieser Grundlage werden vom VDZ Gutachten zur Eignung von Gesteinskörnungen und Betonzusammensetzungen bzgl. einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion erstellt.

### Beratung, Produktoptimierung, Zulassung, Begleitung von Bauvorhaben

Im Auftrag des Kunden führt der VDZ Vorversuche sowie Zulassungsprüfungen zur Erlangung allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen (abZ), Europäisch Technische Bewertungen (ETA) oder von KOMO-Attesten mit Produktzertifikat gemäß CUR 48

**Tabelle 2.3-1** Dauerhaftigkeitsuntersuchungen des VDZ

Leistung	Verfahren
Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandsprüfungen: – Würfelverfahren – CIF/CDF-Test – Plattenprüfverfahren (Slab Test) – Balkenverfahren (Beam Test)	EAD 15001-00-0301 DIN CEN/TS 12390-9, BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ DIN CEN/TS 12390-9 DIN CEN/TR 15177
Chloridmigrationskoeffizient	EAD 15001-00-0301, NT Build 492, BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand“
Chloriddiffusionskoeffizient (Profil-Grinding)	EAD 15001-00-0301, DIN SPEC 1176, DIN CEN/TS 12390-11
Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit von Beton zur schnellen Anzeige der Beständigkeit gegen das Eindringen von Chloridionen	ASTM C1202
Carbonatisierungstiefe	EAD 15001-00-0301, DAfStb Heft 422
Vorhersage der Dauerhaftigkeitsergebnisse folgender Verfahren anhand von hydratationsgradbasierten Kennwerten: – Carbonatisierungstiefe – Chloridmigrationskoeffizient – Würfelverfahren – CIF/CDF-Test	VDZ-Methode (siehe Information Betontechnik „Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton“)
Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme	DIN 52108, DIN EN 13892-3
Prüfungen hinsichtlich Alkali-Kieselsäure-Reaktion / Prüfung von Gesteinskörnungen: – Schnellprüfverfahren – Betonversuch mit Nebelkammerlagerung (40 °C) – 60 °C - Betonversuch – WS-Grundprüfung	DAfStb Alkali-Richtlinie DAfStb Alkali-Richtlinie DAfStb Alkali-Richtlinie, RILEM AAR-4.1 BMVI (vormals BMVBS)/BASt/FGSV
Prüfungen hinsichtlich Alkali-Kieselsäure-Reaktion / Prüfung von Betonen (AKR-Performance-Prüfung): – 60 °C - Betonversuch <u>ohne</u> Alkalizufuhr von außen – 60 °C - Betonversuch <u>mit</u> Alkalizufuhr von außen – 60 °C - Betonversuch an zwei Bohrkernhälften (mit oder ohne Alkalizufuhr) – 40 °C - Nebelkammerlagerung an Bohrkernen	AFNOR P 18-454, RILEM AAR-11 (Entwurf) VDZ-Verfahren, TP B-StB, Teil 1.1.09 (Entwurf), RILEM AAR-12 (Entwurf) VDZ-Verfahren VDZ-Verfahren
Diagnose von Schäden infolge einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion	Auflicht-, Durchlicht- und Rasterelektronenmikroskopie
Gutachten zur Eignung von Gesteinskörnungen und Betonzusammensetzungen	z. B. gemäß BMVI Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 04/2013 und für Flugbetriebsflächen
Prüfung der Beständigkeit gegen Sulfat- und Meerwasserangriff an Mörteln	Civiltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving Aanbeveling 48 (CUR 48)
Eindringwiderstand von Beton gegenüber wassergefährdenden Stoffen (FD- und FDE-Beton)	DAfStb-Rili BUmwS

durch. Das Dienstleistungsprogramm umfasst alle Stufen des Zulassungsverfahrens wie z.B. die Unterstützung bei der Antragstellung, die Erstellung und Durchführung des Versuchsprogramms, des Prüfberichts und eines Gutachtens über die Eignung des Produkts. Der VDZ führt bei Bedarf Baustellenaudits durch mit dem Ziel, die ausführende Firma zu unterstützen und eine

hohe Ausführungsqualität zu gewährleisten. Auf Kundenwunsch können sowohl Betonzusammensetzungen optimiert als auch spezielle Prüfverfahren entwickelt werden. Der VDZ unterstützt seine Kunden dabei in allen betontechnischen Fragen. Hierzu zählt u.a. die Beratung bei der Entwicklung von Betonen mit besonderen Eigenschaften.

## Praxisbeispiel Entwicklung von Betonen mit hohem Elastizitätsmodul

### Ausgangssituation

Im dargestellten Fall wurde der VDZ beauftragt, einen Beton mit möglichst hohem Elastizitätsmodul ( $> 100$  GPa) für Spezialanwendungen zu entwickeln.

Der Elastizitätsmodul von Beton liegt üblicher Weise in einer Größenordnung von 20 bis 40 GPa und hängt maßgeblich vom Elastizitätsmodul der verwendeten Gesteinskörnung, dem Anteil der Gesteinskörnung im Beton, dem Größtkorn der Gesteinskörnung sowie der Festigkeit der Zementsteinmatrix ab. Um die beschriebene Aufgabenstellung zu lösen, war ein Beton mit folgenden Eigenschaften zu entwickeln:

- keramische Gesteinskörnung mit hohem Elastizitätsmodul
- hohe Packungsdichte
- geringer Leimgehalt und
- hohe Zementsteinfestigkeit

### Versuche

Als Gesteinskörnung wurden Korund (Elastizitätsmodul gemäß Literaturangabe 300 bis 380 GPa) mit einem Größtkorn von 16 mm sowie gesintertes Siliziumcarbid (Elastizitätsmodul gemäß Literaturangabe 300 bis 600 GPa) mit einem Größtkorn von 3 mm verwendet. Siliziumcarbid ist am Markt nicht in größeren Fraktionen verfügbar. Für die Zementsteinmatrix wurden Portlandzement CEM I 52,5 R und Silikastaub verwendet. Der Leimgehalt wurde mit  $240 \text{ l/m}^3$  bzw.  $210 \text{ l/m}^3$  (ohne Anrechnung von Feinstanteilen der Gesteinskörnung) für eine Sieblinie A/B 16 angesetzt. Für eine A16-Sieblinie waren

$240 \text{ l/m}^3$  erforderlich, um die Verarbeitbarkeit des Betons sicherstellen zu können.

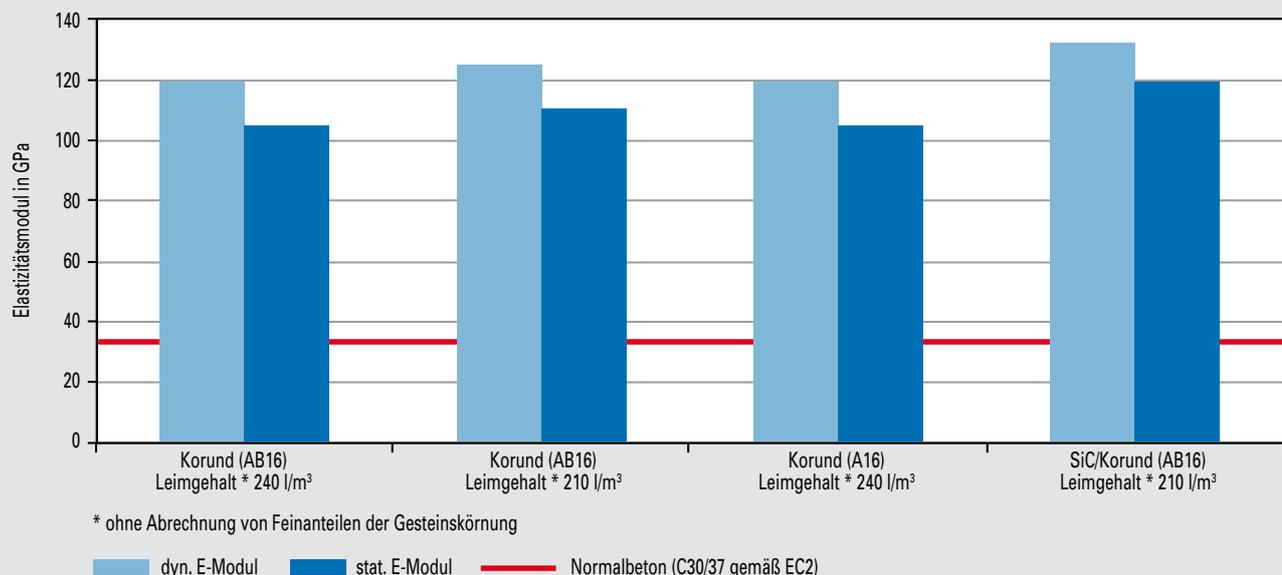
Je Beton wurden sechs Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm hergestellt. Die Probekörper wurden zunächst 24 Stunden in den Formen vor Zugluft und Austrocknung geschützt bei einer Lufttemperatur von  $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  gelagert. Nach 24 Stunden wurden die Probekörper entformt und bei  $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  unter Wasser gelagert. Der dynamische Elastizitätsmodul wurde im Alter von 28 Tagen durch Resonanzfrequenzmessung bestimmt. Der statische Elastizitätsmodul wurde gemäß DIN EN 12390-13, Verfahren B an drei Zylindern je Beton ebenfalls im Alter von 28 Tagen geprüft.

### Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in **Bild 2.3-1** dem gemäß Eurocode 2 (**Tabelle 3.1**) berechneten statischen Elastizitätsmodul eines üblichen Betons der Festigkeitsklasse C30/37 gegenüber gestellt. Im Vergleich zu diesem Beton konnte der statische Elastizitätsmodul in allen vier Fällen deutlich gesteigert werden. Der Elastizitätsmodul ist dabei maßgeblich von der verwendeten Gesteinskörnung abhängig. Unter Verwendung einer Mischung aus Siliziumcarbid und Korund wurde ein statischer Elastizitätsmodul von rd. 120 GPa erreicht. Der dynamische Elastizitätsmodul lag grundsätzlich um rd. 15 GPa höher als der statische Elastizitätsmodul.

### Zusammenfassung

Es konnten Betone auf Basis keramischer Gesteinskörnungen mit Elastizitätsmoduln von rd. 120 GPa entwickelt werden. Der Kunde prüft nun, ob diese Betone seinen speziellen Anforderungen genügen.



**Bild 2.3-1** Elastizitätsmodul der Betone

## Ökobilanzierung und Nachhaltigkeitsbewertung

Das Leistungsspektrum des VDZ im Bereich des Themenfeldes „Nachhaltigkeit“ umfasst die Erstellung von Ökobilanzen und Umweltprodukt-Deklarationen nach DIN EN ISO 14040 und EN 15804 für den Bereich Zement und Beton. Dabei finden die durch CEN/TC 350 für den Bausektor entwickelten Regeln Anwendung. Mitarbeiter des VDZ sind als Auditoren gemäß Vorga-

ben der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) ausgebildet und führen Zertifizierungen nach dem Concrete Sustainability Council (CSC) durch.

## Bauwerksdiagnose

Bei der Bauwerksdiagnose wird der Zustand einer Stahlbeton- oder Spannbetonkonstruktion im Rahmen einer Bauwerksuntersuchung

festgestellt und dokumentiert. Während eines Ortstermins wird das Bauwerk mit weitestgehend zerstörungsfreien Messverfahren durch das Expertenteam des VDZ untersucht. Im Rahmen der Bauwerksuntersuchung findet auch die Entnahme von Baustoffproben für weitergehende Laboruntersuchungen statt.

Ziel der Bauwerksuntersuchung ist es, eine Aussage über den Gesamtzustand des Bauwerks machen zu können. Diese hilft bei der Planung weiterer Maßnahmen zur Instandhaltung und Instandsetzung des Bauwerks. Die Ergebnisse der Bauwerksbegutachtung werden dem Kunden bei Bedarf in einem 3D-Bauwerksmodell als

soj. IFC-Dateien übergeben. Wesentliche Arbeitsschritte in der Bauwerksdiagnose sind z. B.:

- Bestandsaufnahme geschädigter und unbeschädigter Bereiche von Betonbauwerken
- Identifizierung und Bewertung von Schädigungsmechanismen, z. B. Rissbildung und Entfestigung
- Schädigungsprognose, z. B. AKR-Restdehnungspotenzial
- Klärung der Ursachen von Ausblühungen und Verfärbungen
- Bestimmung der Restnutzungsdauer des Bauwerks
- Ermittlung des Instandsetzungsbedarfs des Bauwerks

### Praxisbeispiel AKR-Schadensbegutachtung

Eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) ist ein großes Dauerhaftigkeitsproblem für Beton. Sie schädigt weltweit Bauwerke wie Dämme, Fahrbahndecken, Start- und Landebahnen, Brücken, Leitwände und Kernkraftwerke und verkürzt deren Lebensdauer und erhöht deren Betriebskosten. Betreiber solcher Bauwerke benötigen für den weiteren Betrieb Informationen zur Schadensursache und dem aktuellen Zustand des Bauwerks bzw. Bauteils hinsichtlich Dauerhaftigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit.

In einem solchen Fall untersuchte der VDZ ein AKR-geschädigtes Wasserbauwerk und bewertete den Schädigungsgrad, den Bauwerkszustand und das noch vorhandene AKR-Restdehnungspotenzial. Am Bauwerk wurden Jahre zuvor verschiedene Instandsetzungsmaßnahmen zur Verlängerung der Nutzungsdauer durchgeführt, deren Wirksamkeit ebenfalls zu bewerten war.

#### Untersuchungen

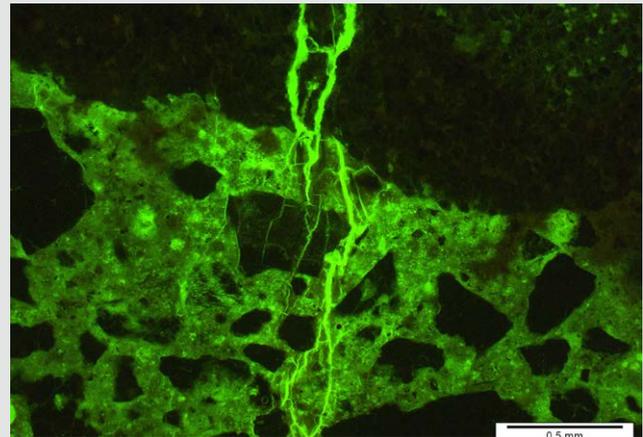
Bohrkerne aus geschädigten und wenig geschädigten Bereichen sowie aus den instandgesetzten Bereichen wurden entnommen. Zunächst wurden an Dünnschliffen der Bohrkerne lichtmikroskopisch die Schadensursache und das Betongefüge untersucht. Weitere Bohrkerne wurden in der 40 °C-Nebelkammer gelagert, um das Restdehnungspotenzial zu ermitteln. Zusätzlich wurden die Rohdichte, die Druck- und Spaltzugfestigkeit sowie der statische E-Modul vor und nach der 40 °C-Nebelkammerlagerung bestimmt.

#### Ergebnisse

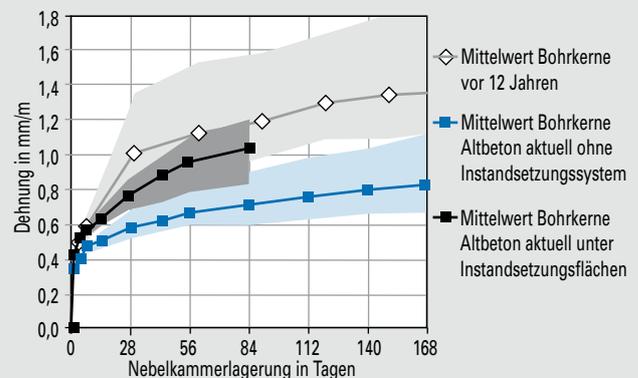
Die Untersuchungen zeigten, dass der Beton des Wasserbauwerks in starkem Maße durch eine AKR geschädigt war. Viele Kieskörner waren gerissen und zeigten Auflösungserscheinungen entlang der Risse. Die Risse setzten sich in der Zementsteinmatrix fort und waren mit Mineralneubildungen gefüllt (**Bild 2.3-2**).

Die Ergebnisse der Nebelkammerlagerung zeigten im Vergleich zu Untersuchungen zwölf Jahre zuvor, dass das Restdehnungspotenzial mit der Zeit abgenommen hatte (**Bild 2.3-3**). Die Bohrkerne aus bereits instandgesetzten Flächen dehnten sich stärker als die Bohrkerne aus den Bereichen, in denen kein Instandsetzungssystem vorhanden war. Dies deutete auf einen verzögerten Verlauf der AKR in den instandgesetzten Bereichen hin.

Gemäß zur Verfügung gestellter Informationen war das Wasserbauwerk mit Beton der Güte B225 und B300 gebaut worden, die mit charakteristischen Festigkeiten von rund 15 MPa und 20 MPa heute den Festigkeitsklassen C12/15 bzw. C20/25 ent-



**Bild 2.3-2** Dünnschliff des Betons im ultravioletten Licht: Rissystem teilweise mit rekristallisiertem Gel ausgehend von einem Sandsteinkorn



**Bild 2.3-3** Bereiche der Dehnung von Bohrkerne in der Nebelkammer bei 40 °C

sprechen würden. Die aktuelle Betondruckfestigkeit entsprach mit einer charakteristischen Druckfestigkeit von 46,7 MPa gemäß DIN EN 13791 der Druckfestigkeitsklasse C40/50 nach DIN EN 206-1.

Der gemessene statische E-Modul betrug 16,6 GPa und war somit deutlich niedriger als es gemäß DIN EN 1992-1-1 mit 35 GPa (Ecm) für die Druckfestigkeitsklasse C40/50 zu erwarten gewesen wäre. Auch im Vergleich zu den mittleren E-Moduln von 27 GPa und 29 GPa für die Festigkeitsklassen C12/15 und C20/25 war der gemessene E-Modul relativ gering. Dies dürfte auf die Schädigung durch die AKR zurückzuführen sein, da infolge der AKR auch der E-Modul der Gesteinskörnung sinkt. Auf der Basis dieser Untersuchungen konnte der Bauherr weitere Überlegungen zum Umgang mit dem Bauwerk anstellen.

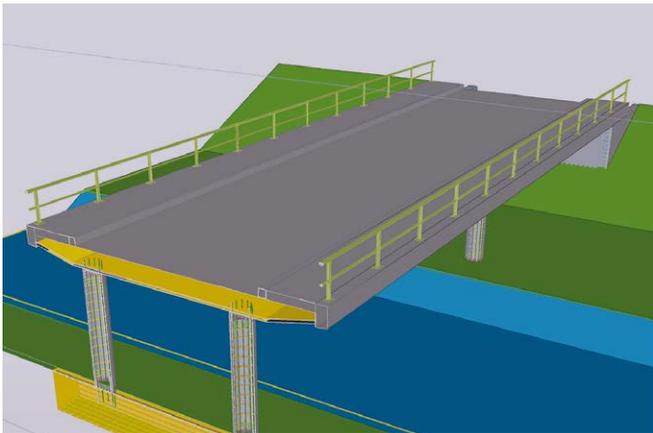


Bild 2.3-4 Digitales 3D-Modell einer Brücke mit BIM



Bild 2.3-5 Lebensdauerbemessung an einem Betonbauwerk

### Digitalisierung von Bestandsbauwerken

Durch einen digitalisierten Bauwerksbestand erhält der Bauherr ein leistungsfähiges und innovatives Werkzeug zur Bewirtschaftung und Instandhaltung des Bestandes. Der VDZ übernimmt bei Bedarf die Digitalisierung von Bestandsbauwerken im Rahmen von Projekten zum so genannten Building Information Modeling (BIM). Die Betreiber von Bauwerken können mit BIM-Modellen die Daten der Bauwerke am Computer in 3D sehen und effizient analysieren. Je komplexer und schwieriger eine Bauwerksgeometrie ist, desto wertvoller wird BIM als Planungswerkzeug für Bauherren und Planer. So können durch BIM Schnitte in den Modellen frei gelegt und Konflikte zwischen Gewerken (auch bei der Instandsetzung) am 3D-Modell klar erkannt werden.

Als Zusatznutzen können die Ergebnisse der Bauwerksdiagnose in den 3D-Modellen als Information hinterlegt werden. Gleiches gilt für die Ergebnisse einer Lebensdauerbemessung und deren Aktualisierungen durch regelmäßige Bauwerksinspektionen. Bauwerke können in unterschiedlichen Detailgraden digitalisiert werden, beginnend bei LOD100 (Grobplanung) über LOD300 (Detailplanung) bis hin zu LOD500 (Bestandsmodell). Wenn der Bauwerksbestand digitalisiert wurde, können die 3D-Modelle auch zur BIM-basierten Instandsetzungsplanung verwendet werden.

### Instandsetzungsplanung mit Hilfe von BIM

Im Rahmen der Instandsetzungsplanung kann das Bauwerk mittels BIM als 3D-Modell dargestellt werden. Hierbei wird das Bauwerk nach Bestandsplänen und Ergebnissen der Bauwerksuntersuchung in einem virtuellen Raum modelliert. Die Ergebnisse der Bauwerksdiagnose, z. B. Prüfstellen, Bohrkernentnahmestellen, Chloridprofile und Ergebnisse des Bewehrungsscanners, werden Teil des BIM-Modells. Der Ist-Zustand wird digital erfasst. Ein Soll-Ist-Vergleich wird somit möglich. Die am Bauwerk festgestellten Baustoffeigenschaften sind im 3D-Modell als bauteilspezifische Informationen hinterlegt. Die Instandsetzungsplanung erfolgt ebenfalls am 3D-Modell. Im Projekt wird das Bauwerksmodell vom VDZ als IFC-Datei an den Kunden übergeben. Hiermit erhält der Kunde zwei Leistungen aus einer Hand:

- Digitalisierung des Bestandes und
- Instandsetzungsplanung und -überwachung des Bauwerks mit Hilfe eines 3D-Modells.

Ein weiterer Vorteil der modellbasierten Herangehensweise mit BIM besteht darin, dass die ausführenden Firmen das 3D-Modell als Grundlage für ihre Mengen- und Massenermittlung nutzen kön-

nen. Auch stellt die BIM-basierte Planung und Ausführung sicher, dass Konflikte zwischen Gewerken frühzeitig und nicht erst auf der Baustelle erkannt werden. BIM erlaubt eine hohe Transparenz im Planungs- und Bauablauf. Die Ausführung erfolgt weiterhin nach Zeichnungen, die jedoch dann aus dem digitalen Modell abgeleitet werden können. Das 3D-Modell des BIM dient auf der Baustelle als Zusatzinformation und Besprechungsgrundlage

### Lebensdauerbemessung

Die Wahrscheinlichkeit für die Depassivierung der Bewehrung bzw. das Erreichen eines kritischen Chloridgehaltes an der Bewehrung, die durch die Carbonatisierung der Betondeckung oder das Eindringen von Chloriden in den Beton ausgelöst werden, kann mit Hilfe probabilistischer Bemessungsmodelle nach fib-Model-Code bzw. ISO 16204 abgeschätzt werden. Zu den Leistungen des VDZ in diesem Bereich zählen:

- Lebensdauerbemessung für neu zu errichtende Stahlbetonbauteile
- Lebensdauerbemessung für Instandsetzungsmaßnahmen (Betonersatz)
- Abschätzung der Restnutzungsdauer bestehender Stahlbetonbauteile
- Leistungsbezogener Betonentwurf für vorgegebene Lebensdauer- bzw. Dauerhaftigkeitsanforderungen

Typische Anwendungsfälle für die Lebensdauerbemessung sind die Nutzung von neuen Materialien (Beton, Betonerersatzsysteme), deren Dauerhaftigkeit vor der Anwendung im Bauwerk sichergestellt werden muss oder die Analyse der Folgen von Unregelmäßigkeiten oder Mängeln während der Bauphase für die Bauwerkszuverlässigkeit. Darüber hinaus wird die Lebensdauerbemessung zur Bemessung von Bauteilen mit außergewöhnlichen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und zum Nachweis eines ausreichend geringen Korrosionsrisikos bei Bauwerken mit einer besonders langen Nutzungsdauer (> 50 Jahre) eingesetzt. Dies konnte bisher durch die Verwendung üblicher deskriptiver Regeln nicht garantiert werden.

Die Lebensdauerbemessung ist weiterhin bei der Bestimmung von Schichtdicken für Betonerersatz in der Instandhaltungsplanung zu nutzen. Im Fall veränderter Rahmenbedingungen, z. B. durch Umnutzung oder veränderte Umwelteinwirkungen, kommt die Lebensdauerbemessung bei der Beurteilung der Auswirkungen und der Erarbeitung von Instandhaltungskonzepten ebenfalls zum Einsatz.

## 2.4 Produktzertifizierung

Bauprodukte nach Bauproduktenverordnung (BaupVO) dürfen in der Europäischen Union (EU) nur mit einem gültigen CE-Zeichen auf den Markt gebracht werden. In verschiedenen Mitgliedsstaaten der EU sind darüber hinaus weitere Kennzeichnungen verbreitet. Beispielsweise müssen in Deutschland viele Bauprodukte, die nicht einer europäisch harmonisierten Norm entsprechen, mit dem Ü-Zeichen gekennzeichnet werden. In anderen Ländern werden privatrechtliche Zeichen verwendet, beispielsweise das BENOR-Zeichen in Belgien, das Dancert-Zeichen in Dänemark, das KOMO-Zeichen in den Niederlanden und das NF-Zeichen in Frankreich.

Voraussetzung für die Verwendung des CE-Zeichens oder der anderen genannten Zeichen ist die Durchführung eines Konformitätsbewertungsverfahrens, durch das die Sicherheit und der Gesundheitsschutz bei der Verwendung der Produkte und die Sicherheit der Bauwerke gewährleistet werden sollen. Die Konformitätsbewertungsverfahren beinhalten in Abhängigkeit vom Bauprodukt bzw. den zugrunde liegenden Regeln Produktprüfungen, die Inspektion des Herstellwerks, die Prüfung der werkseigenen Produktionskontrolle sowie anschließend eine regelmäßige Überwachung des Produkts und der werkseigenen Produktionskontrolle. Bei Erfüllung aller Anforderungen stellt eine Zertifizierungsstelle entsprechende Zertifikate aus.

### Überwachung und Zertifizierung von Bauprodukten

Die Überwachung und Zertifizierung von Bauprodukten gehören traditionell zu den Kernkompetenzen des VDZ. Hierzu wurde die Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle) eingerichtet. Sie ist für den Bereich Produktzertifizierung nach DIN EN ISO/IEC 17065 akkreditiert und außerdem von den zuständigen Behörden nach Bauproduktenverordnung notifiziert und nach Landesbauordnung bauaufsichtlich anerkannt. Die La-

bore der PÜZ-Stelle des VDZ sind nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert.

Die PÜZ-Stelle bietet ihren Kunden Leistungen in folgenden Bereichen an:

- Zertifizierung von Zementen und anderen Bindemitteln
- Zertifizierung von Beton und Mörtel
- Zertifizierung von Gesteinskörnungen insbesondere im Hinblick auf alkaliempfindliche Bestandteile
- Zertifizierung von Betonzusatzstoffen und Betonzusatzmitteln

Die meisten der oben genannten Bauprodukte werden in europäisch harmonisierten Normen geregelt. Es ist allerdings auch möglich, dass Produkte nicht in den Anwendungsbereich einer bestehenden harmonisierten Norm fallen oder für mindestens ein wesentliches Merkmal kein geeignetes Bewertungsverfahren in der harmonisierten Norm vorgesehen ist. In solchen Fällen kann für das Bauprodukt eine Europäische Technische Bewertung (European Technical Assessment ETA) erteilt werden. Auch solche Produkte können von der PÜZ-Stelle des VDZ überwacht und zertifiziert werden (siehe Box).

### VDZ-Qualitätssiegel

Die Qualitätsprüfung und die Entwicklung von Qualitätsstandards gehören bereits seit mehr als 140 Jahren zu den Aufgaben des VDZ. Heute überwacht und zertifiziert die PÜZ-Stelle des VDZ mehr als 500 Bindemittel in 59 Zementwerken. Das „VDZ-Sechseck“ steht seit vielen Jahrzehnten für höchste Qualitätsansprüche.



### Praxisbeispiel Europäische Technische Bewertung

Eine ETA basiert auf einem Europäischen Bewertungsdokument (European Assessment Document EAD), in dem insbesondere die relevanten Prüfverfahren beschrieben sind. Bei neuen ETAs werden häufig beide Dokumente, also EAD und ETA, nahezu gleichzeitig erarbeitet. Es ist dann sogar möglich, dass eine ETA von der zuständigen Behörde bereits erteilt wird, bevor das zugrunde liegende EAD im Amtsblatt der EU veröffentlicht wurde. In solchen Fällen könnte der Hersteller das entsprechende Bindemittel technisch zwar bereits herstellen. Allerdings müssen Zertifizierungsstellen zunächst für das entsprechende EAD akkreditiert und notifiziert werden. Dies ist jedoch erst möglich, nachdem das EAD im endgültigen Wortlaut vorliegt bzw. im Amtsblatt der EU veröffentlicht wurde. Der Prozess einer Akkreditierung und Notifizierung kann durchaus sechs bis zwölf Monate in Anspruch nehmen. Vor der Notifizierung dürfen Zertifizierungsstellen ihrerseits noch keine Zertifikate der Leistungsbeständigkeit für Produkte nach der ETA ausstellen und ohne dieses Zertifikat darf der Hersteller das Produkt nicht auf den Markt bringen.

Hochofenzement CEM III/A ist gemäß EN 197-1 nicht als Zement mit hohem Sulfatwiderstand klassifiziert. Dennoch weisen solche Zemente häufig in der Praxis einen hohen Sulfatwiderstand auf. Deshalb wurden für verschiedene CEM III/A mit hohem Sulfatwiderstand unter dem Rechtsrahmen

der früheren Bauproduktenrichtlinie ETAs erteilt. Diese „alten“ ETAs konnten allerdings nicht mehr verlängert werden und liefen Ende 2017 bzw. Anfang 2018 aus. Infolgedessen haben verschiedene Zementhersteller für die entsprechenden Zemente jeweils eine neue ETA nach den Regeln der BaupVO beantragt. Das zugrunde liegende Europäische Bewertungsdokument EAD 150009-00-0301 „Blast Furnace Cement CEM III/A with assessment of sulphate resistance (SR) and optional with low effective alkali content (LA) and/or low heat of hydration (LH)“ wurde jedoch erst am 10. November 2017 im Amtsblatt der EU veröffentlicht. Im gleichen Monat erhielten einige Hersteller die neuen ETAs für CEM III/A mit hohem Sulfatwiderstand.

Die PÜZ-Stelle hatte im Vorfeld dieser Entwicklung bereits sehr früh Kontakt mit der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) und dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) als notifizierende Behörde aufgenommen. Diese frühzeitige Kommunikation mit allen Beteiligten führte dazu, dass die Akkreditierung der PÜZ-Stelle für das neue EAD am 19. Dezember 2017 und die Notifizierung schon am 30. Januar 2018 erfolgte. Die PÜZ-Stelle hat daraufhin bereits Anfang Februar 2018 als erste Stelle in Deutschland entsprechende neue Zertifikate für CEM III/A mit hohem Sulfatwiderstand ausgestellt. Damit wurde sichergestellt, dass die betroffenen Zementhersteller die Liefervereinbarungen mit ihren Kunden erfüllen konnten.

## 2.5 Zertifizierung und Verifizierung

Die Zertifizierung von Managementsystemen und die Verifizierung von Treibhausgas-Emissionsberichten sind in der Zertifizierungsstelle für Managementsysteme (FIZ-Zert) der FIZ GmbH gebündelt. Zum Ende des Jahres 2017 betreute FIZ-Zert mehr als 70 Verfahren im Bereich der Zertifizierung und Testierung von Managementsystemen. Parallel werden jährlich mehr als 50 Berichte im Rahmen des europäischen Emissionsrechtehandels geprüft und verifiziert.

Sämtliche Auditoren und Verifizierer von FIZ-Zert verfügen über profunde Kenntnisse der Herstellungsprozesse in der Zement- und Kalkindustrie. Auch wird die FIZ GmbH jährlich von der obersten Akkreditierungsbehörde begutachtet. Daneben finden gleichfalls unter der Aufsicht der Akkreditierungsbehörde regelmäßig Witness-Audits statt. Durch diese Prozesse wird die formale Kompetenz von FIZ-Zert als unabhängige akkreditierte Prüfstelle kontinuierlich nachgewiesen.

### Zertifizierung von Managementsystemen

Im Rahmen von Kundenprojekten zertifiziert FIZ-Zert bereits seit vielen Jahren für Unternehmen aus der Steine- und Erden-Industrie sowie der Baustoffindustrie Qualitätsmanagementsysteme nach DIN EN ISO 9001, Umweltmanagementsystemen nach DIN EN ISO 14001, Energiemanagementsysteme nach DIN EN ISO 50001 und Arbeitsschutz- und Gesundheitsschutzmanagementsysteme nach OHSAS 18001 bzw. DIN ISO 45001. Die Leistungen von FIZ-Zert können von den Kunden unabhängig von ihrem Standort, ihrer Mitgliedschaft in Vereinen/ Verbänden oder sonstigen Voraussetzungen in Anspruch ge-

nommen werden. Bei der Zertifizierung von Managementsystemen erbringt FIZ-Zert folgende Leistungen:

- Erstzertifizierung mit Stufe-1- und Stufe-2-Audits
- Durchführung regelmäßiger Überwachungsaudits beim Kunden
- Re-Zertifizierung des Managementsystems des Kunden
- Matrixzertifizierung der Managementsysteme des Kunden

An die eigenen Leistungen und die fachliche Qualifikation seiner Experten stellt FIZ-Zert höchste Ansprüche. Dies gilt insbesondere für die Aspekte Unabhängigkeit, Vertraulichkeit und Verschwiegenheit.

### Verifizierung von CO<sub>2</sub>-Emissionsberichten

Als unabhängige und akkreditierte Prüfstelle verifiziert FIZ-Zert pro Jahr mehr als 50 CO<sub>2</sub>-Emissionsberichte gemäß den einschlägigen europäischen und nationalen Gesetzen und Richtlinien zur Vorlage bei den jeweiligen Überwachungsbehörden. Die qualifizierten Sachverständigen von FIZ-Zert sind als Umweltgutachter bekanntgegeben bzw. verfügen über eine entsprechende Zulassung als geprüfte IHK-Sachverständige. Außerdem ist FIZ-Zert im nationalen Sektorkomitee der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAKKS) als Verifizierer vertreten.

Von den Branchenkenntnissen und der hohen fachlichen Kompetenz der Experten von FIZ-Zert profitieren Kunden aus den verschiedenen Bereichen der Steine- und Erden-Industrie – insbesondere Zement, Kalk und Gips – sowie nahestehende Industriezweige. Kunden, für die die Sachverständigen nicht im Zusammenhang mit der Prüfung oder Erstellung von Emissionsberichten tätig sind, können auch beratende Dienstleistungen auf dem Gebiet des Treibhausgasemissionshandels in Anspruch nehmen.

### Neuerungen im Bereich der Qualitäts- und Umweltmanagement- sowie Energiemanagementsysteme

#### Qualitäts- und Umweltmanagementsysteme

Die für Qualitätsmanagementsysteme relevante Norm DIN EN ISO 9001 wurde im Jahr 2015 ebenso novelliert wie das Pendant für Umweltmanagementsysteme, die DIN EN ISO 14001. Die Novellierung beider Normen im Jahr 2015 hat zur Folge, dass spätestens ab dem 15. September 2018 Zertifizierungen nur noch auf Grundlage der aktuellen Normenversion durchgeführt werden können. Die beiden Normen weisen damit die gleiche Struktur auf und gleiche Belange werden unter identischen Normungspunkten adressiert. Das bedeutet eine erhebliche Erleichterung für die Dokumentationen insbesondere dann, wenn die Unternehmen über integrierte Managementsysteme (gleichzeitige Darstellung der Anforderungen verschiedener Normen) verfügen. Zudem haben sich die Normen weiter in Richtung Prozessorientierung entwickelt und die Kunden von FIZ-Zert haben damit mehr Freiheitsgrade, die jeweiligen Normenanforderungen individuell und passend auf die eigene Struktur umzusetzen.

Höhere Anforderungen ergeben sich sowohl für die DIN EN ISO 9001 als auch für die DIN EN ISO 14001 durch eine intensivere Behandlung des Themas Umgang mit Risiken und Chancen. An dieser Stelle sind die Unternehmen aufgefordert, die unternehmensspezifischen Risiken und Chancen klarer zu

definieren sowie Maßnahmen darzulegen, wie Risiken vermieden bzw. Chancen genutzt werden können.

#### Energiemanagementsysteme

Im Bereich der Energiemanagementsysteme wurde mittlerweile die Norm DIN ISO 50003 verbindlich eingeführt. Diese Norm richtet sich zunächst nicht an die zertifizierten Unternehmen, sondern vielmehr an die akkreditierten Zertifizierungsstellen wie FIZ-Zert. Mittelbar sind allerdings auch die Unternehmen selbst betroffen. So sind für die Kalkulation des erforderlichen Zeitaufwandes von den Unternehmen zusätzliche Angaben zu machen. Neben dem Energieverbrauch sind die wesentlichen Energieverbraucher sowie die Energiequellen und zusätzlich das für das Managementsystem wirksame Personal zu benennen. Aus diesen Angaben ist dann durch verbindliche Vorgaben der Norm der für die Zertifizierung erforderliche zeitliche Aufwand abzuschätzen.

Weiterhin haben die Unternehmen ab sofort regelmäßig die tatsächliche Verbesserung ihrer energiebezogenen Leistungen nachzuweisen. Dies erfordert eine wesentlich präzisere Erfassung von Kennzahlen und ggf. eine Neudefinition der energetischen Ausgangsbasis.

Die Vorgaben der neuen DIN ISO 50003 sind seit Oktober 2017 verbindlich umzusetzen. Das bedeutet, dass Erst- bzw. Rezertifizierungen durch FIZ-Zert grundsätzlich nur noch unter Berücksichtigung der DIN ISO 50003 durchgeführt werden können.

### CSC-Zertifizierungen

Im November 2016 wurde auf Initiative der internationalen Zement- und Betonindustrie sowie der Cement Sustainability Initiative (CSI) das Concrete Sustainability Council (CSC) gegründet (**Bild 2.5-1**). Hauptziel des CSC ist es, den Herstellungsprozess von Beton sowie dessen Lieferketten transparent darzustellen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Beschreibung der möglichen Auswirkungen auf das soziale und ökologische Umfeld. Damit soll die Nachhaltigkeit des Baustoffs Beton gegenüber Dritten stärker hervorgehoben werden. Außerdem sollen nachhaltige Produktionsprozesse speziell in der Betonindustrie gefördert werden. Zu diesem Zweck hat das CSC ein eigenes Zertifizierungssystem entwickelt. Die FIZ GmbH ist als eine von vier Prüfstellen in Deutschland beim CSC anerkannt. Bereits zum Ende des Jahres 2017 konnte das erste CSC-Zertifizierungsverfahren in Deutschland gemeinsam mit einem Unternehmen der Transportbetonindustrie erfolgreich durchgeführt werden.

Im Rahmen der CSC-Zertifizierung erbringt FIZ-Zert nachfolgende Leistungen:

- Begehung des Werks bzw. verschiedener Standorte und Überprüfung des CSC-Berichts
- ggf. Prüfung und Zertifizierung von Lieferanten
- Berechnung des erreichten Punktestands
- Ausgabe des Zertifikats in den Stufen Bronze, Silber, Gold oder Platin



**Bild 2.5-1** Logo des Concrete Sustainability Councils (CSC)



**Bild 2.5-2** Auftaktveranstaltung des CSC im April 2018 in Berlin: Johannes Kreißig, Geschäftsführer der DGNB GmbH referierte in Berlin zum Thema Greenbuilding und gab die Anerkennung des CSC im System der DGNB bekannt. (Foto: BTB/Edelbruch)

## 2.6 Umweltmessstelle

Die Umweltmessstelle der FIZ GmbH verfügt seit vielen Jahren über eine Bekanntgabe gemäß § 29b Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und bietet in diesem gesetzlich geregelten Bereich ein umfassendes Spektrum an Dienstleistungen an. Kundenspezifische Überwachungskonzepte sowie begleitende Messungen zur Prozessoptimierung runden das Leistungsprofil ab. Grundlage für diese Tätigkeiten ist die Akkreditierung der Umweltmessstelle gemäß der DIN EN ISO/IEC 17025, die hohe Anforderungen an die Qualität der Arbeit und die Ausbildung der Mitarbeiter stellt.

Die Umweltmessstelle führt im Kundenauftrag Messungen der folgenden Abgasbestandteile durch:

- Anorganische Gase  
(beispielsweise Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Chlorwasserstoff, Fluorwasserstoff, Ammoniak)
- Organische Gase  
(Dioxine und Furane, Benzol, Toluol, Xylole, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, polychlorierte Biphenyle, Hexachlorbenzol, Formaldehyd u.v.m.)
- Staub- und Schwermetalle  
(Arsen, Blei, Kobalt, Chrom, Nickel, Vanadium, Cadmium, Thallium, Quecksilber, Mangan, Zinn, Selen, Tellur u.v.m.)
- Treibhausgasemissionen  
(Kohlendioxid, Methan,  $N_2O$ )
- Messkomponenten zur Prozessoptimierung  
(beispielsweise Schwefeltrioxid)

Darüber hinaus bietet die Umweltmessstelle die folgenden Tätigkeiten an:

- Kalibrierung und Funktionsprüfung kontinuierlich arbeitender Emissionsmeseinrichtungen
- Beratung von Kunden bei der Auswahl von Messgeräten sowie der Einrichtung von Messplätzen (**Bild 2.6-1**)
- Erstellung von Einbaubescheinigungen für kontinuierlich arbeitende Emissionsmessgeräte
- Planung und Durchführung von Sondermessungen (z. B. Bestimmung von Dioxinen und Furanen im Prozess)

### Messung und Minderung von Quecksilberemissionen

Aufgrund seiner hohen Umweltrelevanz kommt der Messung und Minderung von Quecksilberemissionen eine besondere Bedeutung zu. An die Überwachung der Quecksilberemissionen werden in der Umweltmessstelle daher höchste Qualitätsanforderungen gestellt. Über die Arbeiten im gesetzlich geregelten Bereich hinaus werden in der Umweltmessstelle folgende individuelle Aufgabenstellungen bearbeitet:

- Erstellung von Input-/Outputbilanzen für Quecksilber an Industrieanlagen
- Speziierungsmessungen zur Ermittlung der Bindungsform des Quecksilbers
- Verleih von kontinuierlich arbeitenden Quecksilbermessgeräten für einen begrenzten Zeitraum zur Bearbeitung prozesstechnischer Fragestellungen
- Quecksilber-Langzeitmessungen unter Verwendung von Feststoffadsorbentien
- Begleitung von Versuchen zur Quecksilberminderung
- Direktbestimmung von Quecksilber unmittelbar nach der Messung zur schnellen Ergebnisermittlung und Anlagenoptimierung
- Messung von Quecksilberemissionen



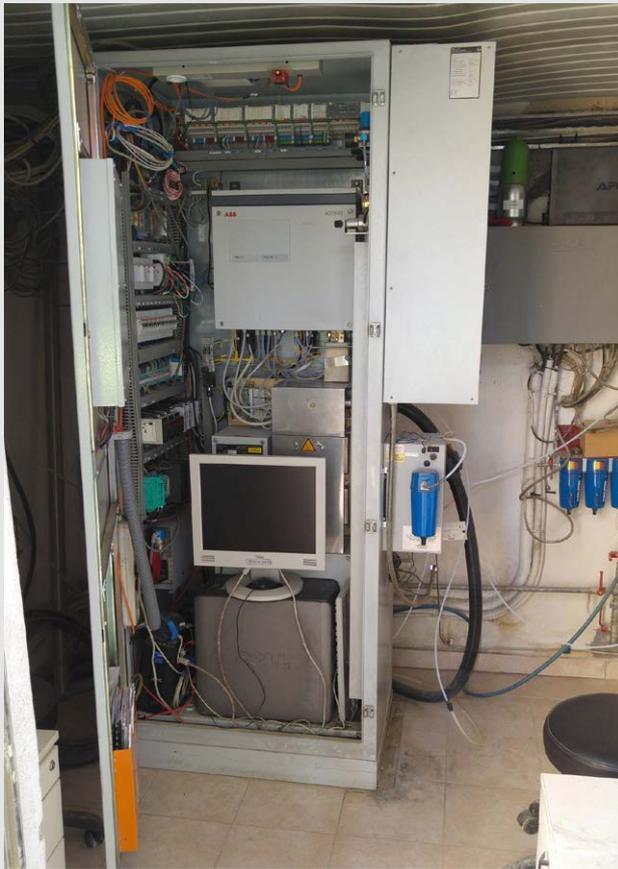
**Bild 2.6-1** Individuelle Beratung bei der Umsetzung von Messkonzepten



**Bild 2.6-2** Quecksilbermessung

### Einsatz von Multikomponentenmessgeräten für die kontinuierliche Emissionsüberwachung

Zur kontinuierlichen Emissionsüberwachung werden heutzutage zunehmend so genannte Multikomponentenmesssysteme eingesetzt. Diese Messsysteme bieten die Möglichkeit, bis zu zwölf Komponenten (inkl. Abgasrandbedingungen und Gesamt-C) über eine einzige Entnahmesonde zu erfassen (**Bild 2.6-3**). Die heute am Markt verfügbaren Multikomponentenmessgeräte arbeiten als extraktive Heißgasmesssysteme, bei denen das gesamte Probenahmesystem auf mindestens 180 °C beheizt sein muss. Damit werden auch die bei Kondensationseffekten empfindlichen Abgaskomponenten SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>,



**Bild 2.6-3** Beispielhafte Installation eines Multikomponentenmessgerätes in einem Zementwerk

HCl und HF mit sehr niedrigen Nachweisgrenzen sicher erfasst. Die implementierten Messprinzipien sind die Infrarotspektrometrie (FTIR, Bifrequenz/Gasfilterkorrelationsverfahren), die Flammenionisationsdetektion (FID) und die Messung mit chemischen Messzellen (Zr<sub>2</sub>O).

Die Kalibrierung der Multikomponentenmesssysteme wird gemäß DIN EN 14181 durchgeführt. Hierzu werden die für die jeweilige Komponente geltenden Standardreferenzverfahren verwendet und mindestens 15 Vergleichsmessungen zum Erstellen der Kalibrierfunktion durchgeführt. Eine wichtige, im Rahmen der Kalibrierung ermittelte Kenngröße ist die „obere Grenze des gültigen Kalibrierbereichs“. Diese ergibt sich aus dem im Rahmen der Kalibrierung ermittelten höchsten gemessenen Wert zuzüglich 10 % und gilt für den Zeitraum bis zur nächsten Kalibrierung (in der Regel drei Jahre). Treten im laufenden Betrieb Überschreitungen der oberen Grenze des Kalibrierbereichs auf, werden die zugehörigen Halbstundenmittelwerte bei der Klassierung in die Sonderklassen S 9 bzw. S 10 geschrieben. Falls in diesen beiden Klassen zu viele Überschreitungen gezählt werden, ist eine Neukalibrierung bereits vor Ablauf der Dreijahresfrist notwendig.

Im Vorfeld einer Kalibrierung ist daher eine enge Abstimmung zwischen dem Anlagenbetreiber und dem Messinstitut erforderlich. Zunächst sollte, beispielsweise durch Auswertung der Klassierungen der letzten drei Jahre, geprüft werden, welche Emissionsbandbreiten für den Anlagenbetrieb üblich und typisch sind. Die Anlagenfahrweise muss während der über drei Tage durchgeführten Vergleichsmessungen dann so variiert werden, dass für alle Komponenten der bei üblicher Anlagenfahrweise auftretende Konzentrationsbereich abgedeckt wird.

Bei der zeitgleichen Kalibrierung einer Vielzahl von Emissionsparametern (z. B. NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, HCl, HF, TOC) stellt dies eine nicht zu unterschätzende Herausforderung dar. Eine Möglichkeit bietet der Eingriff in die Emissionsminderungseinrichtungen (z. B. SCR, SNCR, Kalkhydratzugabe). Hierbei darf es allerdings nicht zu einer Überschreitung der geltenden Emissionsbegrenzungen kommen. Für die Kalibrierung von Parametern wie TOC oder SO<sub>2</sub> wird in Einzelfällen versucht, durch die Zugabe von Schwefelpulver oder Holzpellets gezielt kurzzeitig höhere Emissionskonzentrationen zu erreichen. Für Komponenten wie HCl oder HF stehen bislang keine Möglichkeiten zur Verfügung, das Emissionsniveau während einer Kalibrierung zu beeinflussen.

## 2.7 Qualifizierung

Der VDZ unterstützt die Unternehmen der Zementindustrie und verwandter Industriebereiche seit mehr als 60 Jahren bei der Qualifizierung von Mitarbeitern. So wird neben den jährlich stattfindenden offenen Seminaren und Kursen des VDZ mittlerweile eine breite Palette von Seminaren und Workshops nach Kundenwunsch angeboten. Aufgrund der jahrzehntelangen Erfahrung im Bereich der Weiterbildung und dem Zugriff auf mehr als 70 internationale Experten aus der Steine- und Erden-Industrie ist der VDZ in der Lage, hochwertige Weiterbildungsmaßnahmen zu nahezu allen Themen rund um Zement und Beton sowie die jeweiligen Teilaspekte (Brennstoffe, Umwelt, Qualität usw.) anzubieten. Die Schulungsinhalte, die Dauer sowie der Schwierigkeitsgrad des Trainings werden vom VDZ zusammen mit dem Kunden festgelegt, sodass das Seminar bzw. der Kurs genau den jeweiligen Anforderungen Rechnung trägt. Alle Seminare können sowohl im VDZ in Düsseldorf wie auch vor Ort beim Kunden durchgeführt und in Englisch oder z. T. auch in russischer Sprache angeboten werden.

### Inhouse-Schulungen

In den vergangenen drei Jahren ist die Nachfrage nach kundenspezifischen Trainings rund um die Zement- und Betonherstellung im In- und Ausland stark gestiegen. So wurden vom VDZ neben Trainingskursen über mehrere Wochen viele Workshops sowie Ein- und Mehrtagesseminare zu speziellen Themen durchgeführt. Angefangen von Seminaren zu den Themen Umweltschutz, Verfahrenstechnik, Energieeffizienz, Alternativbrennstoffe, Benchmarking sowie Produktoptimierung wurden auch Seminare zur Optimierung des Laboralltags sowie der Instandhaltung angeboten. Dabei wurden die Lehrgänge sowohl für Produktionsmitarbeiter als auch für die mittlere Führungsebene und das Topmanagement mit sehr gutem Erfolg durchgeführt. Schwerpunktmäßig wurden zudem eine Vielzahl von Trainingskursen über ein bis vier Wochen für Mitarbeiter aus der Produktion sowie Labormitarbeiter in den Werken veranstaltet. Neben theoretischem Basiswissen wird vom VDZ dabei immer auf den Praxisbezug geachtet. So kommen in den Trainings oft erfahrene Experten aus der Industrie zum Einsatz und es werden praktische Übungen durchgeführt. Abgerundet werden die Schulungen mit einem Test und der Zertifizierung des jeweiligen Schulungserfolges.

### Offene internationale Kurse

Neben den vorgenannten kundenspezifischen Weiterbildungsmaßnahmen bietet das VDZ-Bildungswerk pro Jahr fünf bis sechs offene Trainingskurse in Englisch an, die von Mitarbeitern der weltweiten Zement- und Zulieferindustrie gebucht werden können. Dabei handelt es sich um Kurse für junge Ingenieure, Meister, Produktionssteuerer, Instandhalter und Labormitarbeiter. In den einwöchigen Modulen wird die jeweilige Zielgruppe spezifisch und nach den jeweiligen Bedürfnissen angepasst geschult. Auch hier steht das Zusammenspiel zwischen Theorie und Praxis im Vordergrund der Schulung. Neben den notwendigen Grundlagen werden dabei die neuesten Erkenntnisse des jeweiligen Fachgebietes eingebaut. **Tabelle 2.7-1** zeigt die offenen internationalen Seminare des VDZ für die Jahre 2018/2019.

Weitere Informationen zu den Seminaren und Kursen sind auf der Website des VDZ im Bereich Weiterbildung abrufbar (<https://vdz.info/1vgsq>).

**Tabelle 2.7-1** Offene Seminare international 2018/2019

Titel	Dauer
Simulator Training with SIMULEX®	1 Woche
Process Technology of Cement Production Module 1: Raw Material Preparation and Grinding Technology	1 Woche
Process Technology of Cement Production Module 2: Clinker Production and Material Technology	1 Woche
Process Operator Training	3 Wochen
Crash Course for Young Engineers	1 Woche
Plant Maintenance and Refractories Course	1 Woche

### VDZ-Onlinekurse

Seit 2010 bietet der VDZ die Onlinekurse über die VDZ-Lernplattform <https://www.elearning-vdz.de/> an. Pro Jahr nutzen mehr als 1 500 Benutzer weltweit das Angebot zur kostengünstigen Weiterbildung mit Hilfe der Onlinekurse. In mehr als 60 deutschsprachigen Modulen können die Beschäftigten sich über grundlegende Produktionsprozesse bis hin zur Betonanwendung informieren. Ansprechende Simulationen helfen den Mitarbeitern, komplexe Sachverhalte besser zu verstehen und ihre Anlagen in der Praxis effizienter, sicherer und umweltfreundlicher zu betreiben. In den anschließenden Tests haben die Mitarbeiter die Gelegenheit, ihr Wissen am Computer zu überprüfen. Wurde ein Test erfolgreich bearbeitet, bekommen die Benutzer am Ende automatisch ein entsprechendes Zertifikat als Nachweis ausgestellt.

Seit einigen Jahren sind die VDZ-Onlinekurse in Englisch und Russisch verfügbar. In Englisch stehen derzeit insgesamt 38 (**Tabelle 2.7-2**) und in Russisch 40 verfahrenstechnische Kurse zur Verfügung. Die Onlinekurse werden von zahlreichen Kunden des VDZ weltweit im Rahmen von Trainingsprojekten sowie als Teil der firmeninternen Personalentwicklungsstrategie genutzt. Die Möglichkeiten der Umsetzung reichen dabei vom Anmieten der VDZ-Lernplattform bis hin zur der Integration der Onlinekurse in das Intranet des Kunden (siehe Praxisbeispiel).



**Bild 2.7-1** Die angebotenen Seminare des VDZ können in Düsseldorf oder beim Kunden vor Ort durchgeführt werden.

### Praxisbeispiel Inhouse-Schulung im Mittleren Osten

Für einen Zementhersteller im Mittleren Osten wurde vor Ort ein kundenspezifisches Seminar in englischer Sprache durchgeführt. Die Themenschwerpunkte dieser zweiwöchigen Schulung lagen auf der Erstellung von „Energie- und Stoffbilanzen von Ofenanlagen“ sowie auf der „Optimierung von Mahlanlagen“.

Die Zielgruppe bestand aus erfahrenen Ingenieuren. Um den erzielten Lerneffekt zu überprüfen, wurden die Kursteilnehmer vor Kursbeginn schriftlich getestet. Auf Wunsch des Kunden wurde das Schulungsmaterial des VDZ an die Bedürfnisse des Werkes und die Gegebenheiten vor Ort angepasst. Durch das Seminar sollten die Kursteilnehmer ein besseres Verständnis über die thermischen und mechanischen Prozesstechnologien des Werkes erhalten. Des Weiteren sollten die Kursteilnehmer/innen lernen, wie die Optimierungspotenziale der Anlage sowohl auf der Produktseite als auch hinsichtlich des Energiebedarfs richtig erfasst und berechnet werden. Die theoretischen Lerninhalte wurden durch praktische Übungen an der Anlage ergänzt (**Bilder 2.7-1** und **2.7-2**).

In der ersten Woche vermittelten die Dozenten des VDZ den Teilnehmern, wie eine Energie- und Massenbilanz nach VDZ-Merkblatt Vt10 durchgeführt wird und welche Prozessdaten für die Erstellung einer Energiebilanz nötig sind (siehe **Bild 2.7-1**). Gemeinsam mit den Kursteilnehmern wurden in einem Workshop ein Versuchsplan und ein Berechnungstool speziell für die Ofenanlage des Kunden entwickelt. Im Nachgang wurde an der Anlage gezeigt, wie die einzelnen Parameter messtechnisch bestimmt und ausgewertet werden (siehe **Bild 2.7-2**).

In der zweiten Woche wurde das Thema „Optimierung der Zementmahanlagen“ behandelt. Am Beispiel eines Mühlenaudits wurde vorgeführt, welche Prozessparameter ermittelt werden müssen, um eine Effizienzsteigerung zu erzielen.

Zum Ende der Schulung schrieben die Kursteilnehmer einen Abschlusstest, den alle erfolgreich bestanden. Um den Lernerfolg zu quantifizieren, wurden die Ergebnisse der Vorprüfung mit denen des Abschlusstests verglichen und alle Teilnehmer erhielten abschließend ihre Teilnahmezertifikate. Die Rückmeldung der Teilnehmer und des Managements zu der Schulung waren ausgesprochen positiv. Die erarbeiteten Inhalte aus dem Workshop werden vom Werk zukünftig bei Bilanzierungen berücksichtigt.



**Bild 2.7-1** Theoretischer Unterricht im Schulungsraum des Kunden



**Bild 2.7-2** Begehung der Anlage mit dem Trainer

**Tabelle 2.7-2** Liste der aktuell verfügbaren Onlinekurse in Deutsch und Englisch (Stand 2018)

VDZ-Onlinekurse:	VDZ Online Courses:
LB 0 - Überblick Zementherstellung-Betonanwendung	LB 0 - Overview of cement production and use
<b>Rohmaterialgewinnung</b>	<b>Raw material extraction</b>
LB 1.1 - Rohmaterialgewinnung	LB 1.1 - Raw Material Extraction
LB 1.2 - Wasserhaltungsanlagen	LB 1.2 - Water Drainage Systems
LB 1.3 - LKW-Waschanlagen	
<b>Rohmaterialaufbereitung</b>	<b>Raw material preparation</b>
LB 2.1 - Vorzerkleinerung	LB 2.1 - Primary Comminution
LB 2.2 - Rohstoffe, Mischbett	LB 2.2 - Raw Materials, Blending Bed
LB 2.3 - Mahltrocknungsanlagen für Rohmaterial	LB 2.3 - Combined Drying and Grinding
LB 2.4 - Rohmehlhomogenisierung	LB 2.4 - Raw Meal Homogenization Systems
<b>Klinkerproduktion</b>	<b>Clinker production</b>
LB 3.0 - Drehofenanlagen	LB 3.0 - Rotary Kiln Plants
LB 3.1 - Drehrohrofen	LB 3.1 - Rotary Kilns
LB 3.2 - Feuerungen	LB 3.2 - Firing Systems
LB 3.3 - Vorwärmer	LB 3.3 - Preheaters
LB 3.4 - Calcinator	LB 3.4 - Calciner
LB 3.5 - Bypassanlagen	LB 3.5 - Bypass Systems
LB 3.6 - Klinkerkühler	LB 3.6 - Clinker Coolers
LB 3.7 - Brennstoffe	LB 3.7 - Fuels
LB 3.8 - Betrieblicher Brandschutz	
LB 3.9 - Explosionsschutz	
LB 3.10 - Feuerfest	LB 3.10 - Refractories
<b>Zementproduktion</b>	<b>Cement production</b>
LB 4.1 - Zementmahanlagen	LB 4.1 - Cement Grinding Plants
LB 4.2 - Kugelmühlen	LB 4.2 - Ball Mills
LB 4.3 - Wälzmühlen	LB 4.3 - Roller Mills
LB 4.4 - Gutbettwalzenmühlen	LB 4.4 - High Pressure Roller Mills
LB 4.5 - Siehter	LB 4.5 - Classifiers
LB 4.6 - Zement-Einsatzstoffe, Produktprogramm	LB 4.6 - Cement Raw Materials, Products
LB 4.7 - Zement-Mischanlage	LB 4.7 - Cement Blending Systems
LB 4.8 - Zementkühlung	LB 4.8 - Cement Cooling
<b>Packerei und Versand</b>	<b>Packing plant and dispatch</b>
LB 5.1 - Packmaschinen	LB 5.1 - Packing Machinery
LB 5.2 - Palettiermaschine	LB 5.2 - Palletizing Machines
LB 5.3 - Zementlagerung	LB 5.3 - Cement Storage
LB 5.4 - Verladeeinrichtung	LB 5.4 - Loading Equipment
<b>Allgemeine Betriebseinrichtungen</b>	<b>General plant equipment</b>
LB 6.1 - Mechanische Stetigförderer	LB 6.1 - Mechanical Continuous Conveyors
LB 6.2 - Pneumatische Förderer	LB 6.2 - Pneumatic Conveyors
LB 6.3 - Prozessmesstechnik	LB 6.3 - Process Measurement Techniques
LB 6.4 - Waagen und Dosiereinrichtungen	LB 6.4 - Metering Equipment
LB 6.5 - Antriebstechnik	LB 6.5 - Drive Technology
LB 6.6 - Druckluftversorgung	LB 6.6 - Compressed Air Supply
LB 6.7 - Kühlwasserversorgung und -aufbereitung	LB 6.7 - Cooling Water Supply
LB 6.8 - Stromversorgung - Hoch- und Mittelspannungsanlagen	
LB 6.9 - Stromversorgung - Niederspannungsanlagen	
<b>Umweltschutz</b>	<b>Environmental protection</b>
LB 7.1 - Einführung in das Umweltrecht	
LB 7.2 - Entstaubungseinrichtungen	LB 7.2 - Dedusting Equipment
LB 7.3 - Minderung von Gasemissionen	LB 7.3 - Reduction of Gas Emissions
LB 7.4 - Lärmschutz	
LB 7.5 - Abfallmanagement	
LB 7.6 - Abwassermanagement	
LB 7.7 - Steinbrüche - Folgenutzung	
LB 7.8 - Umweltmesstechnik	
<b>Qualitätssicherung</b>	<b>Quality assurance</b>
LB 8.1 - Qualitätsmanagement/ Qualitätssicherung	
LB 8.2 - Probenahmeeinrichtungen	
<b>Kurse von Partnern des VDZ:</b>	<b>Courses from partners of VDZ:</b>
RT 01 - Regelungstechnik	RT 01 - Control technology

**Praxisbeispiel e-Learning weltweit**

Der VDZ bietet unter [www.elearning-vdz.de](http://www.elearning-vdz.de) seit 2010 die VDZ-Onlinekurse als internetgestütztes Aus- und Weiterbildungsangebot für die Zementindustrie an. Zunächst wurde das Angebot in Deutsch erstellt, aufgrund des international hohen Interesses wurde es anschließend ins Englische und dann ins Russische übersetzt. Mittlerweile liegen über 50 Kurse in Deutsch, 38 Onlinekurse in Englisch und 40 Onlinekurse in Russisch vor. Pro Jahr werden die VDZ-Onlinekurse von mehr als 1 500 Benutzern weltweit genutzt.

**Ausgangssituation**

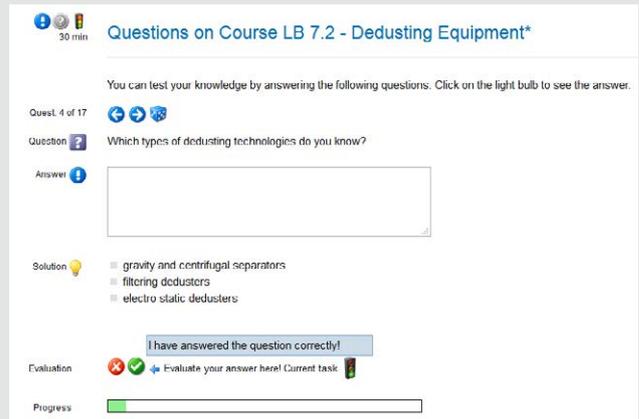
Der Kunde nutzte seit 2010 in seinen deutschen Niederlassungen die deutschsprachigen Onlinekurse des VDZ. Aufgrund der positiven Erfahrung mit den Kursen und dem intern ermittelten, weltweiten Bedarf an Weiterbildungsmöglichkeiten im Zementsektor, wurde beschlossen, das Angebot in weiteren Ländern auszurollen. So sollten weltweit alle Mitarbeiter die Möglichkeit erhalten, sich mit Hilfe der VDZ-Onlinekurse aktuelles Wissen rund um den Zementherstellungsprozess anzueignen und vorhandenes Wissen zu überprüfen (Bild 2.7-3). Die Projektsteuerung lag beim technischen Zentrum des Kunden sowie der zentralen Personalabteilung, die bereits eine eigene Lernlösung im Intranet betrieb und diese durch die Kurse des VDZ anreichern wollte.

**Vorgehensweise**

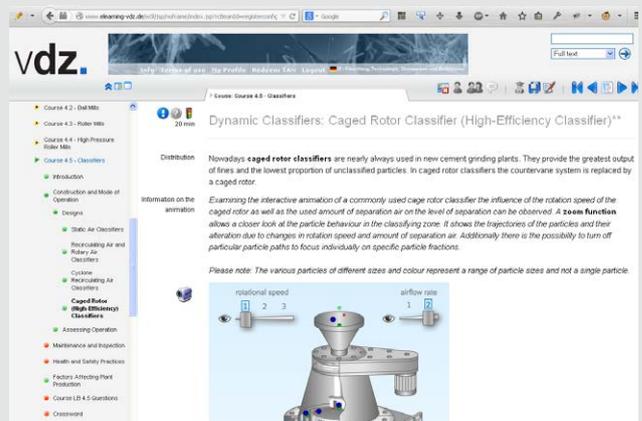
Aufgrund innerbetrieblicher Anforderungen wurde vom VDZ für den Kunden eine eigene Lernplattform mit den VDZ-Onlinekursen aufgesetzt. Neben der Übernahme des Corporate Design des Kunden wurde die Lernplattform mittels einer eigens entwickelten Schnittstelle an das Intranet des Kunden angeschlossen. Teilnehmer können darüber ohne die Eingabe von Anmeldedaten auf die VDZ-Onlinekurse zugreifen. Zur Auswertung der Nutzungsaktivitäten in den VDZ-Onlinekursen wurde eine weitere Schnittstelle implementiert. Nachdem zunächst die englischsprachigen Nutzer des Kunden erfolgreich mit der neuen Lernplattform gestartet waren, wurden nach einiger Zeit auch die deutschsprachigen Nutzer auf diese Plattform überführt. Für die russischsprachigen Nutzer des Kunden wurde vom VDZ eine eigene Lösung implementiert, um auch kyrillische Zeichensätze richtig wiederzugeben.

**Ergebnisse**

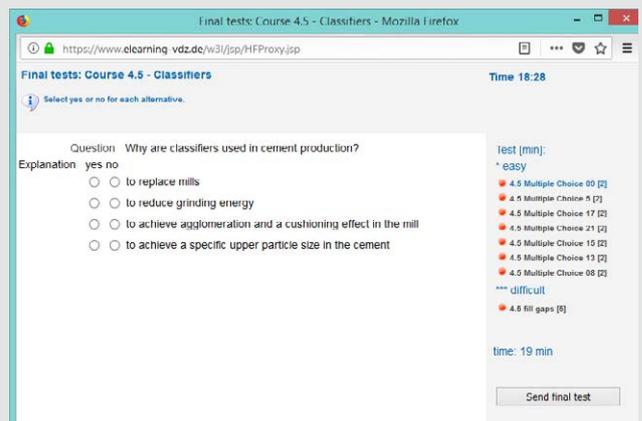
Mittlerweile nutzen pro Jahr mehr als 1 000 Mitarbeiter die Onlinekurse in drei Sprachen, um Ihr Fachwissen zur Zementherstellung zu erweitern. Durch die Lerninhalte des VDZ und die darin enthaltenen Tests konnte der Kunde sicherstellen, dass weltweit ein breites Grundwissen zur Zementherstellung vorhanden ist und bestehendes Wissen weiter ausgebaut wird. Damit erfüllen die VDZ-Onlinekurse eine wichtige Funktion innerhalb der weltweiten Personalentwicklungsstrategie des Kunden.



**Bild 2.7-3** Selbstkontrollfragen im VDZ-Onlinekurs LB7.2 auf Englisch



**Bild 2.7-4** Englischer Onlinekurs LB 4.5 - Sichter in der VDZ-Lernplattform

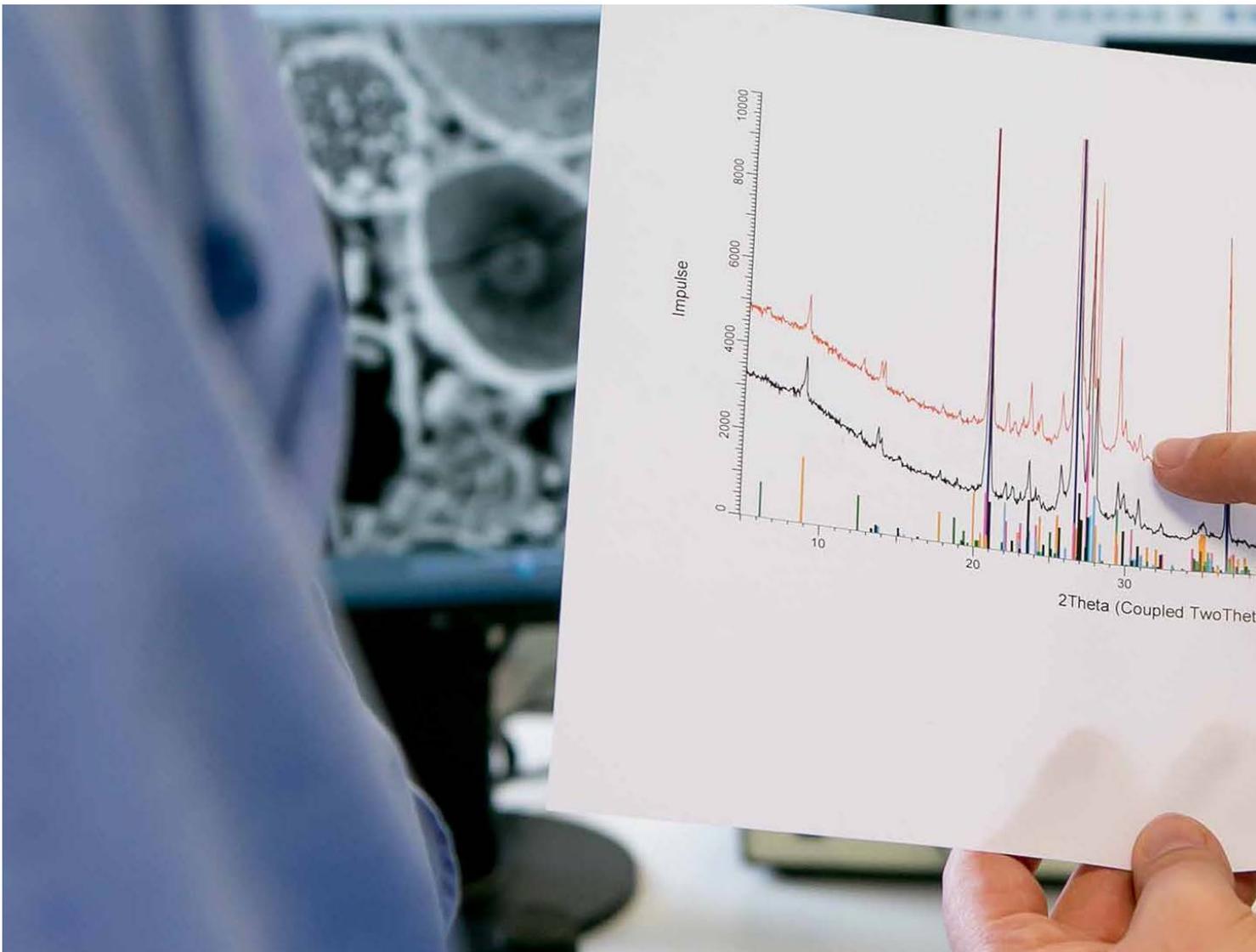


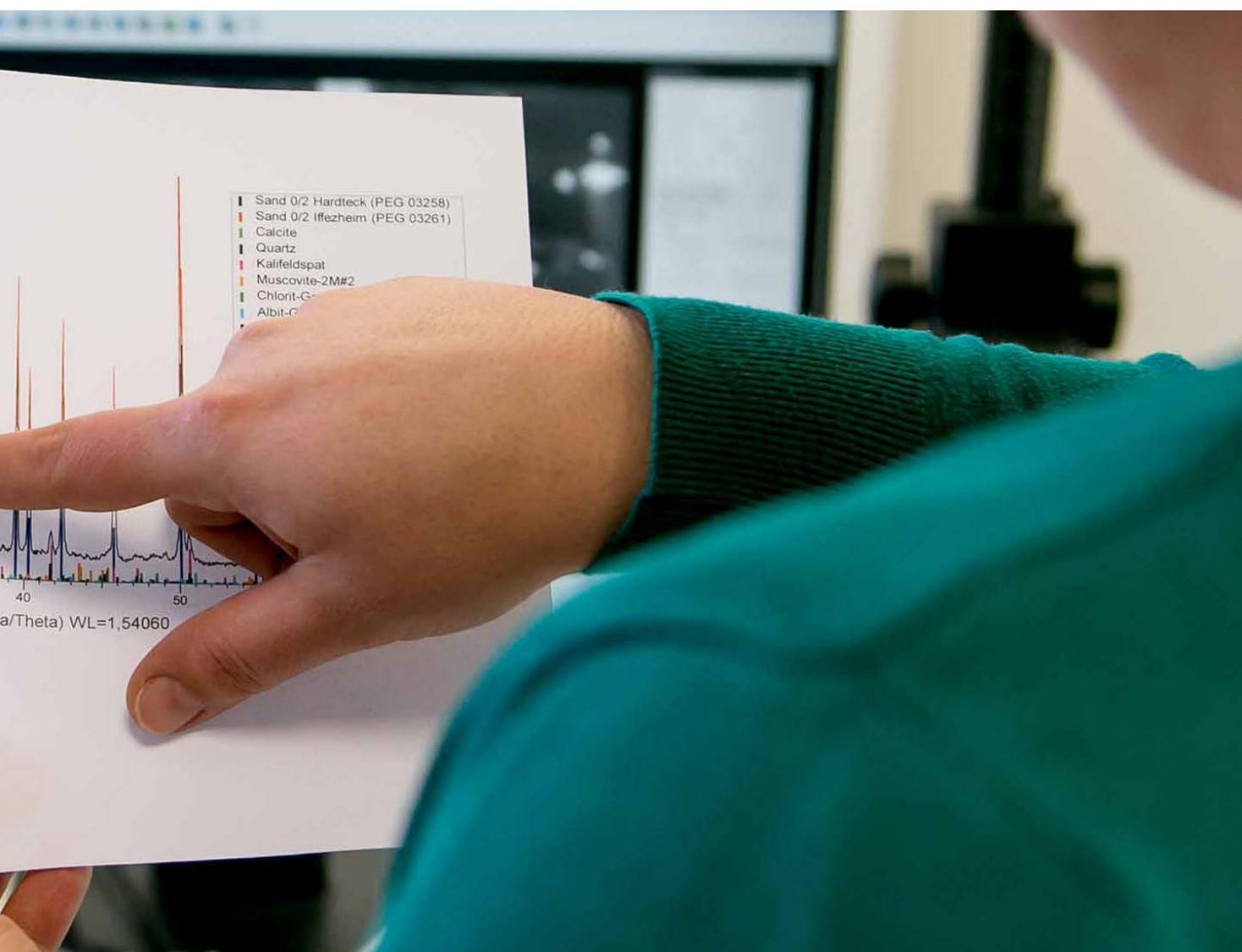
**Bild 2.7-5** Englischer Abschlusstest des Kurses LB 4.5 - Sichter



# 3

## Forschungsprojekte des VDZ





## Anwendungsorientierte Forschung im VDZ

Seit seiner Gründung vor mehr als 140 Jahren verbindet der VDZ im Rahmen der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) Grundlagenforschung mit der konkreten technischen Anwendung in der Industrie. Für den zurückliegenden Berichtszeitraum der Jahre 2015 bis 2018 haben wir die wesentlichen Ziele und Ergebnisse unserer Forschungsarbeit für Sie zusammengefasst. Die Schwerpunkte der Forschung bilden wie in den vergangenen Jahren die Verfahrenstechnik und der Umweltschutz bei der Herstellung sowie, im Hinblick auf die Anwendung, auch die Leistungsfähigkeit von Zement in Mörtel und Beton. Mit Forschungsvorhaben z. B. zur Reduzierung von Stickstoffoxiden, zu den Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit hüttensand- und flugaschereichen Zementen oder zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) durch den gezielten Einsatz von Steinkohlenflugasche trägt der VDZ zu einer wettbewerbsfähigen und umweltfreundlichen Zementherstellung und einer qualitativ hochwertigen Betonbauweise bei. In seinen Projekten zur Weiterbildung und zum Wissenstransfer konnte der VDZ in den vergangenen Jahren viele Neuerungen entwickeln, die den Beschäftigten der Zementindustrie zugutekommen und die Innovationsfähigkeit der gesamten Branche verbessern.

Als Gründungsmitglied der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) ist der VDZ schon seit 1954 Teil des AiF-Forschungsnetzwerks. Gemeinsam mit den deutschen Zementherstellern erarbeitet der VDZ als Forschungszentrum der Zementindustrie neue Ideen und Konzepte für innovative Wissenschaftsprojekte. Die Forschungstätigkeit des VDZ wird vom Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft mit dem Gütesiegel „Innovativ durch Forschung“ gewürdigt. Zusammen mit den derzeit laufenden Projekten wurden im VDZ in den vergangenen 25 Jahren mehr als 130 Forschungsvorhaben durch die AiF bzw. das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert und durchgeführt.

Eingebunden in viele internationale Forschungsprojekte, insbesondere als Gründungsmitglied der European Cement Research Academy (ECRA), wird sich der VDZ auch zukünftig für eine wettbewerbsfähige sowie umwelt- und ressourcenschonende Zementherstellung engagieren.

### 3.1 Verfahrenstechnik der Zementherstellung

#### 3.1.1 Untersuchung der separaten Feinstmahlung von Zementen zur Verbesserung der Energieeffizienz und der Zementeigenschaften ■

IGF-Vorhaben 18853 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Zeitraum: 10/2015 – 09/2017

##### Hintergrund und Ziele

Die Feinheit von Zementen ist in Deutschland über die vergangenen zehn Jahre hinweg stetig gestiegen. Dementsprechend enthalten Zemente heute vergleichsweise große Anteile an feinen

Partikeln, die die Zementeigenschaften wesentlich bestimmen. Der Feinbereich macht quantitativ nur einen kleinen Teil des Zements aus, ist aber von entscheidender Bedeutung für dessen Qualität, z. B. für die Frühfestigkeit. Die Menge an feinen Partikeln ( $< 8 \mu\text{m}$ ) ist bei industrieller Mahlung kaum steuerbar und gerade bei energieeffizienten Mahlverfahren nur wenig ausgeprägt. Um die Feinanteile zu erhöhen, müssen jedoch bei der gemeinsamen Mahlung alle Kornfraktionen beansprucht werden. Dies führt häufig zur Übermahlung des Produktes.

Während die in Deutschland überwiegend eingesetzten Kugelmühlen grundsätzlich ausreichende Feinanteile produzieren, sind die energieeffizienteren Anlagen zur Hochdruckzerkleinerung, wie Vertikal- und Gutbett-Walzenmühlen, je nach Betriebsweise nur eingeschränkt dazu in der Lage. Um die energetischen Vorteile dieser Mühlen besser nutzbar zu machen, wurde im vorliegenden Projekt untersucht, wie die in der Korngrößenverteilung gewünschten Feinanteile durch eine separate Feinstmahlung hergestellt werden können.

Eine separate Feinstmahlung von Zementen wurde in der Zementindustrie bislang nicht realisiert. Der Energiebedarf sollte bei mehrstufiger, angepasster Zerkleinerung theoretisch gesenkt werden können. Zudem lassen sich Festigkeitsentwicklung und Wasseranspruch durch aktive Beeinflussung der Korngrößenverteilung steuern. Kleine Feinstmahlaggregate sind zudem weniger kapitalintensiv als Mahlanlagen mit üblichen Produktionskapazitäten. Die Mischung von hochfein aufgemahlten Anteilen aus der separaten Feinstmahlung mit groben Zwischenprodukten könnte direkt in vorhandenen Mischeinrichtungen umgesetzt werden.

##### Vorgehensweise

Gegenstand der Untersuchung war, wie die benötigten Feinanteile auf einer speziellen Feinstmühle (am Beispiel einer schnell rotierenden Rührwerkskugelmühle, **Bild 3.1.1-1**) durch getrennte Mahlung hergestellt werden können, und wie sich dieser Herstellungsprozess auf die Zementqualität auswirkt. Hierzu wurden zwei Klinker mit unterschiedlichen chemisch-mineralogischen Zusammensetzungen genutzt. Der Großteil des gewünschten Endproduktes wurde in einer kleintechnischen Vertikal-Wälzmühle (**Bild 3.1.1-2**) erzeugt und durch anteilige separate Feinstmahlung und Mischungen auf die gewünschte Endfeinheit gebracht. Für die gezielte Charakterisierung der erzeugten Feinstanteile ( $< 8 \mu\text{m}$ ) liegen in der Zementindustrie kaum Erfahrungen vor. Daher wurde die Eignung der bereits etablierten, mit ausreichender Erfahrung in der Praxis genutzten Laserbeugung zur Bestimmung der Korngrößenverteilung für die Charakterisierung trockener Feinstfraktionen gezielt untersucht. Auf dieser Grundlage wurde ein Modell entwickelt, das aus den verschiedenen Zwischenprodukten der Vor- und Feinstmahlung die energetisch effizienteste Mischung bestimmt, um eine vordefinierte Korngrößenverteilung z. B. aus einer Kugelmühle nachzubilden. Mit Hilfe des Modells lassen sich die separat gemahlten Bestandteile der Mischung solange optimieren, bis die Abweichung zur angestrebten Korngrößenverteilung minimal ist.

Um Einflüsse auf die Zementqualität zu erkennen, wurden 32 Zemente hergestellt und hinsichtlich ihrer Eigenschaften in Mörtelversuchen analysiert. Hierzu zählte auch das Produkt einer Referenzmahlung in einer halbtechnischen Umlaufmahlanlage mit Kugelmühle. Gemessen wurden u. a. die Festigkeitsentwicklung und der Wasseranspruch.



**Bild 3.1.1-1** Rührwerkskugelmühle zur separaten Feinstmahlung



**Bild 3.1.1-2** Mahlraum der kleintechnischen Vertikal-Wälzmühle

### Ergebnisse

Die Eignung der Feinstmahlung für die Zementhauptbestandteile Klinker, Hüttensand, Flugasche und Kalkstein wurde zu Beginn des Projektes grundsätzlich bewertet. Es zeigte sich erwartungsgemäß, dass Feinstmühlen deutlich größere Feinanteile erzeugen können als die üblichen Anlagen der Zementindustrie. Zur weiteren Charakterisierung wurden die Mahlbarkeiten der untersuchten Zementhauptbestandteile bestimmt. Beide verwendeten Klinker verfügten trotz unterschiedlicher chemisch-mineralogischer Zusammensetzungen über eine vergleichbar gute Mahlbarkeit. Dies ermöglichte es, im weiteren Projektverlauf die Einflüsse der Reaktivität der Klinker auf die separate Feinstmahlung bei gleicher Zerkleinerungshistorie zu untersuchen.

Die Eignung der Lasergranulometrie zur Charakterisierung von Zementfeinstfraktionen wurde ebenfalls analysiert. Dabei wurde deutlich, dass die verwendete Beugungstheorie sowie die Konzentration der Probe im Dispergiermittel entscheidenden Einfluss auf das Messergebnis haben. Um das Gesamtprodukt zu beschreiben, eignet sich die Fraunhofer-Näherung. Die häufig für die Auswertung verwendete Verteilung nach Rosin, Rammler, Sperlring und Bennet (RRSB) kann die erzeugten Feinstfraktionen ohne Einschränkungen beschreiben. Stark ausgeprägte Multi-Modalitäten der Korngrößenverteilungen wurden bei den untersuchten Mischungen nicht festgestellt.

Aufbauend auf diesen Grundlagen wurden die maximal erreichbaren Feinheiten in der trocken arbeitenden Rührwerkskugelmühle mittels iterativer Versuchsreihen bestimmt. Die mit diesem Verfahren erreichbaren maximalen Feinheiten bewegen sich bei Lageparametern nach RRSB zwischen 6 und 10  $\mu\text{m}$ . Für die verwendete Mühle wurde eine starke Abhängigkeit der Aufgabekorngröße ermittelt. Grobe Partikel können nur schlecht durch das Feinstmahlverfahren zerkleinert werden.

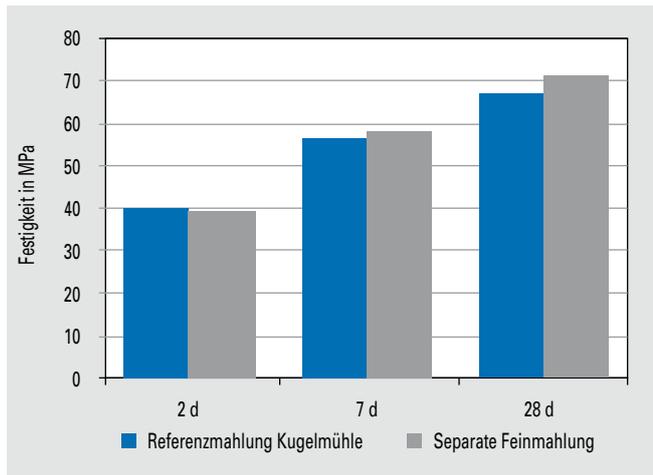
Um separat feinstgemahlene Materialien gezielt mit weiteren Zwischenprodukten zu einer gewünschten Korngrößenverteilung zusammenstellen zu können, wurde ein Modell entwickelt. Dadurch lässt sich mit Korngrößenverteilungen aus unterschied-

lichen Mahlanlagen in Abhängigkeit von verschiedenen Randbedingungen die bestmögliche Zusammensetzung der Mischung berechnen. Als Indikator für die Güte der Mischung wird eine Abweichung zu einer Referenzkorngrößenverteilung ermittelt. Diese kann dann dem spezifischen Energiebedarf zur Mahlung der notwendigen Komponenten der Mischung gegenübergestellt werden.

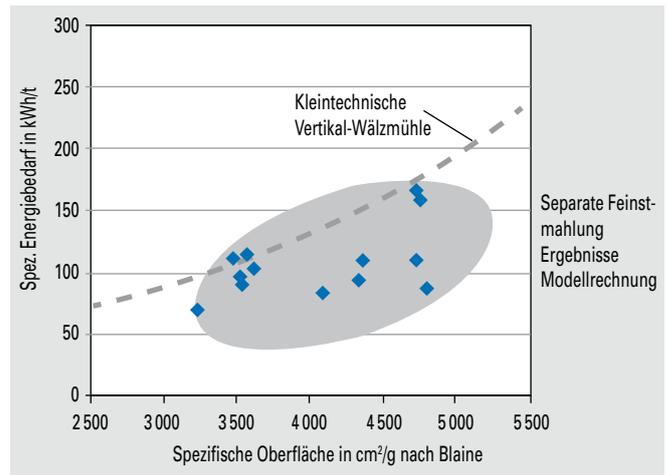
Mit den vorhandenen Zwischenprodukten können verschiedenste Korngrößenverteilungen mit unterschiedlichsten Feinheiten und Verteilungsbreiten hergestellt werden. Damit ermöglichen bereits wenige Zwischenprodukte die Herstellung von Zementen verschiedener Festigkeitsklassen. Zudem können in den Grenzen der verfügbaren Zwischenprodukte auch die Verteilungsbreiten der Korngrößenverteilungen eingestellt werden.

Um die separate Feinstmahlung zu beurteilen, galt es, deren Einflüsse auf die wichtigsten Zementeigenschaften zu überprüfen. Hierzu wurden an 32 Proben Festigkeitsentwicklung, Wasseranspruch und Erstarrungsverhalten bestimmt. War der Feinanteil ausreichend stark repräsentiert, zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zu Zementen, die auf Kugelmühlen gemahlen wurden. **Bild 3.1.1-3** stellt exemplarisch die Festigkeitsentwicklung von Zementen aus separater Feinstmahlung und Kugelmühlmahlung einander gegenüber. Die Betrachtung der Hydratationswärmeentwicklung zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mischungen und der Referenzmahlung der Kugelmühle. Aufgrund der Tendenz des Modells, durch die verwendeten Zwischenprodukte etwas breitere Korngrößenverteilungen zu erzeugen, konnten die Wasseransprüche der Mischungen im Vergleich zur Referenz aus der Kugelmühle reduziert werden.

In den durchgeführten Versuchen wurden die angestrebten Festigkeiten nach Norm in vielen Fällen ohne Probleme erreicht. Die Mischungen müssen daher die Korngrößenverteilung der Referenzzemente nicht exakt nachstellen, um die Festigkeitsanforderungen zu erfüllen. Dies ermöglicht eine verhältnismäßig große Toleranz bei der Auslegung der Mischungen. In Einzelfällen können die Festigkeitswerte jedoch über- oder unterschritten



**Bild 3.1.1-3** Vergleich der Festigkeitsentwicklung von Zementen aus separater Feinstmahlung und Kugelmühlmahlung



**Bild 3.1.1-4** Spezifischer Energiebedarf der Vertikal-Wälzmühle im Vergleich zur separaten Feinstmahlung

werden. Dies geschieht abhängig von der Korngrößenverteilung und der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung. In diesen Fällen müssen die Toleranzen enger gewählt und die Verteilung insbesondere im Feinstbereich angepasst werden. Bei deutlicher Überschreitung der Zielfestigkeiten besteht durch Senkung der Feinanteile das Potenzial, den spezifischen Energiebedarf zur Herstellung weiter zu senken. Die angestrebten Korngrößenverteilungen sind grundsätzlich so robust auszulegen, dass die Zielfestigkeiten trotz prozessbedingter Schwankungen großtechnischer Anlagen sichergestellt sind.

Vor diesem Hintergrund hat sich herausgestellt, dass der Feinstbereich zwischen 3 und 8  $\mu\text{m}$  von besonderer Wichtigkeit für die Zementeigenschaften ist. Der Anteil in dieser Fraktion hat entscheidende Auswirkungen auf die Frühfestigkeiten und den Wasseranspruch. Dementsprechend wird empfohlen, diesem Bereich bei der Bewertung von Mischungen besonderes Gewicht zu verleihen.

**Bild 3.1.1-4** zeigt die Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfs der kleintechnischen Vertikal-Wälzmühle im Vergleich zum berechneten spezifischen Energiebedarf der hergestellten Mischungen aus der separaten Feinstmahlung. Dabei ist zu beachten, dass die Vertikalmühle im Labormaßstab einen außergewöhnlich hohen spezifischen Energiebedarf aufweist. Besonders bei hohen Zielfeinheiten profitieren die Mischungen von groben Zwischenprodukten aus der Vertikal-Wälzmühle, die mit hohen Anteilen von nachgemahlenem Produkt gemischt werden. Dies wird großtechnisch nicht erwartet. Im industriellen Maßstab arbeiten Vertikal- und Gutbett-Walzenmühlen deutlich effizienter als Kugelmühlen. Somit könnten trotz energieintensiver Feinstmahlung günstige Energiebedarfe bei den Mischungen erzielt werden. Die separate Feinstmahlung ist technisch realisierbar und liefert gezielt gleichwertige oder bessere Produkteigenschaften. Damit besitzt die Technologie grundsätzlich das Potenzial zum Einsatz in der Zementproduktion.

Im nächsten Schritt sind jedoch weitere großtechnische Untersuchungen nötig, da der Energiebedarf durch die Eigenheiten der Laboranlagen nur bedingt auf den industriellen Maßstab skalierbar ist. Besonders der Einfluss verschiedener großtechnisch verfügbarer Feinstmühlen auf den Energiebedarf und die erzeugten

Korngrößenverteilungen sowie die maximal erreichbare Feinheit sind von Interesse. Um den Gesamtenergiebedarf für die separate Feinstmahlung abschließend bewerten zu können, müssen hier weitere Untersuchungen an kontinuierlich betriebenen Feinstmühlen mit guter Skalierbarkeit durchgeführt werden.

### 3.1.2 Untersuchung von Maßnahmen zur Steigerung der Ersatzbrennstoff-Substitution in der Hauptfeuerung von Zementdrehrohröfen ■

IGF-Vorhaben 18862 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
 Projektpartner: Lehrstuhl für Energieanlagen- und Energieprozesstechnik (LEAT), Ruhr-Universität Bochum; Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik (LUAT), Universität Duisburg-Essen  
 Projektzeitraum: 10/2015 – 03/2018

#### Hintergrund und Ziele

Bei der Zementherstellung wird der wesentliche Anteil an thermischer Energie für das Brennen des Zementklinkers in Drehofenanlagen aufgewendet. Aufgrund des hohen Energiekostenanteils an den Herstellungskosten ist die Zementindustrie seit jeher bemüht, den Brennstoffeinsatz zu reduzieren und zu optimieren. Maßgebliche Anstrengungen konzentrieren sich auf die Substitution fossiler Brennstoffe durch Alternativbrennstoffe. Neben den Brennstoffeigenschaften bestimmen die Anlagen- und Brennerkonstruktion, die Gestaltung der Zufuhr kalter Primärluft und heißer Sekundärluft im Bereich Brenner/Ofenkopf sowie die Brennstoffzufuhr die erreichbaren Alternativbrennstoffraten. Eine Beeinträchtigung der Klinkereigenschaften soll generell vermieden werden. Im Projekt wurden die Sensitivitäten und Abhängigkeiten der verschiedenen Einflussgrößen in einer anlagenunabhängigen allgemeingültigen Form mit Hilfe von CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) und Betriebsmessungen erarbeitet.

#### Vorgehensweise

In der ersten Phase des Projektes wurden Zielgrößen für die CFD-Modellierungen anhand typischer Kenngrößen von

Drehofenanlagen festgelegt. In der zweiten Projektphase galt es, numerische Simulationsrechnungen der Verbrennung von Alternativbrennstoffen in Drehofenanlagen durchzuführen. Dabei ermittelte der Projektpartner LUAT die Anströmprofile der Sekundärluft aus Simulationen der Klinkerkühler- und Ofenkopfgeometrie, und der Projektpartner LEAT verwendete sie als Randbedingung für die Feuerungssimulationen im Drehrohr. Als Grundlage für die Berechnungen wurden die Brennstoffe einer ausführlichen Analyse ihrer verbrennungstechnischen Eigenschaften unterzogen.

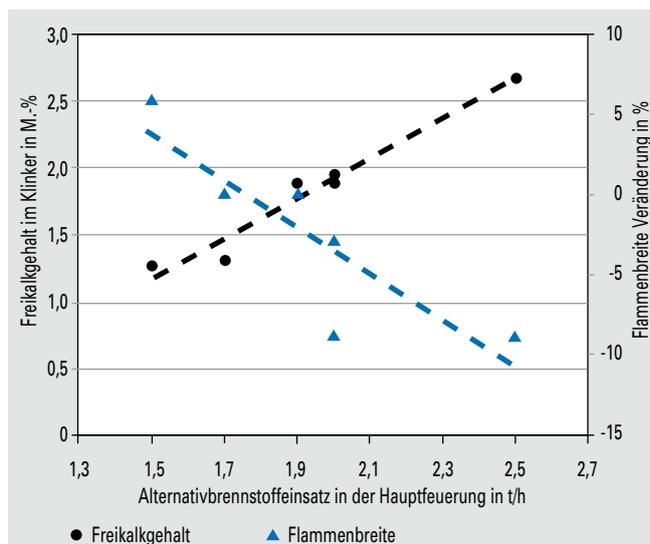
Zur Validierung der CFD-Simulationen wurden Messdaten von einem Technikums-Versuchsofen und von Betriebsversuchen von Drehofenanlagen herangezogen. Um die Abhängigkeiten der verschiedenen Einflussgrößen systematisch zu untersuchen, wurden im Betriebsversuch gezielt die Betriebsparameter (Brennstoffzufuhr, Substitutionsrate der Alternativbrennstoffe und deren Feinheit etc.) variiert. Zudem erfolgten Sensitivitätsanalysen mit unterschiedlichen Klinkerkühler-, Ofenkopf- und Brennergeometrien. Dies geschah anhand von CFD-Simulationsrechnungen, die eine relativ freie Festlegung von Geometrien und Randbedingungen (in Anlehnung an reale Anlagen) ermöglichen. Abschließend sollten in der dritten Projektphase die Erkenntnisse in einem Leitfaden für Anlagenbetreiber und Anlagenhersteller zusammengestellt werden. Dabei waren auch Best Practice-Regeln für die Durchführung von Simulationsrechnungen zu erarbeiten. Nachfolgend wird der aktuelle Stand der Arbeiten zusammengefasst.

### Betriebsversuche

Nach Abschluss aller Vorarbeiten zur Modellbildung und Zielgrößendefinition führte der VDZ Betriebsversuche an zwei Ofenanlagen durch, bei denen flugfähige Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen (Fluff) zum Einsatz kamen. An der ersten Ofenanlage ergab eine schrittweise Anhebung der Alternativbrennstoffrate in der Hauptfeuerung einen Anstieg des Klinkerfreikalkgehalts, eine Verschmälerung und Verlängerung der Flamme sowie damit einhergehend einen Anstieg der Temperatur am Ofeneinlauf (**Bild 3.1.2-1**). Bei der optischen Flammenanalyse mittels Thermografiekamera wurden darüber hinaus ein Abkühlen der Flamme und eine Verzögerung der Brennstoffzündung festgestellt. Mikroskopieuntersuchungen der Klinker ergaben Hinweise auf eine etwas geringere Kühlrate und eine Verlängerung der Vorkühlzone. Bei Einsatz eines vergleichsweise grobstückigen Brennstoffes zeigten sich ähnliche Auswirkungen auf die Flamme und den Klinker. Wurde der Hauptbrenner um 30 cm in den Ofen vorgeschoben, hatte dies zwar eine signifikante Verbesserung der Brennstoffzündung, aber auch eine Verschmälerung und Verlängerung der Flamme zur Folge. Beides ist vermutlich auf die veränderte Anströmung der Flamme mit Sekundärluft zurückzuführen. Die Freikalkgehalte blieben indes unverändert. Insgesamt ergaben die Messdaten des ersten Betriebsversuchs ein schlüssiges Bild, um die Strömungs-, Verbrennungs- und Klinkerbrennbedingungen in der CFD-Simulationen zu validieren.

### CFD-Simulationen

Die ersten Simulationsrechnungen ergaben eine qualitativ gute Übereinstimmung zwischen Modellrechnung und Messdaten (Technikums-Versuchsofen). Für die Durchführung der Sensitivitätsanalysen anhand von CFD-Simulationen wurden anschließend die Geometrien einer Referenz-Ofenanlage festgelegt, die Rechengitter für den Kühler, Ofenkopf und Drehrohr erstellt sowie verschiedene Variationsrechnungen durchgeführt. Neben der Erprobung unterschiedlicher Turbulenzmodelle wurden dabei u. a. verschiedene Primärlufteinstellungen, Sekundärlufttemperaturen und Brennstoffzugebeorte simuliert.



**Bild 3.1.2-1** Freikalkgehalt und Flammenbreite bei erheblicher Steigerung der Alternativbrennstoffrate. Ergebnis von Betriebsversuchen an einer Drehofenanlage.

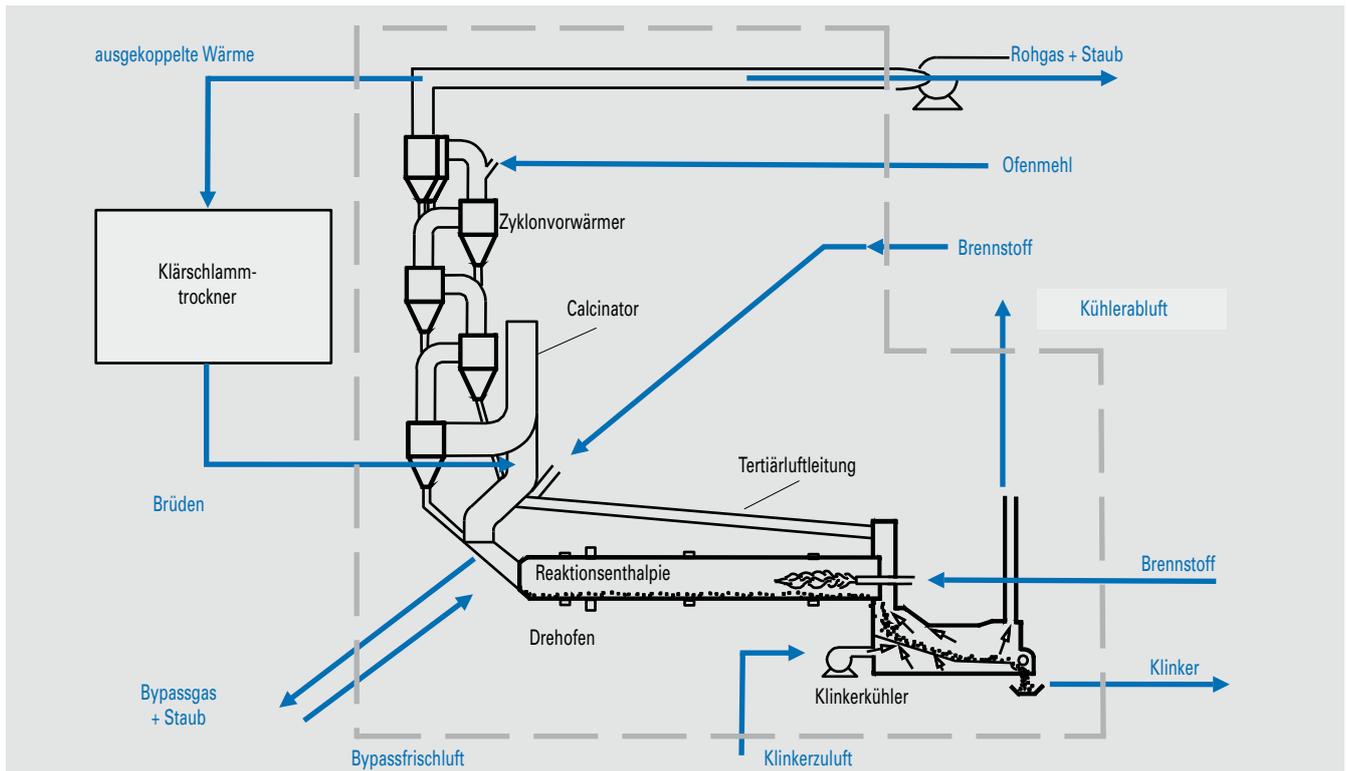
Für die Ofenanlage, an der der erste Betriebsversuch stattfand, wurden das Rechengitter erstellt, erste Simulationsrechnungen durchgeführt und mit den vorläufigen Ergebnissen der Sensitivitätsanalysen verglichen. Auffallend war, dass die Umwandlungsgrade der Partikel in der Gasphase (vor Kontakt mit Ofenwand/Brenngut) im Vergleich zu den Sensitivitätsanalysen deutlich höher lagen. Erste Auswertungen weisen darauf hin, dass die Sekundärluftanströmung aus dem Ofenkopf die Flugbahn der Brennstoffpartikel und deren Aufenthaltszeit in der heißen Flamme relativ stark beeinflussen. Mit Erstellung des Ergebnisberichtes zum zweiten Betriebsversuch und weiteren Simulationsrechnungen waren die Projektarbeiten abgeschlossen.

### 3.1.3 Erhöhung der Energieeffizienz und Substitutionsrate im Klinkerbrennprozess durch Trocknung und Mahlung von Alternativbrennstoffen ■

IGF-Vorhaben 18589 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektzeitraum: 07/2016 – 06/2018

#### Hintergrund und Ziele

Der Einsatz alternativer Brennstoffe bei der Klinkerherstellung setzt voraus, dass diese eine gleichmäßige Qualität aufweisen. So dürfen z. B. Feuchtegehalte und Partikelgröße nur innerhalb bestimmter Bandbreiten schwanken. Die Verfügbarkeit dieser hochwertigen Alternativbrennstoffe bleibt allerdings begrenzt. Demgegenüber sind weniger hochwertige Alternativbrennstoffqualitäten, die einen hohen und gleichzeitig stark schwankenden Feuchtegehalt und/oder einen hohen Anteil grober Partikel aufweisen, auf dem Markt besser verfügbar. Hierzu zählen etwa bestimmte hoch- und mittelkalorische flugfähige Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen (Fluff) sowie mechanisch entwässertes Klärschlamm.



**Bild 3.1.3-1** Enthalpieströme, die im Rahmen einer Energiebilanz um eine Ofenanlage mit Klärschlamm-trockner ermittelt wurden (Betriebsmessung)



**Bild 3.1.3-2** Messung der Heißgastemperatur bei einer Betriebsmessung

Es stellt sich zunehmend die Frage, inwieweit es technisch und wirtschaftlich sinnvoll ist, diese weniger hochwertigen Alternativbrennstoffe vor Aufgabe auf den Ofen durch geeignete externe Trocknung, Zerkleinerung und Homogenisierung vor Ort im Zementwerk aufzubereiten. Die Aufbereitung kann getrennt in Trocknungs- oder Mahlanlagen sowie kombiniert in Mahltrocknungsanlagen erfolgen. Ein Vorteil der dem Klinkerbrennprozess vorgeschalteten Trocknung besteht darin, dass dafür überschüssige Abwärme aus dem Prozess genutzt werden kann. Inwieweit dabei die Energieeffizienz des Klinkerbrennprozesses im Vergleich zur „internen“ Trocknung im Drehofen gesteigert und ggf. zugleich die Rate an alternativen Brennstoffen weiter erhöht werden kann, sollte im Rahmen des Forschungsprojektes untersucht werden.

#### Vorgehensweise

Im ersten Schritt sollte ermittelt werden, inwieweit relativ inhomogene Alternativbrennstoffe unaufbereitet in den Ofen eingebracht werden können und wie sich dies auf den Ofenbetrieb auswirkt. Schwerpunktmäßig sollte dann untersucht werden, inwieweit es technisch und wirtschaftlich sinnvoll ist, diese Brennstoffe einsetzbar zu machen, indem ein externer Brennstofftrockner oder eine Brennstoffmühle im Zementwerk betrieben wird. Dabei war der Nutzen entsprechender Anlagen zu bestimmen und dem Aufwand gegenüberzustellen. Hierfür war geplant, Betriebsversuche in Zementwerken durchzuführen sowie eine Wirtschaftlichkeitsstudie zu erstellen.

Im Rahmen der Betriebsversuche wurden komplette Energiebilanzen um die Ofenanlagen erstellt, um den Betrieb mit und ohne externe Trocknung aus energetischer Sicht vergleichen zu können. Ferner wurden an einer Ofenanlage mit Brennstoffmühle unterschiedliche Betriebseinstellungen erprobt und die Auswirkungen auf den Ofenbetrieb und die Klinkereigenschaften untersucht.

Auf Basis der Ergebnisse wurden abschließend Handlungsempfehlungen für die Betreiber ausgearbeitet.

### Ergebnisse/Stand der Arbeiten

Mehrere Betriebsversuche wurden durchgeführt und bei unterschiedlichen Betriebseinstellungen jeweils eine Energiebilanz erstellt. Für die Bilanz wurden bei allen ein- und austretenden Gas-, Flüssigkeits- und Feststoffströmen die Temperatur und der Volumen- bzw. Massenstrom gemessen und daraus die enthaltene Enthalpie berechnet. Die **Bilder 3.1.3-1** und **3.1.3-2** zeigen die im Rahmen des Betriebsversuchs ermittelten Enthalpieströme und beispielhaft eine Temperaturmessung im Heißgas. Zusätzlich erfolgten Feststoffprobenahmen, um die Reaktionsenthalpien ermitteln zu können. Zur Berechnung der Wandwärmeverluste wurden zudem die Wandtemperaturen gemessen.

Die ersten Messungen an einer Ofenanlage mit Klärschlammrockner zeigten, dass die Energiebilanzen mit vergleichsweise geringer Bilanzdifferenz geschlossen werden konnten. Die Versuche widmeten sich dem direkten Einsatz von mechanisch entwässertem Klärschlamm an der Ofenanlage sowie dem Einsatz von Klärschlamm, der zuvor im Trockner auf eine Restfeuchte von ca. 5 M.-% heruntergetrocknet wurde.

Als Strombedarf für den Betrieb des Klärschlammrockners wurde ein Wert von 2,8 kWh/t Klinker ermittelt (ohne Strombedarf der Dickstoffpumpen). Der zusätzliche Strombedarf durch die erhöhte Gebläseleistung des Wärmetauschers lag zwischen 1,5 und 2,7 kWh/t Klinker. Für den Trocknungsprozess wurden aus dem Rohgas eine Wärmemenge von ca. 240 kJ/kg Klinker ausgekoppelt. Ca. 5 % davon wurde über die Brüden des Klärschlammrockners wieder in die Ofenanlage zurückgeführt.

Die Abgasverluste der Ofenanlage über das Rohgas lagen um ca. 90 MJ/t Klinker höher, wenn statt mechanisch entwässertem Klärschlamm ausschließlich getrockneter Klärschlamm eingesetzt wurde. Dies war in erster Linie auf eine Zunahme des Rohgasvolumenstroms und der Rohgastemperatur zurückzuführen. Der höhere Volumenstrom war einerseits eine Folge des höheren Wassereintrages in das Ofensystem über die Brüden, da insgesamt deutlich mehr getrockneter als mechanisch entwässertes Klärschlamm in der Anlage eingesetzt werden konnte (7,2 % gegenüber 2,8 % der gesamten Feuerungswärmeleistung). Zudem wurde beim Betrieb mit getrocknetem Klärschlamm ein höherer Luftüberschuss in der Ofenanlage festgestellt.

Vermutlich besteht noch Optimierungspotenzial hinsichtlich des Klärschlammensatzes in der Hauptfeuerung, um eine bessere Verbrennung mit einer Absenkung von Luftüberschuss und Abgasverlusten zu erreichen. Der kombinierte Einsatz von getrocknetem und mechanisch entwässertem Klärschlamm hatte eine weitere Zunahme der Rohgasverluste um zusätzlich 90 MJ/t Klinker zur Folge. Gegenüber dem Einsatz von ausschließlich mechanisch entwässertem Klärschlamm ergab sich somit ein um 180 MJ/t Klinker erhöhter Energieverlust über das Rohgas. Dieser Energieverlust ist in erster Linie auf die Zunahme des Klärschlammensatzes (10,3 % der gesamten Feuerungswärmeleistung) und den damit verbundenen höheren Wassereintrag in das Ofensystem zurückzuführen. Dem Energieverlust steht eine für den Trocknerbetrieb ausgekoppelte Nutzwärme von ca. 235 MJ/t Klinker gegenüber. Hinsichtlich der Klinkerqualität wurden keine signifikanten Auswirkungen des Klärschlammensatzes festgestellt.

## 3.1.4 Entwicklung eines Verfahrens zur Verwertung von MVA-Schlacke als Rohstoffkomponente bei der Zementherstellung ■

IGF-Vorhaben 18533 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektpartner: Universität Duisburg/Essen  
Projektzeitraum: 06/2016 – 12/2018

### Hintergrund und Ziele

Als Abfallprodukt der Müllverbrennung (MV) fallen in Deutschland pro Jahr ca. 4,8 Mio. t MV-Schlacke an. Diese wird überwiegend im Deponiebau genutzt. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollte ein wirtschaftliches Verfahren entwickelt werden, mit dem aus der Feinfraktion der MV-Schlacke Schwermetalle soweit abgetrennt werden können, dass die mineralische Fraktion als Rohmehls substitut zur Zementherstellung verwendbar wird. Zu jenen Schwermetallen gehören u. a. Kupfer und Gold. Sie liegen in der MV-Schlacke in Gehalten vor, wie sie heute in armen geogenen Erzen vorkommen.

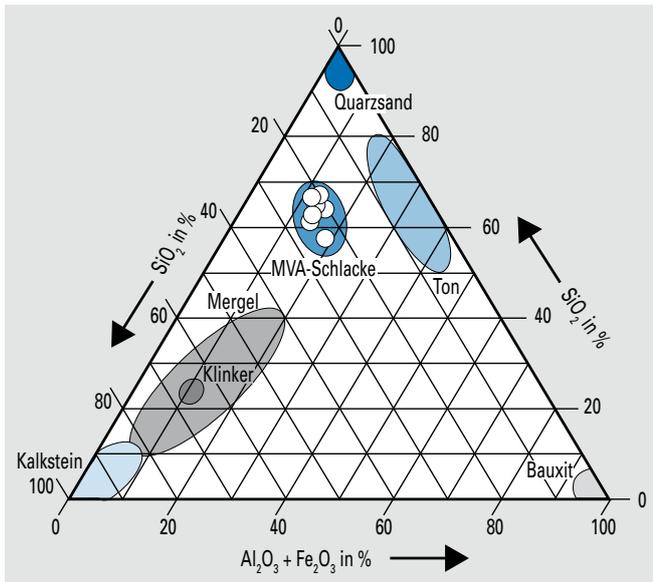
### Vorgehensweise

Die MV-Schlacken wurden zunächst gebrochen, gemahlen und anschließend gesiebt sowie magnetisch getrennt. Die Nichteisenmetalle (NE-Metalle) wurden mithilfe von Wirbelstromverfahren und Waschprozessen abgetrennt, um die restliche mineralische Fraktion für die Zementindustrie nutzbar zu machen. Ein wirtschaftliches Recycling von Metallen aus MV-Schlacke wäre nach derzeitigem Kenntnisstand und derzeitigen Metallpreisen nicht zu realisieren, wenn die feingemahlene Restfraktion deponiert werden muss.

Die verbleibende mineralische Fraktion der Müllverbrennungsschlacke besteht überwiegend aus den Hauptbestandteilen, die zur Zementherstellung verwendet werden, sodass eine stoffliche Verwertung im Klinkerbrennprozess grundsätzlich möglich ist. Sie kann zu einer weiteren Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Zementwerken beitragen, da die mineralischen Aschebestandteile aufgrund der Herkunft aus einem Hochtemperaturprozess bereits entsäuert sind. Darüber hinaus werden durch die Verwendung alternativer Rohstoffe bei der Zementherstellung natürliche Ressourcen geschont.

Für die Beurteilung der Schlackezusammensetzung wurden in erster Linie Feinschlacken in der Korngröße 0 bis 6 mm herangezogen. Im weiteren Aufbereitungsverlauf wurden die Schlacken, wie oben beschrieben, gebrochen bzw. gemahlen und in drei Fraktionen aufgeteilt: < 125 µm, 125 µm bis 1 mm und > 1 mm. Als nächstes erfolgten eine magnetische Trennung sowie die Wirbelstromtrennung des aus der magnetischen Trennung gewonnenen nichtmagnetischen Materials, jeweils in den o. g. drei Fraktionen. Das aus dem vorangegangenen Aufbereitungsschritt gewonnene mineralische Material wurde anschließend mit unterschiedlichen Säuren, Basen und Komplexbildnern für die weitere Reduzierung störender Bestandteile gewaschen. Im nächsten Schritt wurden die Ergebnisse der chemischen Analysen des gewaschenen mineralischen Materials mit dem Ausgangsmaterial nach der Siebung verglichen. So ließ sich der Aufbereitungsfortschritt in der jeweiligen Fraktion nachverfolgen.

Parallel dazu galt es, mithilfe des mathematischen VDZ-Prozessmodells die mögliche Substitutionsrate des Ofenmehls durch die aufbereiteten mineralischen Schlackenbestandteile zu ermitteln. Klinker- und Emissionsprognosen sollten die Schwermetalle und Spurenelemente, die beim Einsatz der Ofenmehl-Schlacke-Mischung im Klinker und im Reingas zu messen wären, vorhersagen. Zuletzt wurden Klinkerbrände mit den berechneten Ofenmehl-Schlacke-Mischungen durchgeführt, um eine Beeinträchtigung der Klinkerqualität auszuschließen.



**Bild 3.1.4-1** Ternäres Diagramm

**Tabelle 3.1.4-1** Vergleich der berechneten Klinkerphasenzusammensetzungen (Angaben in M.-%)

Phase	Mit Referenzmehl	Mit 4,3 % Schlacke
C <sub>3</sub> S	64,3	64,5
C <sub>2</sub> A	14,0	14,7
C <sub>3</sub> A	10,0	9,6
C <sub>4</sub> AF	8,5	8,6

**Stand der Arbeiten**

Im Projektverlauf wurden Schlacken von drei Schlackeverwertern untersucht und aufbereitet. Durch die oben erläuterten Aufbereitungsschritte ließen sich die Konzentrationen von Schwermetallen wie Chrom, Kupfer, Mangan und Blei bezogen auf die Ausgangskonzentration um ca. 30 bis 60 % reduzieren.

Für die mathematische Prozessmodellierung wurde eine Referenzofenanlage mit 3000 Tagestonnen, 5-stufigem Zyklonwärmetauscher, Vorcalcinator und einem Rostkühler definiert. Als Brennstoff diente im ersten Schritt Steinkohlestaub. Für die Modellierung wurde ein „durchschnittliches“ deutsches Ofenmehl (Referenzofenmehl) verwendet. Im nächsten Schritt wurde eine durchschnittliche Zusammensetzung ungewaschener Schlacke (**Bild 3.1.4-1**) in der für den Zementherstellungsprozess relevanten Fraktion (< 125 µm) ermittelt, die als Grundlage für die Bestimmung der Substitutionsrate von Ofenmehl durch Schlacke diente. Dabei wurden Schlackenzusammensetzungen unterschiedlicher Lieferanten berücksichtigt. In der ersten Näherung wurde eine Substitutionsrate von 4,3 % aufbereiteter MVA-Schlacke ausgerechnet. Zu der erhaltenen Ofenmehl-Schlacke-Mischung mussten etwa 16 % Kalk zugegeben werden, um die oxidische Zusammensetzung wieder weitgehend der des Referenzofenmehls anzupassen.

Die ersten Modellergebnisse lassen erkennen, dass sich die Phasenzusammensetzung des mit der Ofenmehl-Schlacke-Mischung gebrannten Klinkers minimal verändert (**Tabelle 3.1.4-1**).

Die Schwermetallemissionsprognosen mit Steinkohle als Brennstoff wiesen darauf hin, dass auch bei einer theoretischen 10%-igen Schlackesubstitutionsrate die Grenzwerte der 17. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV) für Schwermetalle eingehalten werden. Die Klinkerprognosen zeigten jedoch, dass sich die Schwermetalle Kupfer, Blei, Cadmium und Chrom im Klinker durch die Zugabe der aufbereiteten Schlackefraktion deutlich erhöhen.

Im nächsten Schritt wurden die modellhaften Untersuchungen mit gewaschener Schlacke fortgesetzt, die geringere (aber zurzeit noch nicht vorliegende) Schwermetallgehalte aufweist. Des Weiteren sollte in den nächsten Betrachtungen der Einsatz alternativer Brennstoffe berücksichtigt werden.

Die mit Beimischung von fertig aufbereiteten und gewaschenen Schlacken im Labor gebrannten Klinker wurden daraufhin bezüglich ihrer Zusammensetzung und Eignung bewertet.

## 3.2 Umweltverträgliche Zementherstellung

### 3.2.1 Hg-Frachten im Zementherstellungsprozess: Senkung der Hg-Frachten in Zementdrehofenanlagen durch den Einsatz von Sorbentien – Emissionsminderung bei gleichzeitiger Beibehaltung der Produktqualität ■

IGF-Vorhaben 18023 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektzeitraum: 01/2014 – 06/2016

#### Hintergrund und Ziele

Im Kontext zunehmender, auch internationaler, Diskussionen über die Bedeutung von Quecksilber (Hg) und der damit verbundenen Risiken für Mensch und Natur, ist die deutsche Zementindustrie bestrebt, ihre Quecksilberfrachten im Zementherstellungsprozess zukünftig weiter zu senken. Für eine nachhaltige Zementproduktion ist es unumgänglich, mit einem ökologisch und ökonomisch vertretbaren Verfahren eine Minderung der Quecksilberemissionen zu erreichen – ohne Auswirkungen auf Produkt und Prozess.

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens bestand darin, zu untersuchen, inwieweit die Quecksilberfrachten von Zementdrehofenanlagen durch eine sorbensunterstützte Staubabschleusung im Direktbetrieb effektiv gemindert werden können. Zudem wurde betrachtet, ob bei einer Einbindung des Sorbens-Staub-Gemisches in das Produkt eine sichere und umweltverträgliche Immobilisierung des Quecksilbers gewährleistet und es durch eine einfache selektive Abtrennung aus dem Filterstaub ausgewaschen werden kann. Ergänzend wurden mögliche Auswirkungen auf die Produktqualität untersucht.

#### Vorgehensweise

Im Labormaßstab wurden sechs verschiedene am Markt verfügbare Sorbentien auf ihre Abscheideleistung hinsichtlich Quecksilber untersucht: Braunkohlenkoksstaub, Aktivkoks (mit 5 M.-%  $H_2SO_4$ ), bromierte Aktivkohle (mit 5 M.-% HBr), zwei Mischadsorbentien bestehend aus 90 M.-% Calciumhydroxid und 10 M.-% Aktivkoks bzw. 65 M.-% Calciumhydroxid und 35 M.-% Aktivkoks sowie Trass. Dabei richtete sich der Blick auf den Einfluss unterschiedlicher Temperaturen (160 °C, 130 °C) und variierender Gaskonzentrationen ( $SO_2$ , NO, CO), auf die Minderungswirkung der Sorbentien sowie auf die Quecksilberspezifizierung (Hg(0), Hg(II)).

Braunkohlenkoksstaub, bromierte Aktivkohle, Mischadsorbens (35 M.-% Aktivkoks, 65 M.-% Calciumhydroxid) und Trass wurden im Anschluss in zehn Betriebsversuchen zur Beurteilung des Abscheideverhaltens im realen Abgas einer Zementdrehofenanlage untersucht. Dabei diente die Hg-Einbindung in den Abgasstaub ohne Eindüsung als Referenz. Die Versuche gaben Aufschluss darüber, wie sich die Eindüsung von Sorbentien auf die Quecksilberabscheideleistung im Abgasweg auswirkt. Zudem wurden die Quecksilbergehalte im Staub an verschiedenen Stellen im Rohgasquerschnitt vor Filter bestimmt.

In einem dritten Schritt galt es, die während der Betriebsversuche entnommenen Filterstaubproben auf ihre Eigenschaften und

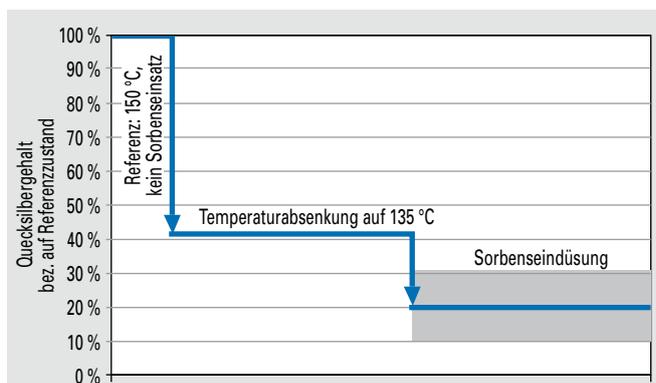
Einflüsse auf die Produkteigenschaften von Zement, Mörtel und Beton hin zu untersuchen. Dabei wurden eine mögliche Trennung von Sorbens und Filterstaub durch eine einfache Waschung mit deionisiertem Wasser, Salzsäure und Bromwasserstoffsäure durchgeführt und durch Auslaugversuche über einen Zeitraum von 24 Stunden im Schüttelversuch mit deionisiertem Wasser nach DIN EN 12457 4 ergänzt. Auf Basis eines CEM I-Zements wurden mit den Filterstäuben Zemente und daraus Mörtel sowie Betone hergestellt und auf ihre Produkteigenschaften hin untersucht (Farbeeigenschaften der Zemente und gegossenen Mörtelplatten, Mörtel-Zug- und Druckfestigkeiten, Rohdichten und Ausbreitmaße). In einer Langzeitbetrachtung über einen Zeitraum von 64 Tagen wurde im Trogversuch nach CEN/TS 16637 2 abschließend das Auslaugverhalten an hergestellten Betonwürfeln untersucht.

#### Ergebnisse

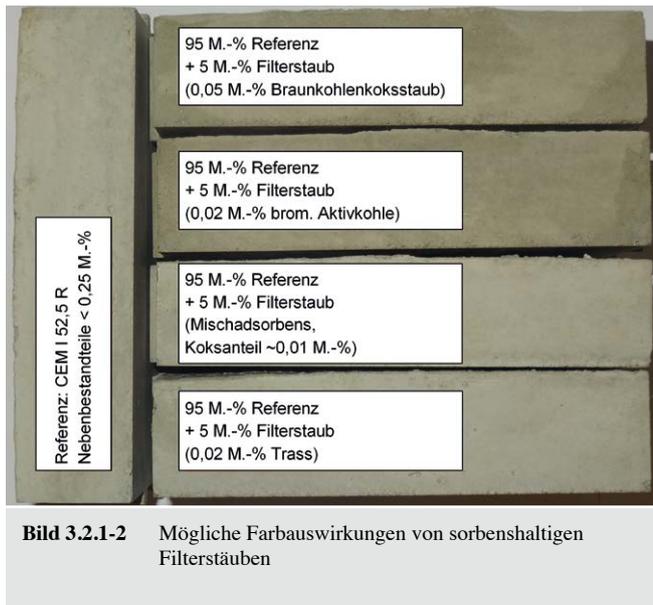
Mit dem grundlegenden Ziel der Minderung der Quecksilberfracht im Abgasweg bleibt eine Temperaturabsenkung in Verbindung mit der Staubabschleusung im Direktbetrieb weiterhin die zunächst effektivste Maßnahme. Hierdurch wurde bezogen auf den Referenzzustand ( $> 150\text{ °C}$ , kein Sorbenseinsatz) eine deutliche Minderung um etwa 60 % erreicht. Einer Temperaturabsenkung sind jedoch Grenzen gesetzt, da die Fördereinrichtungen des Verdampfungskühlerstaubs bei zu feuchtem Material beschädigt und durch Taupunktunterschreitungen die Korrosionsgefahr im Abgasweg erhöht werden können.

Eine Eindüsung von Sorbentien kann die Effektivität der Abscheidung nach einer Temperaturabsenkung (135 °C) um weitere 10 bis 30 % erhöhen (**Bild 3.2.1-1**). Die höchsten Abscheideraten wurden dabei mit koks-/kohlehaltigen Sorbentien erreicht. Während der Betriebsversuche wurden bei verschiedenen Versuchseinstellungen Rohgasstaubproben vor dem Filter entnommen. Die dem Gasstrom entnommenen Sorbens-Staub-Proben zeigten deutliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Quecksilberkonzentrationen, in Abhängigkeit von der Position ihrer Entnahme im Gasstrom. Zudem fand der überwiegende Anteil der Quecksilberabscheidung bereits im Flugstrom vor Filter statt. Daher sollten die Möglichkeiten einer Optimierung der sorbensunterstützten Staubabschleusung hinsichtlich der Verteilung von Staub und Sorbens im Gasstrom näher untersucht werden.

Wurden Sorbentien zur Minderung der Quecksilberfracht und der ausgeschleuste Filterstaub zur gezielten Einstellung der Produkteigenschaften verwendet, ergaben die Untersuchungen,



**Bild 3.2.1-1** Auswirkungen von Temperaturabsenkung und Sorbenseindüsung auf den Gehalt von Quecksilber und seinen Verbindungen im Abgas (100 %-Referenz, Hg-Gehalt bei 150 °C ohne Sorbenseinsatz)



**Bild 3.2.1-2** Mögliche Farbauswirkungen von sorbenshaltigen Filterstäuben

dass keine signifikanten Auswirkungen auf die Festigkeitseigenschaften zu erwarten sind und von einem sicheren Einschluss des über den Filterstaub abgeschiedenen Quecksilbers ausgegangen werden kann. Jedoch besteht bei koks-/kohlehaltigen Sorbentien die Möglichkeit einer Beeinflussung des Produktfarbtons, was in bestimmten Anwendungsbereichen eine unerwünschte, zu vermeidende Auswirkung darstellt (**Bild 3.2.1-2**). An dieser Stelle wird empfohlen, die durchgeführten Untersuchungen zu den Auswirkungen auf die Produkteigenschaften mit einer gezielten Einstellung der (koks-/kohlehaltigen) Sorbenskonzentration im Produkt auch auf andere Zementarten mit unterschiedlichen Festigkeitsklassen auszuweiten.

Zusammenfassend wurde gezeigt, dass eine gezielte Unterstützung der Staubausschleusung im Direktbetrieb durch die Eindüsung von Sorbentien in den Abgasweg eine technisch realisierbare Maßnahme ist, um die Quecksilberfracht im Abgasweg von Zementdrehrohrofenanlagen falls erforderlich weiter zu mindern. Dabei sind sowohl verfahrenstechnische Grenzen als auch Anforderungen an die Produktqualität zu berücksichtigen.

### 3.2.2 Emissionsreduktion in der Steine- und Erden-Industrie durch modellbasierte Prozessoptimierung (EMREDPRO) ■

Das Forschungsvorhaben mit der Skizzen-Nr. KLIMA-907-011 wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Projektträger: DLR (KMU-innovativ)  
 Projektpartner: KIMA Echtzeitsysteme GmbH, KIMA Automatisierung GmbH, DI MATTEO Förderanlagen GmbH & Co. KG  
 Zeitraum: 01/2017 – 12/2019

#### Hintergrund und Ziele

Zu den prozessbedingten Emissionen der Zementindustrie zählt neben Staub, Stickstoffoxiden und rohmaterialbedingten Verbindungen vor allem auch  $\text{CO}_2$  aus der Verbrennung, dem Rohmaterial und indirekt aus dem elektrischen Energiebedarf. In Verbindung mit dem hohen Energiekostenanteil von mehr als 50 % in Bezug auf die Bruttowertschöpfung in der Zementindustrie ist daher eine kontinuierliche Optimierung des Energieeinsatzes ein wesentlicher Faktor für effiziente und nachhaltige Produktionsprozesse. Oft

lässt sich aber nur schwer vorhersagen, wie sich geänderte Prozessparameter oder neue, effizientere Anlagenkomponenten auf den gesamten Produktionsablauf in einem Werk auswirken. Hierzu ist es erforderlich, den komplexen, verketteten Gesamtprozess vollständig und ganzheitlich betrachten zu können.

Obwohl heute bereits hervorragende Modelle für Teilaspekte der Zementproduktion existieren, gibt es noch keine geeigneten Werkzeuge, um den Gesamtprozess modelltechnisch zu betrachten. Ziel des EMREDPRO-Projektes ist es daher, ein dynamisches Softwaremodell zu entwickeln, das die Anlagen und Prozesse der Zementindustrie ganzheitlich abbildet. Damit soll es möglich werden, neue Anlagenteile virtuell in eine gegebene Produktionsumgebung zu integrieren und deren Auswirkungen zu untersuchen. Hierzu muss die Software insbesondere den spezifischen thermischen und elektrischen Energiebedarf und damit die direkten und indirekten  $\text{CO}_2$ -Emissionen bestimmen können. So sollen Energieeinsparpotenziale in der Prozesskette und Möglichkeiten der Emissionsminderung identifiziert und bewertet werden. Über die Laufzeit des Projektes wird ein grundlegendes Modell entwickelt und direkt durch reale Prozessdaten validiert. Auf diese Art soll die praktische Eignung der Modelle sichergestellt werden.

#### Vorgehensweise

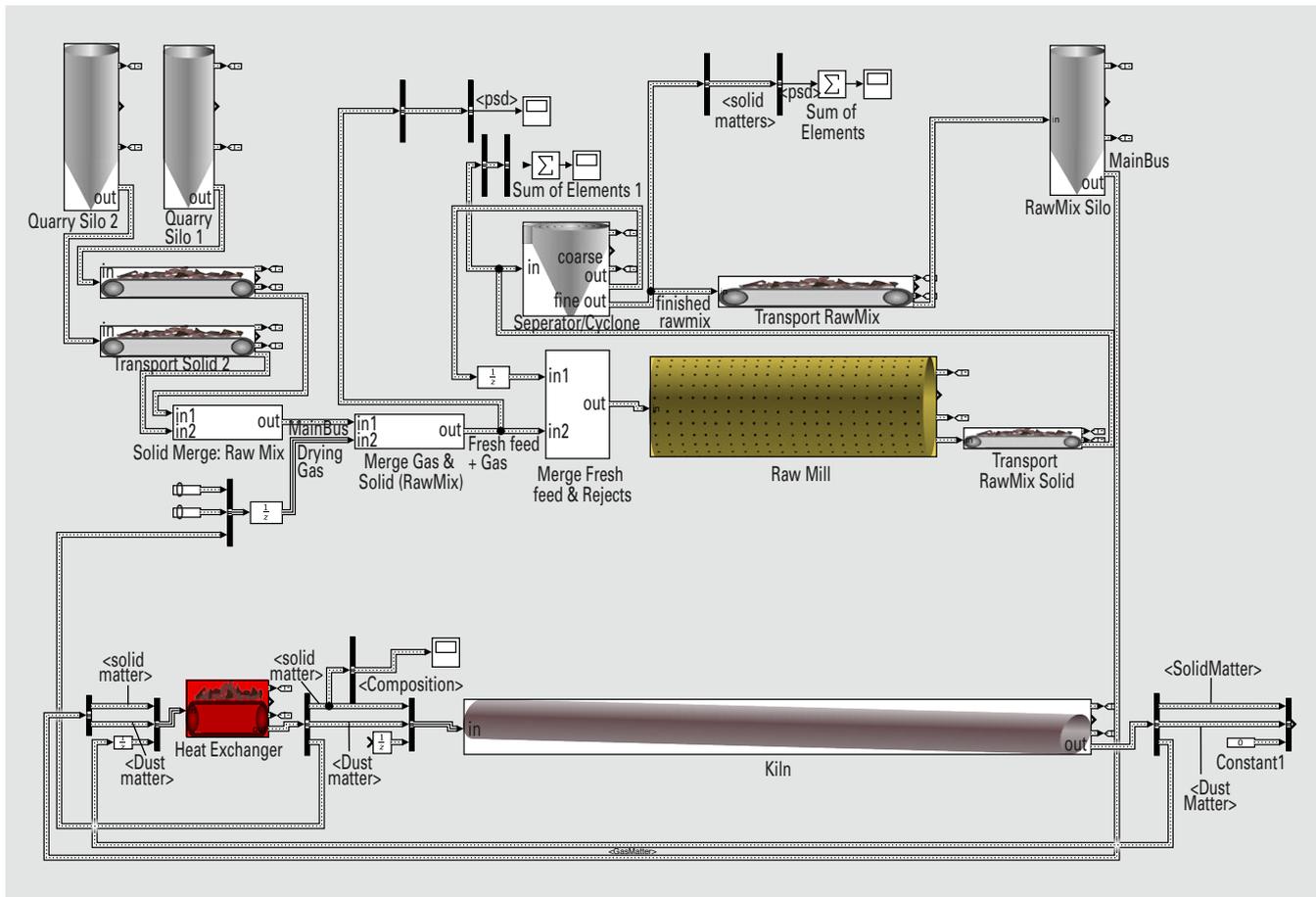
Der Herstellungsprozess von Zement setzt sich aus einer Vielzahl an chemischen und physikalischen Einzelprozessen zusammen. Dazu zählen z. B. der Material- und Gastransport, die Wärmeübertragung, die Verbrennung, chemische Reaktionen, die Zerkleinerung sowie deren Interaktionen mit den Antrieben und Stellgrößen der Anlagen. Diese komplexen Prozesse stellen simulationstechnisch eine große Herausforderung dar und müssen daher in geeigneter Weise abstrahiert werden. Zu starke Vereinfachungen vermindern die Vorhersagequalität, während ein zu hoher Detailgrad hohe Rechenzeiten bedingt und die Handhabung unmöglich macht. Die Modellentwicklung erfolgt daher zunächst unter Verwendung einfacher Modelle, die schrittweise detailliert werden. Dabei wird auch die Vielzahl von theoretisch und empirisch gewonnenen Daten aus anderen Forschungsprojekten berücksichtigt. Zudem werden die Teilmodelle schon in der Frühphase des Projektes mittels realer Anlagendaten validiert.

Das Modell ist modular aufgebaut, damit es jederzeit einfach erweitert und angepasst werden kann. Zudem ist die Möglichkeit vorgesehen, das Prozessmodell mit einem realen Kontrollsystem zu koppeln.

#### Stand der Arbeiten

Basierend auf einer umfangreichen Systemanalyse wurde ein modularer Modellansatz in der Software Matlab/Simulink entwickelt. Über eine Datenstruktur, die den Austausch von relevanten Prozess- und Modelldaten realisiert, wurden die einzelnen Komponenten, wie z. B. Mühle, Sieber, Silos oder Ofen und Kühler, miteinander verbunden. Dabei wurde die Datenstruktur, die alle benötigten Informationen über die Medien Gas-, Staub- und Feststoff enthält, derart ausgelegt, dass zukünftig auch komplexere Modellansätze ohne Einschränkungen realisiert werden können. Wie in **Bild 3.2.2-1** dargestellt, können einzelne Anlagenkomponenten dann später in einer grafischen Umgebung zu einem Werklayout zusammengestellt werden.

Untersucht wurde weiterhin, wie die physikalisch-chemischen Modelle mit Stellgrößen der Anlagenteile verbunden werden können. Hierzu sind die Gewinnung von virtuellen Messdaten sowie die Formatierung und der Transfer an ein übergeordnetes

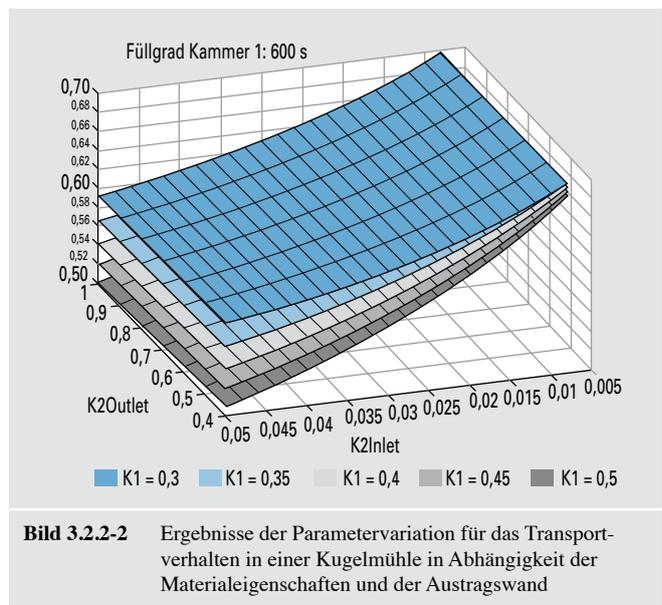


**Bild 3.2.2-1** Graphische Entwicklungsumgebung, in der ein Werk aus Einzelkomponenten zusammengestellt werden kann (Originalskizze, in Englisch)

Kontrollsystem ebenso von Bedeutung wie die Implementierung des Einflusses von Stellhandlungen auf den Prozess. Für die Anwendung von regelungstechnischen Systemen spielt insbesondere die Echtzeitfähigkeit eine wichtige Rolle.

Neben grundlegenden Funktionen wie der Wärmeübertragung und der Mischung wurden in der ersten Phase des Projektes vor allem die Transportprozesse betrachtet. Dies umfasste neben erzwungenen Transportprozessen in Förderaggregaten oder Silos auch den potenzialgetriebenen Transport, wie er in der Mahlkammer einer Kugelmühle zu finden ist. Dabei wurden auch Einflüsse der Mahlrauminnenelemente, insbesondere der Übertrags- und Austragswände, betrachtet. Hierbei wurde die Mühle zunächst eindimensional durch eine Reihenschaltung von idealen Rührkesselsegmenten diskretisiert. Die Modellparameter wurden basierend auf realen Anlagendaten angepasst, um ein realistisches Füllungsverhalten der Mühle zu gewährleisten.

**Bild 3.2.2-2** stellt exemplarisch die Ergebnisse einer derartigen Parameter-Variation dar. Das Diagramm zeigt den Einfluss auf den Materialfüllstand in der Mühle. Dieser resultiert aus dem Transportverhalten in der Mühle, das im Wesentlichen durch die Fließfähigkeit des Materials, die Durchlässigkeit der Austragswand und den Materialtransport in der Wand bestimmt wird. Das zugehörige einfache Zerkleinerungsmodell 1. Ordnung beschreibt die Zerkleinerung in Abhängigkeit von dem Energieeintrag und dem Materialfüllstand. Durch Entkopplung von Materialtransport und Zerkleinerung können trotz des einfachen Modellaufbaus auch instationäre Zustände beschrieben werden. Der molare Aufbau



**Bild 3.2.2-2** Ergebnisse der Parametervariation für das Transportverhalten in einer Kugelmühle in Abhängigkeit der Materialeigenschaften und der Austragswand

erlaubt dabei auch jederzeit eine Erweiterung der Teilmodelle. In den nächsten Schritten erfolgt die Implementierung von Gas- und Staubtransport, Klassierung, Wärmeübertragung und der Enthalpiebilanzierung, um schließlich auch die Komponenten des thermischen Prozesses erstellen zu können. Als Herausforderung wird hierbei insbesondere die Parametrierung der Hochtemperaturprozesse gesehen.

### 3.2.3 Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie) ■

Das Verbundvorhaben SynErgie wird als Kopernikus-Projekt durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Forschung für nachhaltige Entwicklung (FONA) gefördert. Förderkennzeichen 03SFK3K0

Projektpartner: Rohrdorfer Gruppe, Technische Universität Darmstadt (Konsortiumsleitung)<sup>1)</sup>

Projektzeitraum: 09/2016 – 08/2019

#### Hintergrund und Ziele

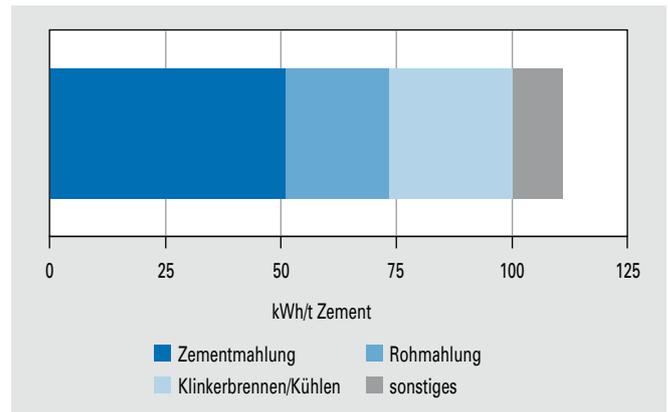
In dem laufenden Forschungsprojekt wurde eine branchenübergreifende Methodik entwickelt, mit der die Potenziale einer möglichst flexiblen Nutzung von elektrischer Energie ermittelt werden können. Dabei galt es, insbesondere die Anforderung der Grundstoffindustrie zu berücksichtigen. So zeichnen sich Prozesse der Grundstoffindustrien dadurch aus, dass sie sehr viel thermische Energie benötigen und die Produktqualität sehr stark vom Prozessverlauf abhängt. Für die Prozesse der Grundstoffindustrien ist es also von besonderer Bedeutung, Flexibilitätspotenziale zu identifizieren, die mit den Prozessen kompatibel sind und die Produktionsmenge oder -qualität nicht negativ beeinflussen. Weiterhin ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen dem Anspruch, einen Prozess möglichst flexibel oder möglichst effizient zu betreiben. Unterschieden wurden derzeit verfügbare Flexibilitätspotenziale und zukünftiger Flexibilitätsperspektiven, die durch den Einsatz neuer Technologien, den Wegfall von Hemmnissen oder die Veränderung von Rahmenbedingungen erschließbar wären.

#### Vorgehensweise

Die Zementindustrie weist im Bereich der Materialzerkleinerung das höchste Potenzial zur flexiblen Lastabnahme und -bereitstellung durch zeitliche Verschiebung des elektrischen Energieeinsatzes auf. Dieses bezieht sich insbesondere auf die Zementmahlung. Bei der Roh- und Zementmahlung wird der größte Teil der elektrischen Energie eingesetzt (**Bild 3.2.3-1**). Zur Bestimmung technischer Flexibilitätspotenziale hat der VDZ eine Statistik von Mühlendaten ausgewertet und in einem Modell eines integrierten Zementwerks und eines Zementmahlwerks mit mittleren Produktionskapazitäten für Deutschland zusammengefasst. Bei der Modellanwendung wurden die Produktions- und Lagerkapazitäten und der saisonale Verlauf der Produktion bewertet. Die Untersuchung von Voraussetzungen, Hemmnissen und zukünftigen Perspektiven für einen flexiblen Stromeinsatz basierte insbesondere auf den Ergebnissen von Expertengesprächen mit Branchenvertretern. Im Projekt wurde eine Beschreibung allgemeiner Anforderungen an einen flexiblen Stromeinsatz mit kurz- (15 Minuten), mittel- (mehrere Stunden) und langfristigem (5 Tage) Profil erstellt und als Grundlage für die Expertengespräche genutzt. Zusätzlich wurden hierbei wirtschaftliche Aspekte, Fragen der innerbetrieblichen Organisation (Auftragsplanung, Schichtplanung, etc.) und des Marktumfelds (Kundenbeziehungen, Lieferfähigkeit) diskutiert.

#### Ergebnisse/Stand der Arbeiten

Die wesentlichen Rahmenbedingungen der für eine Flexibilisierung interessanter Produktionsprozesse der Zementindustrie



**Bild 3.2.3-1** Spezifischer elektrischer Energieeinsatz in der Zementindustrie in kWh/t Zement

wurden in einem Branchensteckbrief zusammengefasst. Hierbei ist festzuhalten, dass in der Zementindustrie bereits seit langem Flexibilität zur Nutzung von Nachtstrom durch die genaue Planung von Mühlenbetriebszeiten genutzt wird (Demand-Side-Management).

Als technisches Potenzial ergibt sich für ein integriertes Zementwerk mit mittlerer Produktionskapazität aus der Modellierung des VDZ eine flexible Leistung von bis zu 11 Megawatt (MW) für eine Lastreduzierung (Zementmühlen und Rohmühle) und bis zu 8 MW für eine Lasterhöhung (ohne Rohmühle). Bei Annahme eines flexiblen Betriebs je einer großen Mühle (ca. 3 MW, **Tabelle 3.2.3-1**) in jedem Zementwerk in Deutschland ergäbe sich im Sinne einer maximalen Abschätzung in Summe mit Berücksichtigung der Zementmahlwerke eine flexible Last von 172 MW. Diese wäre jedoch kaum insgesamt, sondern eher nach lokalen Anforderungen nutzbar. Die technische Einschätzung des Potenzials wird durch zahlreiche praktische, organisatorische und wirtschaftliche Voraussetzungen und Hemmnisse eingeschränkt. Diese können letztlich nur standortspezifisch bewertet werden.

Die hohen Qualitätsanforderungen an die genormten Produkte (DIN EN 197-1) erfordern in der Regel kontinuierliche Produktionsprozesse. Eine kurz- bis mittelfristige Lastreduktion erscheint deshalb leichter realisierbar als die Reaktion auf Anforderungen für eine kurzzeitige Lasterhöhung. In jedem Fall bleiben hohe Anforderungen an die Produktqualität und die dafür erforderlichen stabilen Produktionsbedingungen als Voraussetzung bestehen. Weiterhin gilt es, erhöhten Personalaufwand und technischen Aufwand oder Verschleiß für eine Flexibilisierung zu bestimmen und letztlich wirtschaftlich zu kompensieren.

Die saisonal stark schwankende Auslastung der Produktionskapazitäten in der Zementbranche ist für einen flexiblen Energieeinsatz und die Einschätzung der technischen Potenziale besonders zu berücksichtigen. Dies gilt vor allem für die Zementproduktion (**Bild 3.2.3-2**), bei der phasenweise im Sommer saisonale Auslastungen der Produktionskapazität über 90 % den Spielraum für einen flexiblen Stromeinsatz im Zementwerk vollständig einschränken können. Auch die mögliche Dauer einer Lastanpassung ist stark von der Nachfrage, der aktuellen Produktbevorratung und der Möglichkeit zum Nachholen ausgefallener Produktion abhängig. Die maximale Dauer für eine Lastminderung kann zwischen mehreren Stunden und wenigen Tagen liegen. Für eine Lasterhöhung durch zusätzlichen Mühlenbetrieb, z. B. während der Mittagsstunden bei hoher Einspeisung erneuerbarer Energie ins Stromnetz, wird die Notwendigkeit einer zusammenhängenden

<sup>1)</sup> Eine Liste aller Projektpartner ist abrufbar unter: <https://vdz.info/k7amq>

**Tabelle 3.2.3-1** Einschätzung technischer Potenziale zum flexiblen Energieeinsatz in der Roh- und Zementmahlung bei flexiblem Betrieb einer großen Mühle

Ankündigung und Dauer der Lastanpassung	Potenzial zur Lastminderung	Potenzial zur Lasterhöhung
kurzfristig, 15 Minuten bis zwei Stunden	ca. 3 MW, nachfolgend vier Stunden garantierter Betrieb	i.d.R. nicht kurzfristig verfügbar
mittelfristig, vier bis zwölf Stunden	saisonabhängig, ca. 3 MW, Lastverschiebung um ein bis drei Tage	saisonabhängig, ca. 3 MW, vier Stunden garantierter Betrieb

Produktionszeit von mindestens vier Stunden geschätzt. Die Flexibilität zur Lasterhöhung kann es dann erlauben, besonders niedrige oder sogar negative Börsenstrompreise zu nutzen. Eine langfristige Lastsenkung, z. B. über fünf Tage zur Überwindung möglicher Stromengpässe im Winter („Dunkelflaute“), scheint nur in der Zementmahlung und unter besonders günstigen Voraussetzungen mit ausreichend großen Produktvorräten möglich. Investitionen in eine Erweiterung von Mühlenproduktions- oder Silokapazitäten zur Steigerung der Flexibilität beim elektrischen Energieeinsatz scheinen aus heutiger Sicht nicht wirtschaftlich. Die heute übliche Gestaltung von Stromlieferverträgen der Industrie in Deutschland birgt z. T. eher ökonomische Risiken (z. B. für Spitzenlasten) und weniger Anreize für einen zunehmend flexiblen Stromeinsatz.

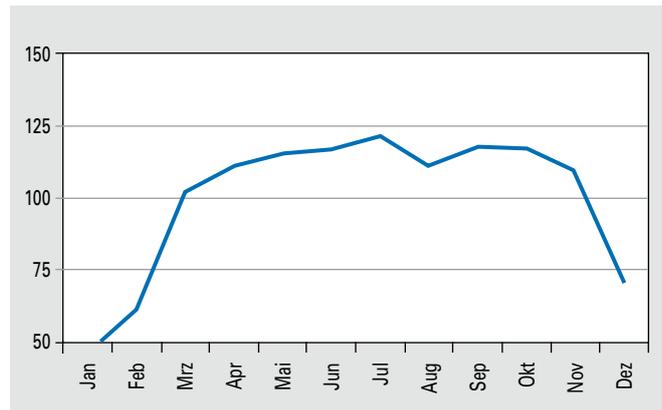
Diese Ergebnisse der Modellierung und Expertengespräche wurden im VDZ-Arbeitskreis Zerkleinerung diskutiert und mit den Projektpartnern der anderen Grundstoffindustrien 2018 in einem umfassenden Bericht und in einem Artikel veröffentlicht (<https://vdz.info/k7amq>)<sup>1)</sup>. In der Fortführung des Forschungsprojektes werden Flexibilitätspotenziale und Hemmnisse anhand von konkreten Zeitreihen in Zusammenarbeit mit der Rohrdorfer Gruppe und weiteren Projektpartnern genauer untersucht werden. Zusätzlich sollen Flexibilitätsperspektiven bei Einsatz einer separaten Feinstmahlung hinsichtlich einer möglichen Demonstration dieser Technologie geprüft werden.

### 3.2.4 CEMCAP – CO<sub>2</sub>-Abscheidung in der Zementproduktion ■

CEMCAP ist ein Forschungsprojekt, das aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union im Rahmen der Fördervereinbarung Nr. 641185 finanziert wird. Projektpartner: GE Carbon Capture, GE Power Sweden, CSIC, Italcementi, European Cement Research Academy (ECRA), ETH Zürich, HeidelbergCement AG, IKN GmbH, NORCEM AS, Politecnico di Milano, SINTEF Energy (Koordination), thyssenkrupp Industrial Solutions AG, TNO, Universität Stuttgart  
Zeitraum: 05/2015 – 12/2018

#### Hintergrund und Ziele

Das EU-Forschungsprojekt CEMCAP soll die Voraussetzungen für den Einsatz von CO<sub>2</sub>-Capture-Technologien in Zementwerken schaffen. Diese könnten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementindustrie vermeiden und stattdessen eine spätere Lagerung (CCS) oder Nutzung (CCU) des CO<sub>2</sub> ermöglichen. Gerade im Hinblick auf die Minderungsziele aus dem Pariser Klimaabkommen und die Reduzierung von prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementindustrie

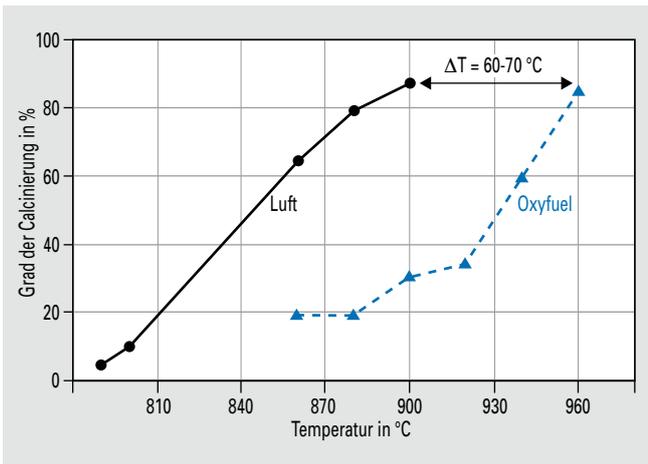
**Bild 3.2.3-2** Saisonaler Produktionsindex für die Zementproduktion in Deutschland von 2010 bis 2017, Mittelwert = 100

könnten die Oxyfuel-Technologie oder verschiedene Verfahren für die Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus dem Abgas (Post-Combustion-Technologien) langfristig einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Ob dieses jedoch auch technisch und wirtschaftlich möglich sein wird, ist ebenfalls Gegenstand dieses Forschungsvorhabens.

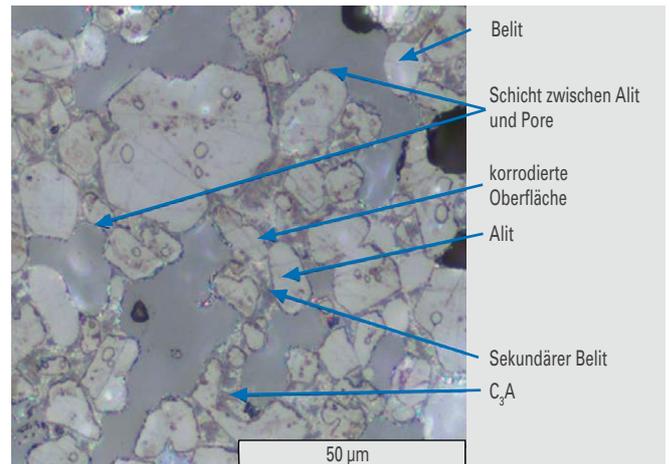
Technologien, die für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung von Kraftwerken entwickelt wurden und vielfach einen technologischen Reifegrad (Technological Readiness Level, TRL) von 7-8 aufweisen, müssen für eine Nachrüstung in Zementwerken angepasst werden. Bei der Betrachtung des Zementsektors liegen die Abscheidungstechnologien typischerweise bei TRL 4-5 oder niedriger. Das CEMCAP-Forschungsprojekt wurde entwickelt, um jene Technologien für die Zementindustrie auf eine höhere TRL-Stufe zu bringen und damit dem Praxiseinsatz näherzukommen. Das primäre Ziel von CEMCAP ist es, die technologischen Voraussetzungen für eine weitreichende Umsetzung der CO<sub>2</sub>-Abscheidung in der europäischen Zementindustrie zu schaffen. Zu diesem Zweck verfolgt CEMCAP folgende Teilziele:

- Weiterentwicklung der Technologie bis zur Stufe TRL 6 für die Oxyfuel-Capture-Technologie in Zementwerken und für drei grundsätzlich unterschiedliche Technologien zur Kohlendioxidabscheidung bei Verbrennungsprozessen (alle mit einer angestrebten Abscheiderate von 90 %).
- Identifizierung der CO<sub>2</sub>-Capture-Technologien, die bei bestehenden Zementwerken kosten- und ressourceneffizient nachgerüstet werden können und die die Produktqualität und Umweltverträglichkeit sichern.
- Formulierung einer techno-ökonomischen Entscheidungsgrundlage für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung in der Zementindustrie, um die derzeitige Unsicherheit der Kosten der CO<sub>2</sub>-Capture-Technologien um mindestens 50 % zu reduzieren.

<sup>1)</sup> Ruppert, Johannes; Treiber, Kevin: Statusbericht „Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie“: Ausblick für die Zementindustrie. In: Schüttgut 2018 (3), S.52-56).



**Bild 3.2.4-1** Calciniierung von Rohmehl in Luft mit 20 Vol.-% CO<sub>2</sub> und in einer Oxyfuel-Atmosphäre bei 80 Vol.-% CO<sub>2</sub> in einem Reaktor der Universität Stuttgart



**Bild 3.2.4-2** Untersuchung der ersten Proben von Klinker aus dem Pilotsystem des Oxyfuel-Kühlers im VDZ-Labor



**Bild 3.2.4-3** Messungen des VDZ bei der Erprobung des Prototypen eines Oxyfuel-Klinkerkühlers im Zementwerk im CEMCAP-Forschungsprojekt<sup>3)</sup>

### Vorgehensweise

Um die genannten Ziele zu erreichen, untersuchte der VDZ zusammen mit IKN den Prototyp eines Oxyfuel-Klinkerkühlers von September 2016 bis März 2017 im HeidelbergCement-Werk in Hannover (siehe Kapitel 1.3.1). Ergebnisse aus insgesamt drei experimentellen Arbeitspaketen zum Oxyfuel-Prozess (Calcinator, Brenner, Kühler) sind in eine Analyse mit dem VDZ-Prozessmodell eingeflossen. Hierbei wurden mögliche Optimierungen und Auswirkungen auf den Energiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Abscheiderate untersucht. Abschließend wurden die Erkenntnisse zur Nachrüstung von Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung in Zementwerken durch den VDZ zusammengefasst. Alle Forschungsergebnisse und Schlussfolgerungen werden auf insgesamt drei Workshops

vorgelegt und mit Vertretern von Industrie, Wissenschaft und internationalen Organisationen diskutiert<sup>1)</sup>. Sie sind außerdem auf der Webseite des CEMCAP-Projekts und in Fachpublikationen veröffentlicht. Die VDZ-Projektwebseite ist unter <https://vdz.info/th0di> abrufbar.

### Ergebnisse/Stand der Arbeiten

Für das gesamte Forschungsprojekt wurde unter Leitung des VDZ und auf der Basis von Konzepten aus der ECRA-CCS-Projektphase III ein Referenzdokument mit technischen Daten für ein typisches Zementwerk in Europa erstellt (CEMCAP Framework Document, D3.2)<sup>2)</sup>. Dieses bildet die Grundlage für die experimentellen Arbeiten, die Prozessmodellierung und die techno-ökonomischen Vergleiche der unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Abscheide-Technologien.

Laboruntersuchungen im ECRA-CCS-Projekt hatten für die Calciniierung von Rohmehl bei hoher CO<sub>2</sub>-Konzentration eine höhere erforderliche Reaktionstemperatur gezeigt. In CEMCAP wurden in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart entsprechende Untersuchungen in einem 2,5 m langen Flugstromreaktor unter den Bedingungen des Oxyfuel-Prozesses durchgeführt. Diese haben die beobachtete Temperaturerhöhung für die Calciniierung im Oxyfuel-Prozess um 60 bis 70 K bei 80 Vol.-% CO<sub>2</sub> bestätigt (**Bild 3.2.4-1**). Zudem haben Variationen der Reaktionsdauer und Partikelgröße die erhöhte Reaktionstemperatur als ausschlaggebende Größe hervorgehoben. Die effektive Partikeltemperatur wird niedriger eingeschätzt als die in dem elektrisch beheizten Reaktor gemessene absolute Temperatur. Unabhängig davon deutet die relative Temperaturerhöhung an, dass ggf. mit einer verstärkten Ansatzbildung im Bereich des Calcinatorausgangs gerechnet werden muss. Dem kann technisch entgegengewirkt werden, indem im Calcinator der maximale Calciniierungsgrad des Rohmehls etwas abgesenkt wird.

Die Erkenntnisse aus dem Betrieb des Oxyfuel-Klinkerkühler-Prototyps zeigen, dass die Übergangszone des Kaltklinker-Austragssystems besondere Aufmerksamkeit erfordert, um den Falschlufteintrag zu minimieren. In einigen Klinkerproben wurde ein unerwarteter Alitzerfall von bis zu 4 M.-% an Porengrößenflächen festgestellt (**Bild 3.2.4-2**). Diese Beobachtung wurde zunächst einer experimentell bedingten, besonders hohen Gasfeuchte zugeschrieben (**Bild 3.2.4-3**). Die Klinkerproben wurden im VDZ-Labor weiter untersucht. Die Ergebnisse unterstreichen,

<sup>1)</sup> Vgl. <https://vdz.info/ht518> (externer Link)

<sup>2)</sup> CEMCAP Framework Document, D3.2, vgl. <https://vdz.info/y52pd> (externer Link)

<sup>3)</sup> Vgl. <https://vdz.info/8uyay> (externer Link)

dass zur Vermeidung von Produktbeeinträchtigungen der im Gaskreislauf zur Wasserdampfabscheidung vorgesehene Kondensator eine besondere Aufmerksamkeit bei der Auslegung des Oxyfuel-Prozesses erfordert.

Ergebnisse der Modellierung des Oxyfuel-Prozesses zeigen Möglichkeiten zur energetischen Optimierung bei Kombination mit einer Wärmerückgewinnung (Organic Rankine Cycle, ORC) aus dem Gaskreislauf sowie eine geringe Abhängigkeit des elektrischen Energiebedarfs (+13 %) bezüglich möglicher Falschlufterträge in einem niedrigen Bereich von 4 bis 8 %. Nach weiterer Optimierung werden die Modellergebnisse in die technische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener in CEMCAP untersuchter Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus dem Klinkerherstellungsprozess eingehen.

### 3.2.5 CLEANKER: CO<sub>2</sub>-Abscheidung mittels integriertem Calcium Looping-Prozess ■

Das CLEANKER-Projekt wird aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union im Rahmen der Fördervereinbarung Nr. 764816 finanziert.

Projektpartner: LEAP (Italien), Buzzi Unicem (Italien), CSIC (Spanien), Italcementi-HeidelbergCement Group (Italien), IKN (Deutschland), Lappeenranta University of Technology (Finnland), Politecnico di Milano (Italien), Quantis (Schweiz), Tallinn

University of Technology (Estland), Tsinghua University (China), University of Stuttgart (Deutschland), ADT (Italien)  
Projektzeitraum: 10/2017 – 09/2021

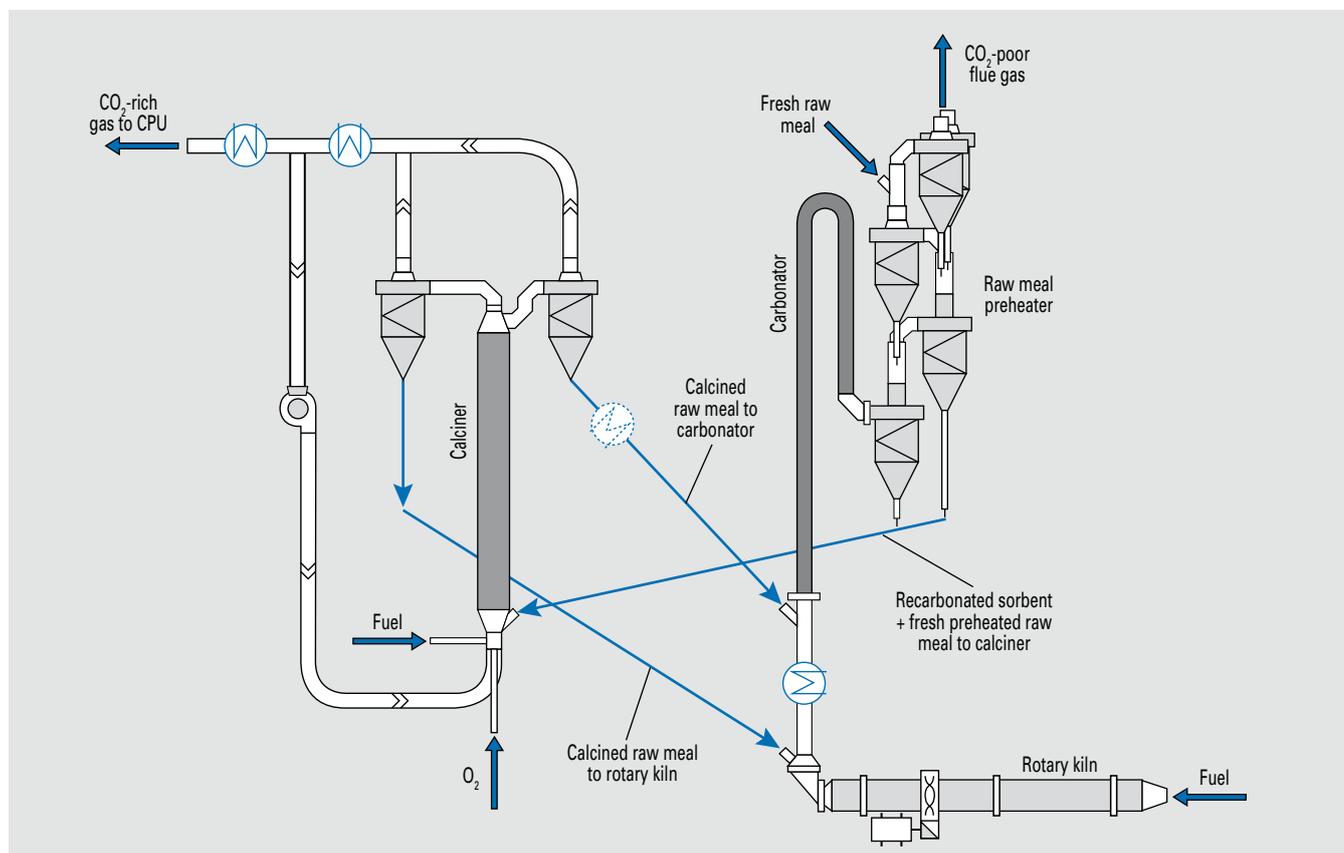
#### Hintergrund und Ziele

Eine erfolgversprechende Methode zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus Zementwerksabgasen ist der prozessintegrierte Calcium Looping-Prozess, der bislang lediglich als nachgestellte Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus dem Abgas betrachtet wurde. Potenziale dieser Technologie werden insbesondere für die Zementindustrie gesehen, da Branntkalk als Sorbens für CO<sub>2</sub> verwendet wird. Das daraus entstehende CaCO<sub>3</sub> kann direkt als Rohstoffkomponente eingesetzt werden.

Das Konzept sieht im Detail einen so genannten Carbonator vor, in dem CO<sub>2</sub> durch die Carbonatisierung von CaO aus dem Ofenabgas abgetrennt werden soll, sowie einen Oxyfuel-betriebenen Calciner, in dem ein möglichst reiner CO<sub>2</sub>-Strom generiert wird. Das CaO/CaCO<sub>3</sub> wird dabei zwischen den Aggregaten ausgetauscht und/oder teilweise im Kreis gefahren (**Bild 3.2.5-1**). Nach der Kühlung des CO<sub>2</sub>-angereicherten Abgasstromes zur Wärmerückgewinnung wird dieser einer Aufbereitungsanlage übergeben. Auf diese Weise können sowohl die Brennstoff- als auch die materialbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen abgetrennt werden.

#### Vorgehensweise

Im CLEANKER-Projekt (CLEAN clinKER) soll diese Technologie als integrierte Methode großtechnisch erprobt werden (Technology Readiness Level 7). Es wird angestrebt, in einer



**Bild 3.2.5-1** Funktionsprinzip des integrierten Calcium Looping-Prozesses (Originalskizze, in Englisch)

Quelle: IKN

Demonstrationsanlage, die an eine bestehende Ofenlinie des Buzzi Unicem-Werks in Vernasca/Italien angeschlossen wird, 4 000 m<sup>3</sup>/h Abgas zu behandeln. Innerhalb der Testkampagne sollen zudem verschiedene Rohmaterialien auf ihre Eignung als CO<sub>2</sub>-Sorbens getestet werden. So soll die Machbarkeit des integrierten Calcium Looping-Konzeptes sowie die gleichbleibende Produktqualität überprüft werden. Hierbei unterstützt der VDZ mit Messtechnik, Analytik und Zement-Know-how. Nach erfolgter Demonstration der Technologie wird eine technisch-wirtschaftliche Studie für bestehende Zementwerke basierend auf einer Hochskalierung der Resultate und der Modellierung dieses Prozesses durchgeführt. Für diese Zwecke wird ebenfalls das am VDZ entwickelte verfahrenstechnische Modell genutzt, indem es durch die erhaltenen experimentellen Ergebnisse auf die spezielle Anwendung hin weiterentwickelt wird.

Durch das in den Klinkerbrennprozess integrierte Verfahren sollen folgende ambitionierten Ziele erreicht werden:

- CO<sub>2</sub>-Abtrennung > 90 %
- Anstieg des Elektroenergiebedarfs < 20 %
- Spezifischer Primärbrennstoffbedarf zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung (SPECCA) < 2 MJLHV/kg CO<sub>2</sub>
- Kosten der CO<sub>2</sub>-Abtrennung < 30 €/t CO<sub>2</sub>
- Anstieg der Zementproduktionskosten < 25 €/t Zement

Über die Demonstration der CO<sub>2</sub>-Abtrennung hinaus wird zudem eine CO<sub>2</sub>-Speicherung mittels Mineralisierung von abfallstämmigen Materialien erprobt.

#### Stand der Arbeiten

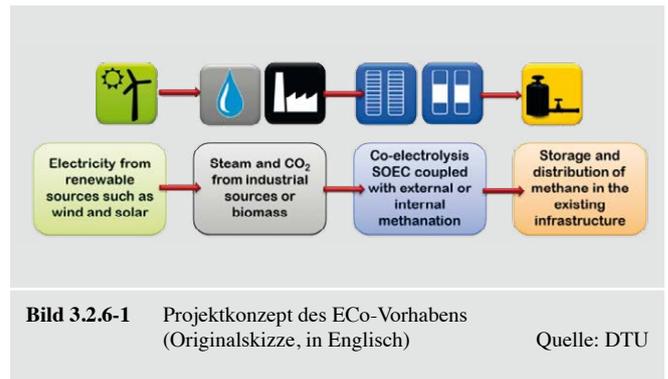
Derzeit befindet sich das Projekt in der Entwurfs- und Konstruktionsphase.

### 3.2.6 ECo – Methanisierung zur Verwertung von abgetrenntem CO<sub>2</sub> und Speicherung erneuerbarer Energie ■

Das ECo-Projekt wird aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union von der European Commission's Fuel Cells Hydrogen Joint Undertaking (FCH 2 JU) unter der Fördervereinbarung Nr. 699892 – ECo finanziert. Projektpartner: Danmarks Tekniske Universitet (Dtu), Commissariat A L Energie Atomique Et Aux Energies Alternatives (Cea), Eifer Europäisches Institut Fur Energieforschung Edf-Kit Ewiv (Eifer), Ecole Polytechnique Federale De Lausanne (Epfl), Fundacio Institut De Recerca De L'energia De Catalunya (Irec), Htceramix Sa(Htc), Belgisch Laboratorium Van De Elektriciteitsindustrie (Engie), Enagas S.A.(Enagas)  
Projektzeitraum: 06/2016 – 05/2019

#### Hintergrund

Auch wenn die Entwicklung von Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung stetig voranschreitet, ist die Frage der Endlagerung von CO<sub>2</sub> aus gesellschaftlichen, rechtlichen und ökologischen Gründen weiterhin offen. Umso wichtiger wird die Frage, auf welche Weise CO<sub>2</sub> in Produkten verwertet werden kann, die aus Kohlenwasserstoffen hergestellt werden. Das ist prinzipiell möglich, aber energieintensiv. Wird das CO<sub>2</sub> aus industriellen Quellen jedoch mithilfe von überschüssigem erneuerbaren Strom kombiniert, ergeben sich Synergien. Insbesondere die Synthese von Methan kann vielversprechend sein, da mit dem Erdgasnetz die Infrastruktur und Lagermöglichkeiten bereits existieren (Darstellung des Gesamtprozess siehe **Bild 3.2.6-1**).



#### Ziele des Projektes

Das EU-geförderte ECo-Projekt (Efficient Co-Electrolyser for Efficient Renewable Energy Storage) behandelt die Entwicklung von hocheffizienten Systemen, sogenannte SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cells), zur simultanen Elektrolyse von Dampf und CO<sub>2</sub>, um Methan zu erzeugen. Die Zellen arbeiten bei tiefen Temperaturen und hohen Drücken und sollen auf ihre Leistung und Haltbarkeit hin untersucht werden.

Im weiteren Projektverlauf soll eine SOEC-Anlage entworfen werden, die mit schwankender Energiezufuhr und unter Nutzung verschiedener CO<sub>2</sub>-Quellen effizient arbeitet. Dabei ist zu prüfen, welche Ansprüche dieses System an die Reinheit des CO<sub>2</sub> stellt. Zudem muss das System eine Methanqualität aufweisen, die den Anforderungen des Erdgasnetzes gerecht wird. Abschließend soll eine techno-ökonomische Studie das System im Vergleich zu anderen Elektrolyse-Technologien bewerten.

#### Stand der Arbeiten

Die ersten verbesserten Zellen konnten bereits erfolgreich bestehen, auch wenn die erzielten Leistungen noch unter denen der reinen Dampfelektrolyse liegen. Numerische Werkzeuge wurden auf Basis von Langzeitproben erstellt, um die Zersetzungsmechanismen besser zu verstehen. In einer ersten Literaturstudie, an der sich der VDZ beteiligte, wurden CO<sub>2</sub>-Quellen aus verschiedenen Industrien, etwa aus der Zementindustrie, hinsichtlich der zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Mengen, -Konzentrationen und diesbezüglicher Schwankungen charakterisiert. Hierbei wurden die für diese Technologie geeigneten Industrien herausgestellt, z.B. die Zementindustrie sowie Biomassevergasung bzw. -Upgrading. Auf dieser Basis wurde eine Fallstudie zur Potenzialanalyse durchgeführt, die ein Zementwerk mit teilweiser CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Methan oder Syngas-Synthese vorsieht (**Bild 3.2.6-2**). Als Abtrennmethode wurde die Aminwäsche ausgewählt, da sie im Hinblick auf die Technologieentwicklung am weitesten fortgeschritten ist. Sie soll ausschließlich mit Abwärme betrieben werden. Das entstehende brennbare Syngas oder das Methan sollen dem Prozess als Brennstoff wieder zugeführt werden. Dieses Vorgehen verlangt allerdings noch eine detaillierte Bilanzierung aller auftretenden Medien. Ergebnisse hieraus sollen in die abschließende technisch-wirtschaftliche Betrachtung eingehen. Bei der Studie wird der VDZ dem Konsortium beratend zur Seite stehen. Es wird zu prüfen sein, unter welchen Voraussetzungen (Kosten, CO<sub>2</sub>-Footprint etc.) ein solches System für die Zementindustrie interessant werden könnte.





**Bild 3.2.7-1** Mobile Apparatur zur CO<sub>2</sub>-Bindung in einem westfälischen Zementwerk

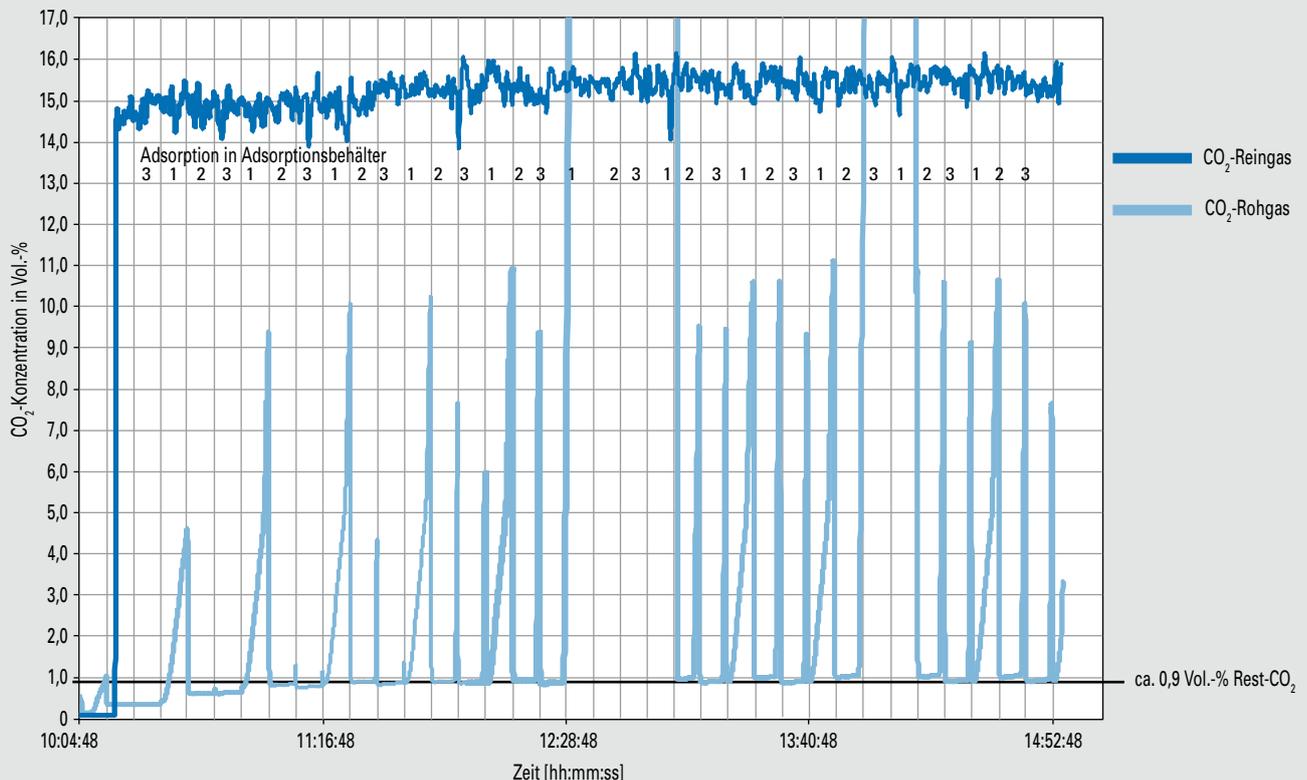
Adsorbens als erfreulich gering. Ebenfalls positiv ist, dass auch nach mehrmonatigem Versuchsbetrieb mit mehr als 1000 Ad-/Desorptionszyklen mit realem Rauchgas keine Degradation des Adsorbens festzustellen war.

Basierend auf Untersuchungen zum Energiebedarf für die Regeneration des Adsorbens sowie zum Gesamtenergiebedarf der Anlage erfolgten abschließend Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit des untersuchten Verfahrens und eine erste Bewertung der trockenen Adsorption im Vergleich zu alternativen Verfahren. Dabei zeigte sich, dass die spezifischen Abscheidungskosten bisher weit über denen anderer CO<sub>2</sub>-Abscheidungsverfahren liegen. Dies ist u. a. auf die bisher unzureichende Desorption zurückzuführen.

Bei der verfahrensgestützten Prozessmodellierung konnte gezeigt werden, dass eine Einbindung der trockenen Adsorption am Ende des Klinkerbrennprozesses (Post-Combustion-Verfahren) problemlos möglich wäre. Allerdings ließe sich mit einer einstufigen Adsorption keine ausreichende CO<sub>2</sub>-Minderung erreichen – erst mit einer dreistufigen Adsorption wäre eine praktisch vollständige CO<sub>2</sub>-Abscheidung möglich. Weiterhin zeigten die Modellierungen für eine BAT-Anlage (Best Available Techniques), dass bei einer angenommenen Rohmaterialfeuchte von 2 % die gesamte Regenerationswärme aus dem Klinkerbrennprozess bereitgestellt werden könnte.

Luft vom Adsorbensmittel abgelöst und ausgetragen. Die bei der Desorption und dem nachfolgenden Spülen erlangte Beladungskapazität erlaubte beim zyklischen Betrieb der Reaktionsbehälter Taktzeiten bis zu acht Minuten ohne CO<sub>2</sub>-Durchbruch bei der Adsorption. Die unerwünschte Co-Adsorption von Wasser aus dem wasserdampfgesättigten Abgas erwies sich bei dem eingesetzten

Darüber hinaus wurde deutlich, dass der eigentliche Klinkerbrennprozess durch die Einbindung einer trockenen Adsorption kaum beeinflusst würde und somit eine Nachrüstung an bestehenden Anlagen grundsätzlich möglich wäre. Zuvor wären allerdings umfangreiche weitere Untersuchungen, u. a. mit verbesserten Adsorbentien, durchzuführen.



**Bild 3.2.7-2** CO<sub>2</sub>-Konzentration im „Rohgas“ (obere Kurve) und im „Reingas“ (untere Kurve) der Adsorptionsbehälter

### 3.3 Leistungsfähigkeit von Zement

#### Chemische Zusammensetzung von Normzementen

Die von den VDZ-Mitgliedswerken hergestellten Zemente werden in regelmäßigen Abständen per Röntgenfluoreszenzanalyse auf ihre chemische Zusammensetzung hin untersucht. In **Tabelle 3.3-1** sind die Mittelwerte sowie die Höchst- und Niedrigstwerte von Portlandzementen unterschiedlicher Festigkeitsklassen nach DIN EN 197 zusammengestellt. Es sind keine systematischen Veränderungen der Daten im Vergleich zu früheren Erhebungen zu erkennen.

Die Verlagerung der Marktanteile zu Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen hat sich weiter fortgesetzt, insbesondere in den unteren Festigkeitsklassen. Das Segment der Portlandkompositzemente („M-Zemente“) hat sich dabei aber nicht weiter gesteigert.

Die chemische Zusammensetzung der wichtigsten CEM II-Zementarten ist in **Tabelle 3.3-2** aufgeführt. An einzelnen Produktionsstandorten werden darüber hinaus Ölschiefer, Flugasche oder Silikastaub als Hauptbestandteile für CEM II-Zemente eingesetzt.

**Tabelle 3.3-3** fasst die chemische Zusammensetzung der aktuell produzierten Hochofenzemente (CEM III/A und CEM III/B) zusammen. Von untergeordneter Bedeutung sind weiterhin die Zementtypen CEM III/C, CEM IV und CEM V.

Über alle Zementarten hinweg ist in der Anzahl der zur Überwachung angemeldeten Zemente ein Trend zu höheren Festigkeitsklassen zu verzeichnen. Um auch bei Zementen mit gesenktem Klinkerfaktor adäquate Frühfestigkeiten zu gewährleisten, wird in der Regel die Mahlfeinheit erhöht. Dies führt dann aber häufig auch zu höheren Normfestigkeiten, was die Einstufung des Zements in eine höhere Festigkeitsklasse erforderlich machen kann.

**Tabelle 3.3-1** Chemische Zusammensetzung von Portlandzementen der verschiedenen Festigkeitsklassen, Angaben in M.-%, glühverlusthaltig

CEM I															
Festigkeitsklasse	32,5 R			42,5 N			42,5 R			52,5 N			52,5 R		
	Min.	Mittel	Max.												
SiO <sub>2</sub>	19,34	20,47	22,35	19,08	20,80	22,96	18,41	20,34	22,84	19,40	20,99	23,03	18,55	20,59	22,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,95	5,05	5,94	2,97	4,67	5,74	3,50	4,87	6,52	3,06	4,60	5,73	3,57	4,74	5,58
TiO <sub>2</sub>	0,22	0,30	0,38	0,17	0,25	0,36	0,13	0,26	0,41	0,13	0,25	0,38	0,13	0,25	0,36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,09	3,34	6,57	1,36	2,83	6,70	0,08	3,07	6,81	0,22	2,79	6,60	0,23	2,48	3,91
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,07	0,09	0,04	0,07	0,20	0,03	0,14	2,99	0,03	0,07	0,16	0,03	0,07	0,25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	0,21	0,39	0,07	0,21	0,46	0,00	0,19	0,47	0,04	0,20	0,43	0,04	0,20	0,48
CaO	60,80	62,36	63,72	61,10	63,95	65,86	59,90	63,25	66,12	61,03	64,19	66,05	61,66	64,24	66,02
MgO	0,80	1,86	3,20	0,77	1,42	3,69	0,66	1,60	3,61	0,66	1,40	3,31	0,66	1,39	2,86
SO <sub>3</sub>	2,43	2,94	3,18	2,18	2,81	3,24	2,02	3,01	3,59	2,23	2,90	3,65	0,70	3,18	3,74
K <sub>2</sub> O	0,70	1,01	1,48	0,33	0,75	1,42	0,33	0,89	1,43	0,33	0,70	1,25	0,33	0,77	1,48
Na <sub>2</sub> O	0,12	0,20	0,26	0,08	0,18	0,30	0,08	0,19	0,34	0,07	0,18	0,30	0,07	0,18	0,30
Na <sub>2</sub> O <sub>Aqu.</sub>	0,65	0,87	1,20	0,33	0,67	1,21	0,43	0,78	1,15	0,30	0,64	1,03	0,31	0,69	1,11
Glv	1,41	2,14	2,98	0,30	2,04	3,41	0,28	2,12	4,29	0,53	1,68	3,72	0,69	1,88	3,53

**Tabelle 3.3-2** Chemische Zusammensetzung von CEM II-Zementen, Angaben in M.-%, glühverlusthaltig

CEM II															
Zementart	CEM II/A-LL			CEM II/A-S			CEM II/B-S			CEM II/B-M (S-LL)			CEM II/B-P		
	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.
SiO <sub>2</sub>	17,32	18,87	22,01	20,71	22,23	24,77	23,32	24,72	26,34	19,18	21,74	26,74	27,90	30,11	33,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,96	4,46	5,37	4,45	5,68	6,52	5,72	6,49	7,42	4,83	5,51	5,93	6,92	7,91	8,77
TiO <sub>2</sub>	0,17	0,24	0,30	0,24	0,47	4,01	0,31	0,40	0,50	0,27	0,31	0,35	0,34	0,41	0,51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,16	2,50	3,89	1,66	2,38	3,12	1,07	2,08	3,22	1,74	2,27	2,70	2,51	3,41	3,83
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,07	0,26	0,06	0,12	0,34	0,06	0,15	0,53	0,06	0,12	0,20	0,06	0,10	0,14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	0,18	0,39	0,07	0,19	0,42	0,06	0,13	0,21	0,07	0,24	0,38	0,10	0,20	0,39
CaO	59,16	61,90	64,35	55,90	60,37	62,70	54,16	57,38	60,52	55,23	58,29	60,15	44,93	47,75	49,75
MgO	0,62	1,57	3,83	1,24	2,34	4,19	1,71	2,91	5,31	1,60	2,47	3,14	1,13	1,64	2,39
SO <sub>3</sub>	2,14	2,94	3,63	2,17	3,12	3,64	2,03	2,91	4,12	2,58	2,96	3,48	1,61	2,72	3,31
K <sub>2</sub> O	0,30	0,79	1,45	0,38	0,88	1,33	0,42	0,75	1,28	0,64	0,96	1,25	0,73	1,72	2,52
Na <sub>2</sub> O	0,07	0,16	0,30	0,13	0,22	0,33	0,17	0,24	0,33	0,17	0,21	0,31	0,62	0,87	1,20
Na <sub>2</sub> O <sub>Aqu.</sub>	0,27	0,69	1,11	0,51	0,80	1,11	0,48	0,73	1,05	0,60	0,85	1,03	1,11	2,00	2,70
S <sup>2-</sup>	–	0,07	0,10	0,06	0,20	0,36	0,14	0,34	0,56	0,11	0,19	0,37	–	–	–
Glv	3,56	6,26	9,59	0,39	1,85	2,79	0,25	1,68	2,74	1,52	4,80	7,71	1,60	3,11	4,29

**Tabelle 3.3-3** Chemische Zusammensetzung von Hochofenzementen, Angaben in M.-%, glühverlusthaltig

Zementart	CEM III					
	CEM III/A			CEM III/B		
	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.
SiO <sub>2</sub>	25,09	27,78	31,84	29,22	31,16	33,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,28	7,64	9,57	8,19	8,86	10,09
TiO <sub>2</sub>	0,37	0,50	0,67	0,45	0,64	0,83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,85	1,59	2,80	0,67	1,05	1,41
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	0,21	0,90	0,11	0,24	0,34
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,11	0,26	0,03	0,06	0,15
CaO	46,66	52,59	56,52	46,26	48,33	49,70
MgO	2,75	3,90	6,56	3,85	4,69	5,70
SO <sub>3</sub>	1,07	2,99	12,49	1,03	2,34	3,87
K <sub>2</sub> O	0,34	0,72	1,19	0,47	0,66	0,89
Na <sub>2</sub> O	0,14	0,26	0,44	0,19	0,27	0,40
Na <sub>2</sub> O <sub>Aqu.</sub>	0,32	0,73	1,04	0,51	0,70	0,92
S <sup>2-</sup>	0,30	0,59	0,99	0,55	0,85	1,09
Glv	0,39	1,65	3,50	0,46	1,30	3,19

### 3.3.1 Einfluss der Verringerung von Schmelzpunkt und Viskosität der Klinkerschmelze durch Aschen alternativer Brennstoffe auf Sinterreaktionen und Coatingbildung ■

IGF-Vorhaben 19221 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
 Projektpartner: Forschungsgemeinschaft Feuerfest e.V. (FGF)  
 Projektzeitraum: 10/2016 – 03/2019

#### Hintergrund und Ziele

Brennstoffaschen können die Viskosität der Klinkerschmelze absenken. Im Forschungsvorhaben wird untersucht, wie sich dies auf die Sinterreaktionen und die feuerfeste Zustellung in Drehrohröfen auswirkt. Von besonderem Interesse ist dabei, ob durch die für Alternativbrennstoffaschen typischen Nebenoxide schon bei niedrigeren Prozesstemperaturen ein ausreichender Sinterungsgrad erreicht werden kann. Im Speziellen werden die Auswirkungen auf die Chemie und Mineralogie von Klinkern und Einflüsse auf die Zementqualität sowie auf das Feuerfestmaterial untersucht.

Es wird eine Datenbasis erarbeitet, mit der Zementhersteller den Einfluss alternativer Brennstoffe auf die Schmelzphasenbildung besser einschätzen können. Auf dieser Grundlage erlangen auch Hersteller feuerfester Erzeugnisse neue Erkenntnisse über die Einflüsse der Aschen alternativer Brennstoffe und der verringerten Betriebstemperatur auf die Coatingbildung sowie die Stabilität ihrer Produkte in Drehrohröfen.

#### Vorgehensweise

Für die Untersuchungen wurden Rohmehl-Asche-Gemische hergestellt. Zudem wurden verschiedene Methoden zur Bestimmung von Schmelzmenge und Schmelzbildungstemperatur erforscht. Im statischen und dynamischen Brennverfahren wurden Laborklinker aus mehreren, mit verschiedenen Aschen dotierten Gemischen hergestellt. Auf diese Weise sollten die Einflüsse des Brennverfahrens auf die Schmelzbildung ermittelt werden.

Darüber hinaus war die Qualität der Laborklinker zu bewerten. Um die Auswirkungen der veränderten Schmelzbildung auf die feuerfeste Ausmauerung im Drehrohröfen abzuschätzen, werden in einer Labor-Drehtrommel-Anlage die Coatingbildung und die Feuerfestkorrosion analysiert.

#### Stand der Arbeiten

Alle Rohmehl-Asche-Gemische in diesem Forschungsprojekt sind an die Modellsysteme des abgeschlossenen Forschungsprojektes IGF 16905 N angelehnt (s. VDZ-Tätigkeitsbericht 2012-2015). Die Aschen wurden synthetisch aus chemisch reinen Substanzen zusammengesetzt. Es wurden zwei Rohmehle mit unterschiedlichen Tonerdemodulen (1,2 und 1,7), gleichem Kalkstandard (93) und Silikatmodul (2,0) hergestellt. Als Alternativbrennstoffe wurden flugfähige Fraktionen aus Industrie- bzw. Gewerbeabfällen sowie Klärschlamm zugrunde gelegt. Die Hauptoxide aus deren Aschen wurden, wie in der Praxis üblich, auf das Rohmehl angerechnet, wodurch zementchemische Parameter des Rohmehls unverändert blieben. Zusätzlich wurden auch die Nebenoxide, die aschotypisch variieren, bei der Rohmehlzusammensetzung berücksichtigt.

Die Ermittlung der Schmelzbildungstemperatur der Rohmehl-Asche-Gemische ist von großer Bedeutung. Bislang existiert kein Routineverfahren zur Untersuchung der tatsächlichen, durch Brennstoffasche abgesenkten Schmelzbildungstemperatur in Klinkersystemen. Hierzu werden die Eignung der simultanen Thermoanalyse (STA), der Hochtemperaturröntgenbeugung und, bei der Forschungsgemeinschaft Feuerfest e.V., die „Methode Monotones Heizen“ (MMH) untersucht. Gleichzeitig sollen anhand der Ergebnisse der genannten Methoden vier relevante Brenntemperaturen festgelegt werden, bei denen die modifizierten Rohmehl-Asche-Gemische zu Klinker gebrannt werden. Auf diese Weise soll der Fortschritt der Klinkerbildung durch umfassende Klinkeranalytik überprüft werden.

Neben der Klinkerqualität ist auch der Einfluss der durch die Brennstoffaschen verringerten Schmelztemperatur auf die Stabilität der Coatingschicht im Drehrohröfen zu erforschen. Hierzu werden in einer Labordrehtrommel Klinkerbrände durchgeführt. In der Versuchsanlage werden verschiedene feuerfeste Materialien verbaut und auf Coatingbildung im Zusammenspiel mit unterschiedlichen Rohmehl-Asche-Gemischen getestet. Im Zuge dieser systematischen Untersuchungen der Forschungsgemeinschaft Feuerfest e.V. soll geprüft werden, ob bei der Absenkung der Schmelztemperatur infolge von Brennstoffasche noch eine Klinkerschmelze mit geeigneten Eigenschaften zur Haftvermittlung entsteht, die eine wirksame Coatingbildung auch bei niedrigeren Prozesstemperaturen ermöglicht.

### 3.3.2 Hochleistungsklinker für Hochofenzemente ■

IGF-Vorhaben 18935 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
 Projektzeitraum: 11/2015 – 04/2018

#### Hintergrund und Ziele

Zur Senkung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen setzt die Zementindustrie u. a. auf Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen. Hüttensand ist hierbei neben Portlandzementklinker der am häufigsten eingesetzte Zementhauptbestandteil. Bei Verwendung von Hochofenzementen in der Bauindustrie besteht in vielen Fällen der Wunsch nach hohen Frühfestigkeiten. Dabei wird die

**Tabelle 3.3.2-1** Zusammensetzung der Laborklinker sowie 2-Tage-Druckfestigkeiten von CEM I und CEM III/A mit 60 M.-% Hüttensand 1 (HS1).

Parameter	Einheit	RK	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K9	K8	K12 <sup>1)</sup>	K13 <sup>2)</sup>	K14 <sup>3)</sup>	K15 <sup>4)</sup>	
C <sub>3</sub> S	M.-%	68,7	58,7	73,2	70,7	69,1	67,8	63,8	62,1	74,9	70,6	70,9	68,6	68,1	
C <sub>2</sub> S		13,8	24,1	10,1	13,7	12,6	11,4	14,2	19	9,2	12,7	10,8	15,2	14,2	
C <sub>3</sub> A <sub>kub</sub>		2,4	3,7	7,8	2,0	8,0	14,5	0,8	8,9	1,3	4,1	3,9	5,8	6,2	
C <sub>3</sub> A <sub>orth</sub>		7,6	4,5	1,6	1,8	5,6	3,8	12,0	4,2	3,9	1,4	4,8	0,5	0,4	
C <sub>3</sub> A <sub>gesamt</sub>		10	8,2	9,4	3,8	13,6	18,3	12,8	13,2	5,1	5,5	8,7	6,3	6,6	
C <sub>4</sub> AF		6,6	8	6,7	11,0	4	1,4	5,6	4,4	9,6	10,8	8,4	9,2	9,9	
F <sup>-</sup>		–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,33	0,16	0,2	0,27	
2-Tage-Druckfestigkeit	CEM I <sup>5)</sup>	MPa	39,8	33,3	42,9	36,7	46,8	39,6	39,9	42,2	39,3	39,5	42,9	42,2	39,2
	CEM III/A mit HS1		15,7	13,5	18,2	14,9	16,5	17,3	14,2	15,2	18,0	14,2	14,9	14,6	13,0

<sup>1)</sup> Zugabe von 1 M.-% CaF<sub>2</sub><sup>2)</sup> Zugabe von 0,5 M.-% CaF<sub>2</sub><sup>3)</sup> Zugabe von 0,5 M.-% CaF<sub>2</sub> und 2,5 M.-% CaSO<sub>4</sub> · 2 H<sub>2</sub>O<sup>4)</sup> Zugabe von 0,7 M.-% CaF<sub>2</sub> und 2,0 M.-% CaSO<sub>4</sub> · 2 H<sub>2</sub>O<sup>5)</sup> An Prismen (1,5 cm · 1,5 cm · 6 cm)

Frühfestigkeitsentwicklung eines Hochofenzements maßgeblich von den Eigenschaften seiner beiden Hauptbestandteile, Klinker und Hüttensand, bestimmt.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Leistungsfähigkeit von Hochofenzementen durch die Anpassung der Klinkerphasenzusammensetzung (bzw. den Zusatz von Mineralisatoren bei der Klinkerherstellung) zu erhöhen und damit die 2-Tage-Druckfestigkeiten der entsprechenden Zemente zu verbessern. Die optimale mineralogische Zusammensetzung des Klinkers für das Reaktionsvermögen des jeweiligen Hüttensandes wurde systematisch ermittelt.

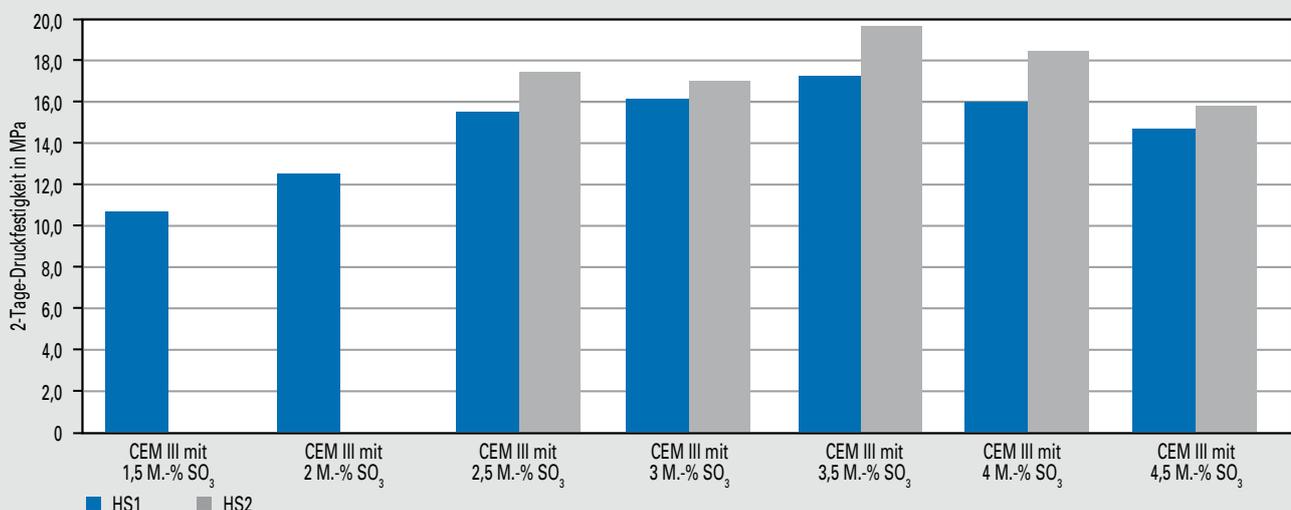
### Vorgehensweise

Die Gehalte der vier Klinkerphasen (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A und C<sub>4</sub>AF) sowie die Modifikationen des C<sub>3</sub>A wurden systematisch in 13 Laborklinkern variiert und das Zusammenspiel dieser Klinker mit zwei verschiedenen Hüttensanden untersucht (**Tabelle 3.3.2-1**). Zudem wurde ermittelt, wie vier unterschiedlich mineralisierte Klinker (K12-K15) die Frühfestigkeitsentwicklung von Hochofenzementen beeinflussen. Es wurde eine Sulfatträgeroptimierung durchgeführt, sowohl in Bezug auf den hergestellten

Klinker als auch auf eine sulfatische Anregung der Hüttensande durch Anhydritzugabe. Um die Auswirkungen der verschiedenen Klinker auf die Hochofenzementeigenschaften, insbesondere aber auf die Frühfestigkeiten, zu erfassen, wurden mit Laborzementen Normprismen nach DIN EN 196-1 hergestellt, an denen im Alter von einem Tag, zwei und 28 Tagen jeweils die Druckfestigkeit bestimmt wurde.

### Ergebnisse/Stand der Arbeiten

Neben einem Referenzklinker (RK) wurden noch weitere zwölf Klinker im Labor hergestellt (**Tabelle 3.3.2-1**). Bei Klinker K1 bis K9 wurden die C<sub>3</sub>S-, C<sub>2</sub>S und C<sub>3</sub>A-Gehalte gegenüber dem Referenzklinker systematisch variiert. Bei Klinker K6 und K9 wurden die Modifikationen des C<sub>3</sub>A (kubisch/orthorhombisch) variiert. Durch Mahlung auf 4500 cm<sup>2</sup>/g nach Blaine und Mischen mit einem vorgegebenen Sulfatträger wurden Laborzemente (CEM I) hergestellt. Aus diesen Zementen wurden Miniprismen (1,5 cm · 1,5 cm · 6 cm) hergestellt, an denen die Druckfestigkeit im Alter von zwei Tagen bestimmt wurde (**Tabelle 3.3.2-1**). Aus den Untersuchungen geht hervor, dass die Zusammensetzung des Portlandzementklinkers die Druckfestigkeitsentwicklung des CEM I-Zements signifikant beeinflusst. Die Portlandzemente mit

**Bild 3.3.2-1** 2-Tage-Druckfestigkeiten von Mörtelprismen mit CEM III/A mit 60 M.-% Hüttensand 1 (HS1) bzw. Hüttensand 2 (HS 2).

Klinker K2 und K4 wiesen die höchsten 2-Tage-Druckfestigkeiten auf. Auch die Zugabe von 0,5 M.-% CaF<sub>2</sub> verbesserte die 2-Tage-Druckfestigkeit des CEM I.

Als Nebenaspekt wurde die Sulfatisierung von Hüttensanden durch Zugabe von Anhydrit untersucht. Ziel war es, eine optimale sulfatische Anregung der Hüttensande zu erreichen. Dafür wurden aus bereits sulfatoptimiertem Portlandzement und zwei Hüttensanden CEM III/A-Zemente (60 M.-% Hüttensand) mit unterschiedlichen Anhydritmengen hergestellt und anschließend hydratisiert ( $w/z = 0,5$ ). Die Höhe der jeweiligen Anhydritzugabe für den Hüttensand wurde von 0 M.-% (gesamt SO<sub>3</sub>-Gehalt 1,5 M.-%) bis 3,0 M.-% (gesamt SO<sub>3</sub>-Gehalt 4,5 M.-%) variiert. Die maximale sulfatische Anregung wurde durch die Beurteilung der Festigkeitsentwicklung der CEM III/A-Zemente im Alter von zwei Tagen ermittelt (**Bild 3.3.2-1**). Bei sulfatischer Hüttensandanregung bildet sich zusätzlicher Ettringit aus dem freigesetzten Aluminat des Hüttensands. Dieser Ettringit sowie die gleichzeitig entstehenden Calciumsilikathydrate liefern einen zusätzlichen Beitrag zur Frühfestigkeit. Das zeigte sich gleichermaßen bei den Hüttensanden 1 (HS 1) und 2 (HS 2) bei 3,5 M.-% Gesamt-SO<sub>3</sub> (2,0 M.-% SO<sub>3</sub>-Zugabe als Anhydrit). Hier wurden Frühfestigkeitssteigerungen von bis zu rd. 8 MPa (HS 2) erreicht.

Den Einfluss der verschieden zusammengesetzten Portlandzementklinker auf die Frühfestigkeitsentwicklung der Hochofenzemente zeigt **Tabelle 3.3.2-1**. Sowohl eine Steigerung des C<sub>3</sub>S- als auch des C<sub>3</sub>A-Gehalts gegenüber dem Referenzklinker wirkt sich positiv auf die 2-Tage-Druckfestigkeit aus. Danach deutet sich an, dass die Druckfestigkeit nach zwei Tagen mit steigendem C<sub>3</sub>A-Gehalt ein Optimum bei etwa 13 % bis 18 % durchläuft. Ein hoher C<sub>3</sub>S-Gehalt des Klinkers hat im Wesentlichen wegen der erhöhten Ca(OH)<sub>2</sub>-Entwicklung auch einen positiven Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit des Hüttensandes. Der gesteigerte C<sub>3</sub>S-Gehalt bei den Klinkern K2 bzw. K8 führte im Vergleich zum Referenzklinker zu höheren 2-Tage-Druckfestigkeiten. Die Mineralisierung der Klinker (K12-K15) ergab keine signifikante Verbesserung der 2-Tage-Druckfestigkeiten der CEM III/A Zemente.

### 3.3.3 Beurteilung von Portlandzementklinker mittels mikroskopischer und röntgenografischer Analysemethoden zur Bewertung des Klinkerbrennprozesses ■

IGF-Vorhaben 18776 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektzeitraum: 07/2015 – 03/2018

#### Hintergrund und Ziele

Der Klinkerbrennprozess kann recht gut mithilfe der Klinkermikroskopie bewertet werden. Diese ist jedoch aufwändig. Daher wurde eine Methodik entwickelt, mit der sich Korrelationen zwischen mikroskopisch/röntgenografisch analysierten Klinkereigenschaften und den Brennbedingungen aufzeigen lassen. So können aus den Klinkereigenschaften schneller Informationen über die Brennbedingungen im Drehrohrföfen abgeleitet werden. Letztere lassen sich dann prozesstechnisch optimieren, um eine gleichbleibende hohe Klinkerqualität zu sichern.

#### Vorgehensweise

Zunächst wurden die Auswirkungen einzelner Brennbedingungen auf bestimmte Klinkereigenschaften im Labormaßstab lichtmikroskopisch analysiert und mit Literaturdaten abgeglichen. Anschließend war zu prüfen, inwieweit sich die Zusammenhänge zwischen Klinkereigenschaften und Brennbedingungen unter Laborbedingungen auch auf Werksklinker übertragen lassen, die mit in Deutschland typischem Brennstoffeinsatz hergestellt wurden. Letztendlich wurde untersucht, auf welche Art sich dieselben Klinkereigenschaften, die durch aufwendige lichtmikroskopische Analysen ermittelt werden, in den röntgenografischen Eigenschaften widerspiegeln.

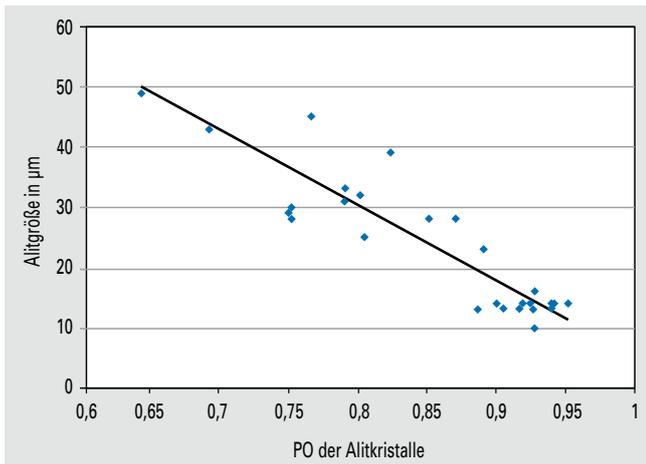
Die lichtmikroskopischen Beobachtungen beruhen auf der so genannten „Ono-Methode“, die eine Kombination aus Untersuchungen im Durchlicht und im Auflicht darstellt. Dabei werden vier grundlegende Brennparameter (Heizrate, Maximale Temperatur, Sinterdauer und Kühlrate) halbquantitativ anhand mikroskopischer Parameter (Alitgröße, Alit-Doppelbrechung, Belitgröße und Belitfarbe) beurteilt. Für die detaillierte röntgenografische Beurteilung wurden je Probe drei Diffraktogramme (an Originalprobe, am Rückstand nach Methanol-Salicylsäure-Aufschluss und am Rückstand nach KOH-Saccharose-Aufschluss) ausgewertet.

#### Ergebnisse

Die Auswertung der Untersuchungen an den Laborklinkern mit der Ono-Methode zeigte vor allem für die Brennparameter Sinterdauer und Kühlrate einen Zusammenhang mit den jeweiligen Klinkereigenschaften (Belitgröße und Belitfarbe). Die Auswertung der Brennbedingungen Maximale Temperatur und Heizrate ergab keine systematischen Korrelationen zu den alitbezogenen Parametern (Alit-Doppelbrechung und Alitgröße). Dies könnte auf die fehlende Dynamik bei Laborofenbränden im Vergleich zur Klinkerherstellung im Drehrohrföfen zurückzuführen sein. Im Vergleich zu Werksklinkern waren die Alitkristalle bei den Laborklinkerbränden eher feiner ausgeprägt (ca. 10 bis 12 µm).

Es wurden fünf Werksversuche mit unterschiedlichen Flammenformen und -längen durchgeführt. Die Flammenänderungen erfolgten ausschließlich über eine Regulierung der Luftverhältnisse am Hauptbrenner. An den Werksklinkern konnte die Ono-Methode weitestgehend verifiziert werden. Der mikroskopische Parameter Alit-Doppelbrechung stieg mit der Verlängerung der Flamme, da die Maximale Temperatur in der Sinterzone durch die Flammenverlängerung abnahm. Mit Verlängerung der Flamme vergrößerten sich die Alit- bzw. Belitkristalle. Die Alitgröße korrelierte mit einer verkürzten Heizrate, die Belitgröße mit einer verlängerten Sinterdauer bei Verlängerung der Flamme. Die Bewertung der Kühlrate anhand der Ono-Methode ergab keine signifikanten Aussagen.

Bezüglich röntgenografischer Parameter wurde festgestellt, dass der Strukturparameter PO (Preferred Orientation) in linearer Abhängigkeit zum mikroskopischen Parameter Alitgröße steht. PO ist ein Auswerteparameter der Rietveld-Analyse, der im Wesentlichen durch die Präparation der Probe beeinflusst wird. Bei der Präparation der Pulverprobe tendieren die Kristalle unter Druck je nach Größe und entsprechend ihrer Hauptwachstumsrichtungen dazu, parallel zur Oberfläche eingeregelt zu werden. **Bild 3.3.3-1** zeigt, dass die Alitgröße mit zunehmendem PO-Wert sinkt. Das bedeutet, dass kleine Alitkristalle nach dem Präparieren eine geringere Vorzugsorientierung aufweisen.



**Bild 3.3.3-1** Abhängigkeit der PO (Preferred Orientation) von der Alitgröße

Eine weitere Korrelation deutete sich zwischen dem Strukturparameter CS (Cristallite Size) und der Kühlrate an. CS gibt die Größe ideal ausgebildeter Bereiche innerhalb eines Kristalls an. Mit der Größe des Strukturparameters CS der dominierenden Phase in der Grundmasse (gemessen am Rückstand nach Methanol-Salizylsäure-Aufschluss) sind Aussagen zur Kühlrate möglich. Je schneller der Klinker gekühlt wurde (Vergleich von Satellitenkühler und Rostkühler), desto kleinere  $C_3A$ - bzw.  $C_4AF$ -Kristalle waren am Mikroskop erkennbar und desto niedriger war der entsprechende CS-Wert dieser Kristallphase.

### 3.3.4 Eignung von dolomitreichen Carbonatgesteinen als Zementhauptbestandteil ■

IGF-Vorhaben 18936 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektzeitraum: 01/2016 – 06/2018

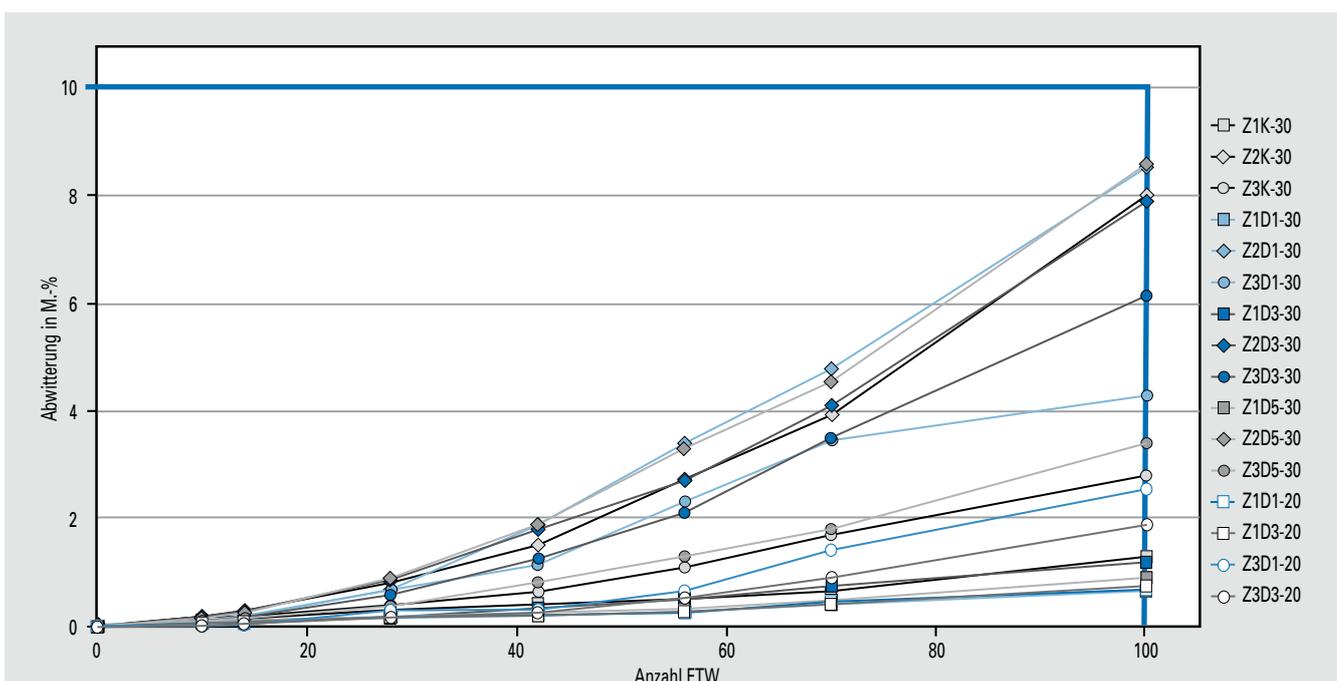
#### Hintergrund und Ziele

Kalkstein als Zementhauptbestandteil muss gemäß DIN EN 197-1 u. a. einen Calciumcarbonatgehalt (berechnet aus dem CaO-Gehalt) von mindestens 75 M.-% aufweisen. Diese Anforderung erfüllen auch dolomithaltige Carbonatgesteine mit Dolomitgehalten von bis zu 54 M.-%. Carbonatgesteine mit höheren Dolomitgehalten können somit nicht als Zementhauptbestandteil und auch nur bedingt als Rohmehlkomponente verwendet werden.

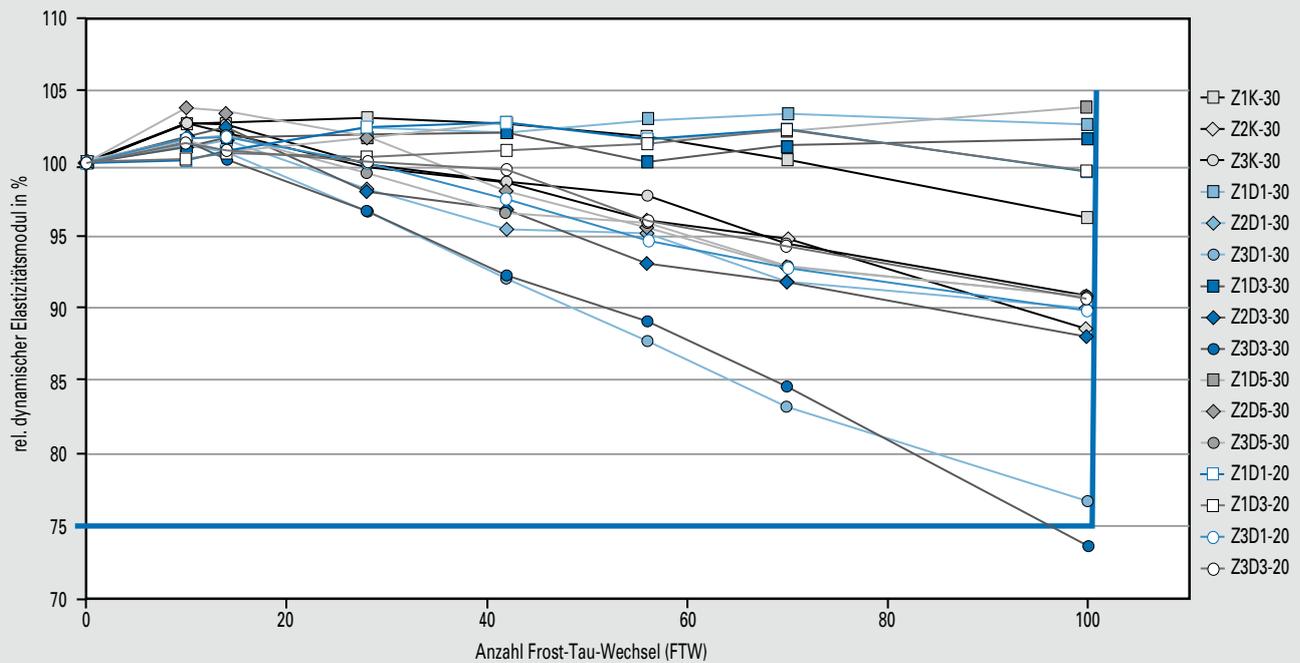
Ziel des Forschungsprojektes ist es daher, zu untersuchen, ob sich auch dolomitreiche Carbonatgesteine als Zementhauptbestandteil eignen. Hierzu wurden neben Zement- auch Betonprüfungen durchgeführt. Bei den Carbonatgesteinen waren darüber hinaus der Einfluss gesteinspezifischer Parameter und die Rolle des Dolomits bei der Zementhydratation zu analysieren.

#### Vorgehensweise

Für die Herstellung von dolomitreichen Zementen wurden fünf dolomitreiche Carbonatgesteine unterschiedlicher geologischer Herkunft mit Dolomitgehalten zwischen 61 und 98 M.-% ausgewählt, wovon vier aus Steinbrüchen von Zementwerken stammten. In Kombination mit vier verschiedenen Portlandzementen (zwei CEM I 42,5 und zwei CEM I 52,5) wurden hieraus 25 CEM II/B- und fünf CEM II/A-Zemente (mit 30 bzw. 20 M.-% Carbonatgestein) hergestellt. Darüber hinaus wurden als Referenzproben auch entsprechende CEM II-Zemente auf Basis eines rein calcitischen Kalksteins in das Versuchsprogramm einbezogen. An Normmörteln wurden Zementuntersuchungen zum Erstarrungsverhalten, zum Wasseranspruch und zur Druckfestigkeit



**Bild 3.3.4-1** Abwitterung (Masseverlust) der Betonprüfkörper in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (FTW, Würfelfrost-Verfahren) Zemente: Z1-Z3, Dolomite: D1, D3, D5, Referenzkalkstein: K, Dolomitgehalt: 30, 20 in M.-%



**Bild 3.3.4-2** Relativer dynamischer Elastizitätsmodul der Betonprüfkörper in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (FTW, Würfel-frost-Verfahren) Zemente: Z1-Z3, Dolomite: D1, D3, D5, Referenzkalkstein: K, Dolomitgehalt: 30, 20 in M.-%

durchgeführt. Anhand der Ergebnisse waren drei der fünf Dolomite für die Betonversuche auszuwählen. In Kombination mit drei der vier ursprünglichen Portlandzemente wurden auf Basis von vier Betonrezeptzusammensetzungen rd. 50 Betone hergestellt und geprüft. Untersucht wurden Frischbetoneigenschaften, Druckfestigkeiten, Frostwiderstand (Würfel-frost-Verfahren), Frost-Tausalz-Widerstand (CDF-Test, Capillary Suction, De-icing agent and Freeze-thaw-Test), Carbonatisierungstiefe und Chlorideindringwiderstand.

### Ergebnisse/Stand der Arbeiten

Sowohl untereinander als auch im Vergleich zu dem Referenzkalkstein ergaben sich nur geringe, wenig signifikante Unterschiede aus der Verwendung der verschiedenen dolomithaltigen Carbonatgesteine. Im Unterschied hierzu wirkten sich die verschiedenen Portlandzemente wesentlich deutlicher auf die Zementeigenschaften aus. Die Druckfestigkeiten nach 7 Tagen Hydratationsdauer lagen bei rd. 30 bzw. 45 MPa und nach 28 Tagen Hydratationsdauer bei rd. 38 bzw. 50 MPa für die CEM II/B-Zemente auf Basis eines CEM I 42,5 bzw. CEM I 52,5.

Bei den bisherigen Betonversuchen verhielten sich die eingesetzten dolomitreichen Zemente ebenfalls vergleichbar wie die Zemente auf Basis des Referenzkalksteins. Die an Feinbetonen durchgeführten Untersuchungen zum Carbonatisierungswiderstand nach 7 bzw. 28 Tagen Vorlagerung ergaben, dass in allen Fällen die vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) definierten Grenzwerte eingehalten wurden. Im Alter von 140 Tagen betrugen die Carbonatisierungstiefen weniger als 4 bzw. weniger als 2 mm. Beim Würfel-frost-Verfahren wurde der Grenzwert für die Abwitterung von 10 M.-% in keinem Fall überschritten (**Bild 3.3.4-1**). Auch beim zugleich geprüften relativen dynamischen Elastizitätsmodul wurde der Grenzwert von 75 % bis auf eine Ausnahme eingehalten (**Bild 3.3.4-2**). Die Betonversuche zum Frost-Tausalz-Widerstand und zum Chlorideindringwiderstand dauerten zum Redaktionsschluss des Tätigkeitsberichts noch an.

### 3.3.5 Einflüsse der Temperatur auf Wechselwirkungen zwischen Fließmitteln und Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen ■

IGF-Vorhaben 18642 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektzeitraum: 04/2015 – 09/2017

#### Hintergrund und Ziele

Die Wechselwirkungen zwischen Zementen und Fließmitteln wurden bislang meist nur bei Normaltemperatur von rd. 20 °C untersucht. Dies geschah, um definierte Bedingungen für bestimmte Analysen zu haben, bei denen die Einflüsse verschiedener Fließmittel und unterschiedlicher Zementbestandteile im Fokus stehen. Wechselwirkungen zwischen Zementen und Fließmitteln sind jedoch temperaturabhängig. Genaue Kenntnisse zu Temperatureinflüssen auf deren Wechselwirkungen sind daher von enormer Bedeutung, um unerwünschten Reaktionen im Beton vorbeugen zu können und so einer zunehmend jahreszeitunabhängigen Betonbautätigkeit Rechnung zu tragen.

Ziel des Vorhabens war es, Wechselwirkungen zwischen Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen und Fließmitteln im Temperaturbereich von 5 °C (Winterbetonage) bis 30 °C (Sommerbetonage) zu bestimmen. Die genannten Temperaturen stellen die gemäß DIN 1045-3 ohne weitere Maßnahmen zulässigen Mindest- bzw. Höchsttemperatur von Frischbeton beim Einbringen dar.

#### Vorgehensweise

In einer Temperatorkammer wurden bei 5, 20 und 30 °C jeweils Wechselwirkungen zwischen zehn Zementen sowie drei im Handel erhältlichen Fließmitteln bestimmt. Ein Fließmittel basierte auf Naphthalinsulfonat und zwei auf Polycarboxylatether (PCE). Die PCE unterschieden sich bzgl. ihres Einsatzbereichs

(Transportbeton und Beton für Fertigteile). Die Zemente wiesen die gleiche Klinker- und Sulfatkomponente sowie bis zu 35 M.-% Kalkstein, bis zu 55 M.-% getemperten Ton bzw. kieselsäurereiche Flugasche oder bis zu 80 M.-% Hüttensand auf. Es wurden die Sorption und verflüssigende Wirkung der Fließmittel sowie die Dauer der Verflüssigung von Zementleim mittels TOC-Analysen (Total Organic Carbon) und rheologischen Messungen bestimmt. Auch wurden die wirksame Ladungsmenge der Fließmittel sowie die ionische Zusammensetzung der Porenlösung und das Zetapotenzial ermittelt. Die Erkenntnisse wurden in Betonversuchen überprüft.

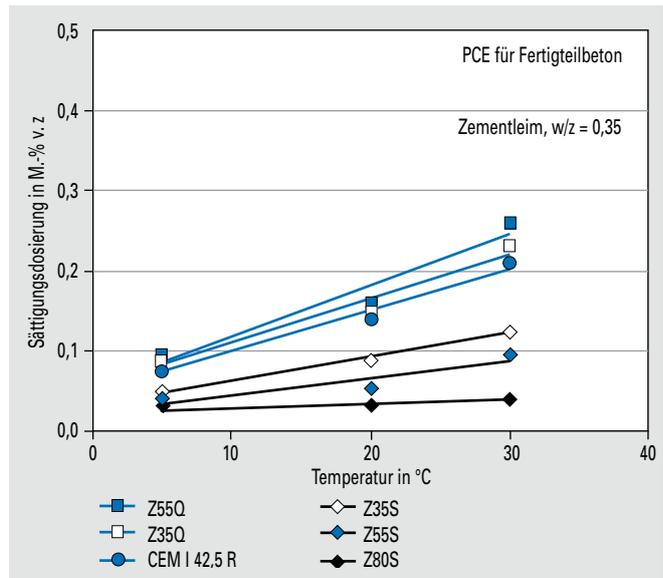
**Ergebnisse**

Die zur Verflüssigung der Proben mit Portlandzement CEM I 42,5 R erforderliche Menge an Fließmittelwirkstoff (Sättigungsdosierung) verringerte sich, wenn die Temperatur von 30 °C auf 5 °C gesenkt wurde. Dies wird auf die mit sinkender Temperatur abnehmende Reaktivität bzw. Hydratation des Zements zurückgeführt. Folglich war ein größerer Anteil des Zugabewassers zur Verflüssigung verfügbar. Zugleich waren weniger Hydratphasen mit Wirkstoff zu belegen.

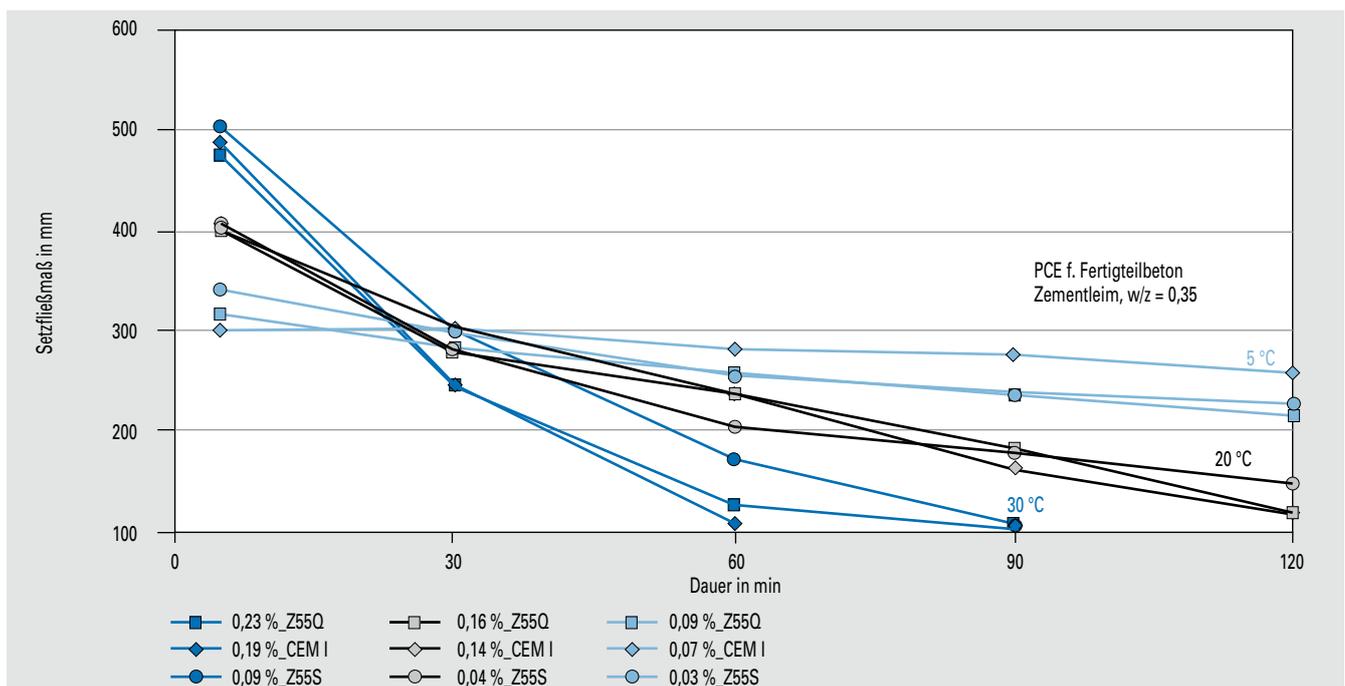
Der Einfluss der Temperatur verringerte sich mit steigender Substitution des Klinkers (reaktive, temperaturabhängige Komponente) im Zement. Verantwortlich hierfür waren die in der frühen Phase der Hydratation noch inaktiven und so von unterschiedlichen Temperaturen weniger beeinflussten weiteren Hauptbestandteile. Deren Eigenschaften bestimmten dann in steigendem Maße die Sättigungsdosierung des Fließmittels im Zementleim bzw. Beton. Zunehmende Anteile an Kalkstein, Flugasche oder Hüttensand als Substitute führten mit ihren geringen spezifischen Oberflächen im Zement zu einem Absinken der Sättigungsdosierung. Die Zementproben mit bspw. 55 oder 80 M.-% Hüttensand wiesen so eine von der Temperatur vergleichsweise unabhängige, geringe Sättigungsdosierungen auf (**Bild 3.3.5-1**). Substitute mit deutlich größerer spezifischer Oberfläche (z. B. getempertem Ton oder Kalkstein mit höherem Tonmineralgehalt) können mit

steigendem Anteil im Zement die Sättigungsdosierung erhöhen und mehr Fließmittel für die gleiche Verflüssigung erforderlich machen. Quellfähige Tonminerale in Kalkstein, in getempertem Ton oder in den feinen Fraktionen der Gesteinskörnung, können die Wirksamkeit von PCE deutlich verringern. Die Wirksamkeit des Naphthalinsulfonats war auch bei 5 °C und 30 °C stets geringer als die der beiden PCE.

Das PCE für Transportbeton ermöglichte vergleichsweise unabhängig vom Zement und relativ unabhängig von der Temperatur die angestrebte moderate Verflüssigung von Zementleim bzw.



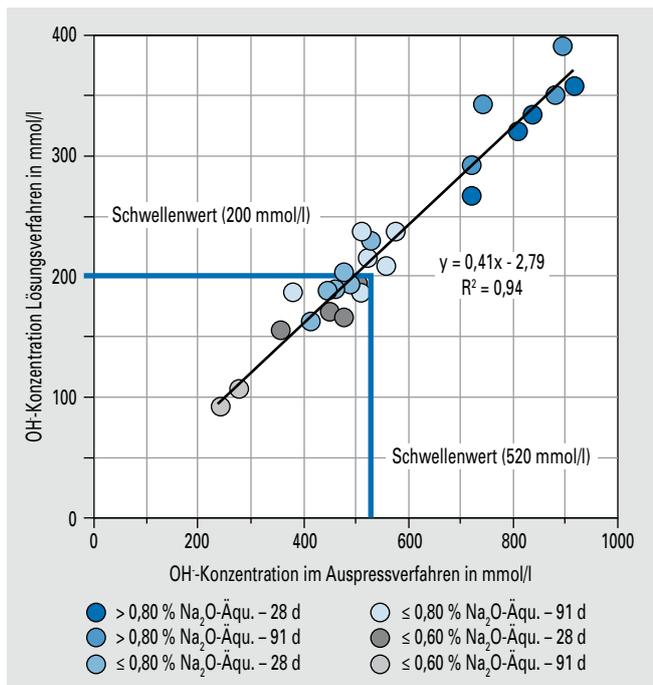
**Bild 3.3.5-1** Sättigungsdosierung von Zementleim mit Polycarboxylatether (PCE) in Abhängigkeit von der Temperatur sowie vom Anteil an getempertem Ton (Q) bzw. Hüttensand (S) im Zement von 35, 55 oder 80 M.-%



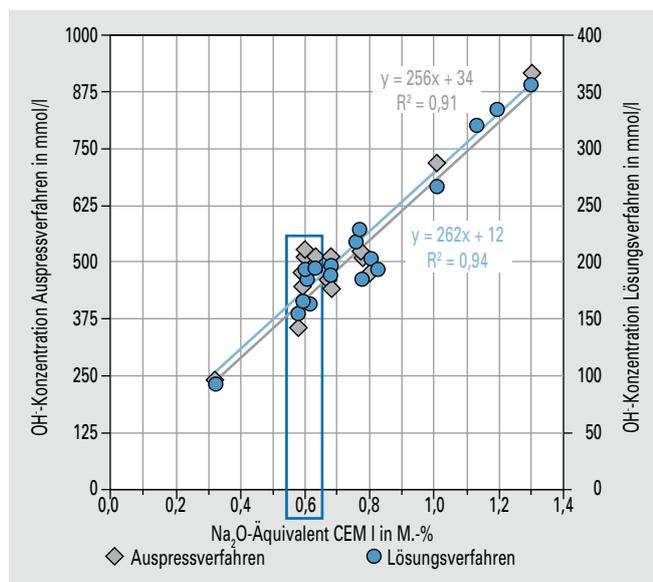
**Bild 3.3.5-2** Verflüssigende Wirkung eines Polycarboxylatether (PCE, Wirkstoffzugabemenge s. Legende) und Verflüssigungsdauer in Abhängigkeit von Zement und Temperatur

**Tabelle 3.3.6-1** Anforderungen an Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt (NA-Zemente) nach DIN 1164-10

Zementart	Hüttensand in M.-%	Na <sub>2</sub> O-Äquivalent in M.-%
CEM I bis CEM V	–	≤ 0,60
CEM II/B-S	≥ 21	≤ 0,70
CEM III/A	≤ 49	≤ 0,95
	≥ 50	≤ 1,10
CEM III/B	–	≤ 2,00
CEM III/C	–	≤ 2,00



**Bild 3.3.6-1** Hydroxidionenkonzentration verschiedener Portlandzemente im Auspressverfahren (w/z = 0,50) und im Lösungsverfahren (w/z = 1,00; Prüfung der überstehenden Lösung), Alter 28 und 91 Tage



**Bild 3.3.6-2** Hydroxidionenkonzentration verschiedener Portlandzemente im Auspressverfahren (w/z = 0,50) und im Lösungsverfahren (w/z = 1,00; Prüfung der überstehenden Lösung) im Alter von 8 Tagen in Abhängigkeit vom Na<sub>2</sub>O-Äquivalent

Beton. Die Verflüssigungsdauer war planmäßig sehr ausgeprägt. Sie erhöhte sich geringfügig mit sinkender Temperatur; zu ungewollter Nachverflüssigung kam es nicht. Hingegen ließ die molekülspezifische Wirkung des PCE für Fertigteilbeton (starke Verflüssigung, kurze Verflüssigungsdauer) unabhängig vom Zement mit sinkender Temperatur deutlich nach. So wirkte dieses PCE bei 5 °C unplanmäßig, eher wie ein PCE für Transportbeton: Die Verflüssigung fiel nur moderat aus und ging mit der Versuchsdauer kaum zurück (**Bild 3.3.5-2**). Das Naphthalinsulfonat wies bei den geprüften Kombinationen aus Zement und Temperatur die erwartete Wirkung (moderate Verflüssigung, kurze Verflüssigungsdauer) auf. Sie verlängerte sich geringfügig mit sinkender Temperatur und insbesondere bei 30 °C mit steigender Substitution des Klinkers im Zement.

### 3.3.6 Prüfung und Bewertung des wirksamen Alkaligehalts von Zementen

IGF-Vorhaben 19295 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektzeitraum: 01/2017 – 06/2019

#### Hintergrund und Ziele

Ein ausreichend hoher Widerstand von Betonbauwerken gegen eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) kann bei Verwendung alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen in bestimmten Fällen nur erreicht werden, wenn Zemente mit einem niedrigem wirksamem Alkaligehalt (NA-Zement) eingesetzt werden.

Die Eigenschaft „niedriger wirksamer Alkaligehalt“ wird nach DIN 1164-10 anhand des Gesamtalkali- und ggf. des Hüttensandgehalts definiert (**Tabelle 3.3.6-1**). Durch die vereinfachte Bestimmung des Gesamtalkaligehalts werden die Wirkungen verschiedener Hüttensande und anderer Zementhauptbestandteile wie z. B. Kalkstein (LL) auf den wirksamen Alkaligehalt eines Zements bisher nicht oder nur teilweise erfasst. In dem Vorhaben soll ein Prüf- und Bewertungskonzept für den wirksamen Alkaligehalt von Zementen entwickelt werden, das den stofflichen Eigenschaften der Zemente noch besser gerecht wird.

Dabei könnten auch Bewertungskriterien für Zement zur Vermeidung von AKR-Schäden unter Verwendung mäßig alkalireaktiver Gesteinskörnungen abgeleitet werden. Dies sind Gesteinskörnungen einer bisher nicht definierten Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S. Die neue Klasse würde sich ergeben, wenn die bisherige Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S für alkalireaktive Gesteinskörnungen in die zwei neuen Klassen E II-S (mäßig alkalireaktiv) und E III-S\* (alkalireaktiv) aufgeteilt würde. Ein erster Vorschlag zur Definition dieser Klasse wurde in einem früheren VDZ-Projekt erarbeitet. Mit diesem Ansatz ließen sich in einigen Regionen Deutschlands die stofflichen Ressourcen zukünftig ggf. noch effizienter nutzen.

#### Vorgehensweise

CEM I-NA-Zemente, Fahrbahndeckenzemente und Laborzemente unterschiedlicher Zusammensetzung werden mit dem Auspress- und dem Lösungsverfahren untersucht. Beim Auspressverfahren werden Zementsteine mit einem Wasserzementwert (w/z) von 0,50 hergestellt und deren Porenlösung durch Auspressen bei hohen Drücken gewonnen. Beim Lösungsverfahren beträgt der Wasserzementwert 1,00. Über dem Zementstein bildet sich überstehendes Wasser, das mit der Porenlösung im Gleichgewicht steht und für die Analyse entnommen werden kann. Ein aufwendiges Auspressen entfällt. Bei beiden Verfahren wird die Hydroxidionenkonzentration der Lösung untersucht, anhand derer der wirksame

Alkaligehalt von Zementen bewertet werden kann. Die ermittelten Hydroxidionenkonzentrationen werden den Ergebnissen aus Betonversuchen im Labor (AKR-Performance-Prüfungen) und den Ergebnissen der seit 40 Jahren durchgeführten Betonversuche mit Außenlagerung gegenübergestellt. Auf dieser Grundlage werden Bewertungskriterien für den wirksamen Alkaligehalt von NA-Zementen nach DIN 1164-10 und von Fahrbahndeckenzementen nach TL Beton-StB 07 abgeleitet.

### Ergebnisse/Stand der Arbeiten

Folgende Ergebnisse wurden bisher mit Portlandzementen erzielt:

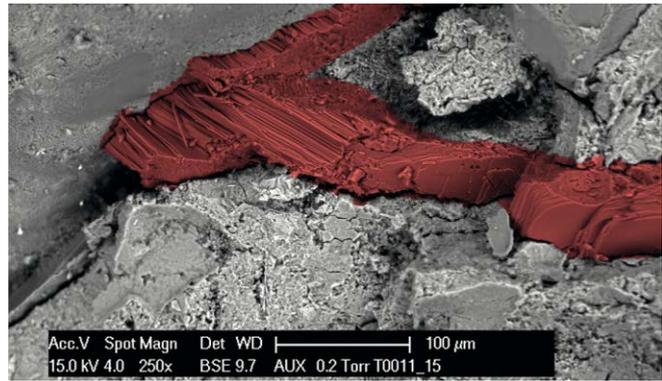
- Zwischen der Hydroxidionenkonzentration aus dem Auspress- und der Hydroxidionenkonzentration aus dem Lösungsverfahren besteht ein guter Zusammenhang (**Bild 3.3.6-1**).
- Um Schwellenwerte für NA-Zemente abzuleiten, wurden neben Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen zunächst unterschiedliche Portlandzemente mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent zwischen 0,58 M.-% und 0,61 M.-% untersucht. Die Portlandzemente mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent  $\leq 0,60$  M.-% weisen im Auspressverfahren Hydroxidionenkonzentrationen  $\leq 520$  mmol/l (pH-Wert 13,72) bzw. im Lösungsverfahren Hydroxidionenkonzentrationen  $\leq 200$  mmol/l (pH-Wert 13,29) auf (**Bild 3.3.6-1**). Bedingung für die Schwellenwerte war, dass Portlandzemente mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von  $\leq 0,60$  M.-% möglichst weiterhin als NA-Zemente bewertet werden können.
- **Bild 3.3.6-2** zeigt, dass sich die Hydroxidionenkonzentrationen von Portlandzementen mit einem vergleichbaren  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von rund 0,60 M.-% (blauer Rahmen) im Auspress- und Lösungsverfahren deutlich unterscheiden. Da verschiedene Zemente ungleiche Mengen an Alkalien zur Porenlösung beitragen, können die Hydroxidionenkonzentrationen von Zementen mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von größer 0,60 M.-% teilweise auch unter den in **Bild 3.3.6-1** dargestellten Schwellenwerten liegen. Um die Ursache für den mäßigen Zusammenhang zwischen dem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent und der Hydroxidionenkonzentration zu klären, wird zusätzlich die Klinkerzusammensetzung der Zemente untersucht.

### 3.3.7 Modifiziertes Sulfatwiderstandsprüfverfahren ■

IGF-Vorhaben 18024 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektzeitraum: 01/2014 – 06/2016

#### Hintergrund und Ziele

CEM I-SR- und CEM III/B-SR-Zemente weisen in der Praxis durchweg einen hohen Sulfatwiderstand (SR) auf. Allerdings wird diese seit vielen Jahrzehnten bekannte Eigenschaft in dem vom Sachverständigenausschuss des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) geforderten Prüfverfahren zur Bestimmung des Sulfatwiderstands (SVA-Verfahren) nicht in allen Fällen abgebildet. Die Ursache hierfür sollte ermittelt und das Prüfverfahren so modifiziert werden, dass sich für genormte Zemente mit bekanntermaßen hohem bzw. niedrigem Sulfatwiderstand eindeutige Prüfergebnisse erzielen lassen. Auch soll es für Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen (insbesondere mit Flugasche- oder natürlichen Puzzolan-Anteilen) eine zuverlässige Beurteilung des Sulfatwiderstands ermöglichen. Ziel des Forschungsprojekts war somit die Entwicklung eines robusten, neuen, praxisgerechteren Prüfverfahrens zur Bestimmung des Sulfatwiderstands von Zementen.



**Bild 3.3.7-1** REM-Aufnahme, sekundäre Gipsbildung im Mörtelprüfkörper eines CEM I-SR

#### Vorgehensweise

Es wurden zehn CEM I-SR-Zemente, also die vollständige Palette der in Deutschland hergestellten SR-Portlandzemente, sowie verschiedene CEM III/B-SR-Zemente und gewöhnliche Portlandzemente geprüft. Dies erfolgte sowohl mittels bisherigem SVA-Verfahren als auch mit der vom Sachverständigenausschuss neu vorgeschlagenen Verfahrensvariante. Bei beiden Varianten wurden relative Längenänderungen von Mörtelflachprismen nach Lagerung in Prüf- und Referenzlösung ermittelt. Unterschiede bestanden in der Sulfatkonzentration der Prüflösung (30 bzw. 3 g/l) und in der Länge der Lagerung (182 Tage bzw. zwei Jahre).

Darüber hinaus wurden weitere Modifikationen des Prüfverfahrens untersucht. Diese betrafen neben der niedrigeren Sulfatkonzentration von 3 g/l auch den Wasserzementwert (w/z 0,60 anstatt 0,50), die Prüfkörpergeometrie (Zylinder anstatt Flachprismen), die Art und Dauer der Vorlagerung und die Zusammensetzung der Prüflösung (Mischung aus Calcium-, Natrium und Magnesiumsulfat anstatt nur Natriumsulfat). Am günstigsten erwies sich die Variante, bei der Mörtelzylinder mit einem w/z-Wert von 0,60 hergestellt und einen Tag in Form bei 20 °C sowie neun Tage bei 40 °C vorgelagert wurden; mit anschließender Prüfung über 180 Tage in Sulfatlösung (2 125 mg  $\text{CaSO}_4$ , 1 035 mg  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 1 000 mg  $\text{MgSO}_4$  pro Liter). Mit dieser Variante des modifizierten Prüfverfahrens wurden zum Ende des Vorhabens auch Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen, insbesondere puzzolan- und hütensandhaltige Zemente, hinsichtlich ihres Sulfatwiderstands geprüft.

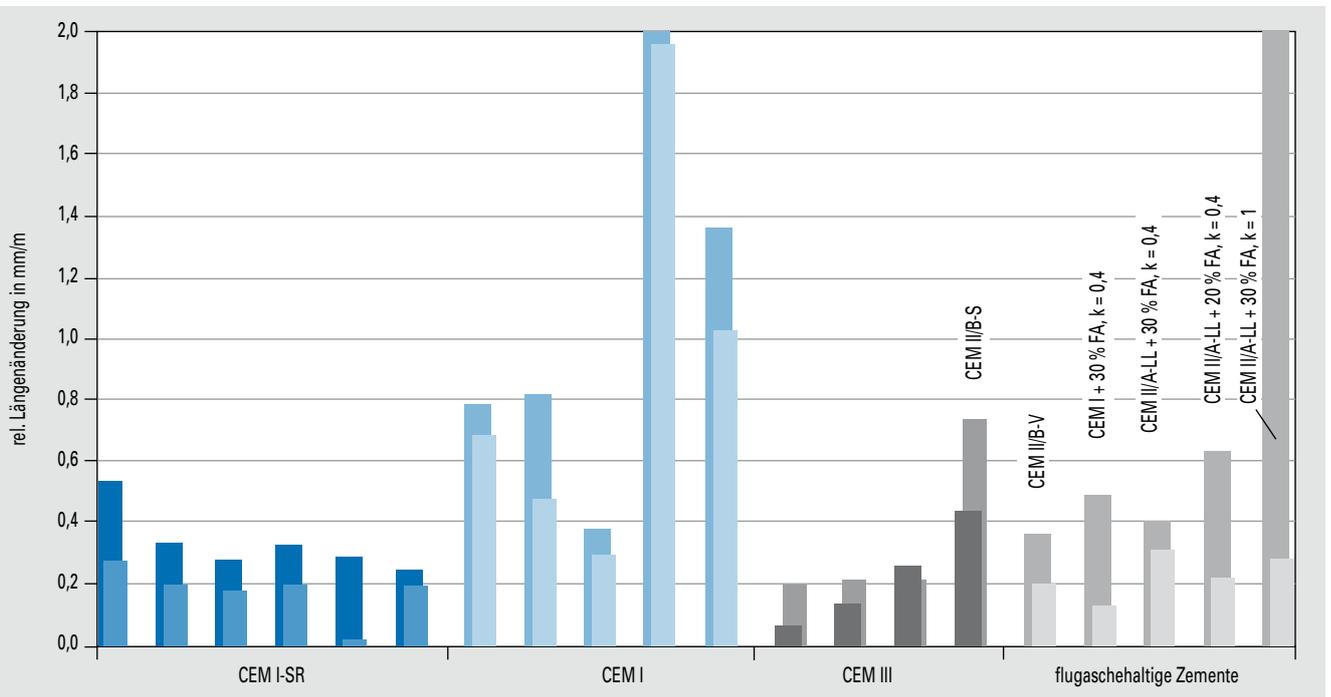
#### Ergebnisse

Wie bereits im VDZ-Tätigkeitsbericht 2012-2015 Kapitel 2.3.6 berichtet, war mit dem bisher üblichen SVA-Flachprismenverfahren keine gute Differenzierung zwischen Portlandzementen mit und ohne SR-Eigenschaft möglich. Auch SR-Zemente zeigten mehrheitlich höhere Längenänderungen als die in den Prüfkriterien festgelegten Werte. Untersuchungen der Mörtelgefüge ergaben, dass die relativ hohen Längenänderungen der CEM I-SR-Zemente primär auf die Bildung von sekundärem Gips zurückzuführen sind (**Bild 3.3.7-1**).

Die neue vom DIBt-Sachverständigenausschuss definierte SVA-Verfahrensvariante ermöglichte im Vergleich hierzu eine deutlich bessere Differenzierung zwischen Zementen mit und ohne SR-Eigenschaft. Allerdings ist hierfür eine Prüfdauer von mindestens etwa einem Jahr erforderlich.

**Tabelle 3.3.7-1** Übersicht der Verfahren zur Sulfatwiderstandsprüfung

	SVA-Verfahren	Alternatives SVA-Verfahren	Modifiziertes Prüfverfahren
Prüfkörper	Mörtelflachprismen 1 cm · 4 cm · 16 cm	Mörtelflachprismen 1 cm · 4 cm · 16 cm	Mörtelzylinder Ø 2 cm · 16 cm
w/z-Wert	0,50	0,60	0,60
Vorlagerung	14 d, 20 °C, 2 d in der Form, Rest in Calciumhydroxidlösung	28 d, 20 °C, 2 d in der Form, der Rest in Calciumhydroxidlösung	1 d bei 20 °C, davon die ersten 6 h rotierend, 9 d bei 40 °C, versiegelt
Sulfatlösung	29800 mg Sulfat (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	3 000 mg Sulfat (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	3000 mg Sulfat (2 125 mg CaSO <sub>4</sub> , 1035 mg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 1000 mg MgSO <sub>4</sub> )
Lagertemperatur	5 °C, 20 °C	5 °C, 20 °C	5 °C, 20 °C
Prüfdauer	182 d	≥ 365 d	182 d
Prüfungen	Längenänderung, dyn. E-Modul	Längenänderung, dyn. E-Modul	Längenänderung, dyn. E-Modul, Biegezugfestigkeit



**Bild 3.3.7-2** Relative Längenänderung der Mörtelprüfkörper nach 182 Tagen Lagerung in Sulfatlösung (bei 5 °C: dunkle Farben, bei 20 °C helle Farben)

Die beste Differenzierung zwischen Zementen mit und ohne SR-Eigenschaft konnte bei unveränderter Prüfdauer von 182 Tagen mit dem zuvor beschriebenen neuen modifizierten Prüfverfahren (unter Annahme eines Grenzwertes von 0,6 mm/m für die relative Längenänderung) erzielt werden (**Tabelle 3.3.7-1**). Somit zeigten CEM I-SR-Zemente quasi keine unerwartet hohen Längenänderungen und auch die bisherigen Versuche mit Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen lieferten der Praxis entsprechende Ergebnisse (**Bild 3.3.7-2**).

Die Ergebnisse sollen dem DIBt-Sachverständigenausschuss vorgestellt werden. Dieser könnte das modifizierte Prüfverfahren als Prüfverfahren für SR-Zulassungsuntersuchungen übernehmen. Auch soll das Prüfverfahren der europäischen Normungsgruppe CEN TC51/WG12/TG1 vorgestellt werden, die sich derzeit mit einem europäischen Prüfverfahren für SR-Zemente beschäftigt. Mittel- bis langfristig könnten die Ergebnisse des Forschungsprojekts somit zur Definition eines europäischen Prüfverfahrens für SR-Zemente beitragen.

## 3.4 Leistungsfähigkeit von Beton

### 3.4.1 AKR-Schädigungspotenzial von Betondecken auf Straßen, Busverkehrs- und Parkflächen im kommunalen Bereich ■

IGF-Vorhaben 18775 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektzeitraum: 07/2015 – 12/2017

#### Hintergrund und Ziele

Durch Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR) verursachte Schäden an Betonfahrbahndecken auf deutschen Bundesautobahnen führten zur Entwicklung von AKR-Performance-Prüfverfahren. Zur Vermeidung von Schäden auf Autobahnen und Bundesfernstraßen wurde das Allgemeine Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 04/2013 zur Alkaliempfindlichkeit mit entsprechenden Prüfverfahren veröffentlicht. In Abhängigkeit der aus den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO) abgeleiteten Bau- bzw. Belastungsklassen werden darin die Feuchtigkeitsklassen WA (Beton, der während der Nutzung häufig oder längere Zeit feucht ist und häufiger oder langzeitiger Alkalizufuhr von außen ausgesetzt ist) bzw. WS (Beton, der zusätzlich zu der Beanspruchung nach Klasse WA einer hohen dynamischen Beanspruchung ausgesetzt ist) zugewiesen (**Tabelle 3.4.1-1**). Die Eignung von Gesteinskörnungen bzw. Betonen für die Klasse WS kann durch eine WS-Grundprüfung oder eine AKR-Performance-Prüfung des Betons nachgewiesen werden.

Viele Verkehrsflächen im kommunalen Bereich werden den Belastungsklassen Bk1,8 bis Bk100 und damit in Analogie zu dem Rundschreiben der Feuchtigkeitsklasse WS zugeordnet. Hierzu zählen z. B. Bushaltestellen, Parkflächen und viele Straßentypen des innerstädtischen Bereichs. Die Einstufung WS wurde für Autobahnen (Alkalizufuhr von außen und hohe dynamische Beanspruchung) gewählt. Bei kommunalen Flächen dürfte infolge der geringeren Geschwindigkeit die dynamische Verkehrsbelastung nicht so hoch sein. Zudem werden oft weniger oder keine Taumittel, sondern abstumpfende Mittel eingesetzt, sodass die Alkalizufuhr und das Risiko einer schädigenden AKR geringer ausfallen dürften. Möglicherweise ist die Feuchtigkeitsklasse WA oder eine vergleichbare Zuordnung ausreichend. Für die Feuchtigkeitsklasse WA wären die Regelungen der Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) anzuwenden.

Bei vielen Anwendungen des kommunalen Straßenbaus handelt es sich im Vergleich zum Autobahnbau um kleinere Baulose, für die sich der Aufbau einer eigenen Baustellenmischanlage nicht lohnt. Der Beton wird daher i.d.R. von Transportbetonwerken geliefert. Die Praxis nach Einführung des ARS hat gezeigt, dass insbesondere bei kleineren Bauvorhaben Probleme auftreten, da nunmehr infolge der Belastungsklassen die Feuchtigkeitsklasse WS gefordert wird. Da in vielen Regionen weder WS-Grundprüfungen noch Performance-Prüfungen vorliegen, ist die Anwendung der Betonbauweise im innerstädtischen Bereich vielfach nicht möglich. Transportbeton mit den notwendigen Nachweisen ist nicht lieferbar. Ziel des Forschungsvorhabens war es, für den Bereich kommunaler Verkehrsflächen grundlegende Erkenntnisse zur praxisgerechten Zuordnung der Feuchtigkeitsklasse und zur entsprechenden Bewertung des Betons z. B. durch Performance-Prüfungen zu liefern.

**Tabelle 3.4.1-1** Beurteilung der Feuchtigkeitsklassen von Bundesfernstraßen und Vorschlag für Flächen im kommunalen Bereich

RStO 01 Bemes- sungs- relevante Beanspru- chung B <sup>1)</sup>	RStO 12 Dimensio- nierungs- relevante Beanspru- chung B <sup>1)</sup>	RStO 01 Bau- klasse	RStO 12 Belastungs- klasse	Feuchtigkeits- klasse	
				Fern- straßen nach ARS (gemäß ARS)	kom- munaler Bereich (Vor- schlag VDZ)
> 32		SV	Bk100		WS
10 bis 32		I	BK32		
3 bis 10	3,2 bis 10	II	BK10	WS	
0,8 bis 3	1,8 bis 3,2	III	Bk3,2		WA Erwei- terung bis Bk10
	1,0 bis 1,8		Bk1,8		
0,3 bis 0,8	0,3 bis 1,0	IV	Bk1,0		
0,1 bis 0,3	< 0,3	V	Bk0,3	WA	
bis 0,1		VI			

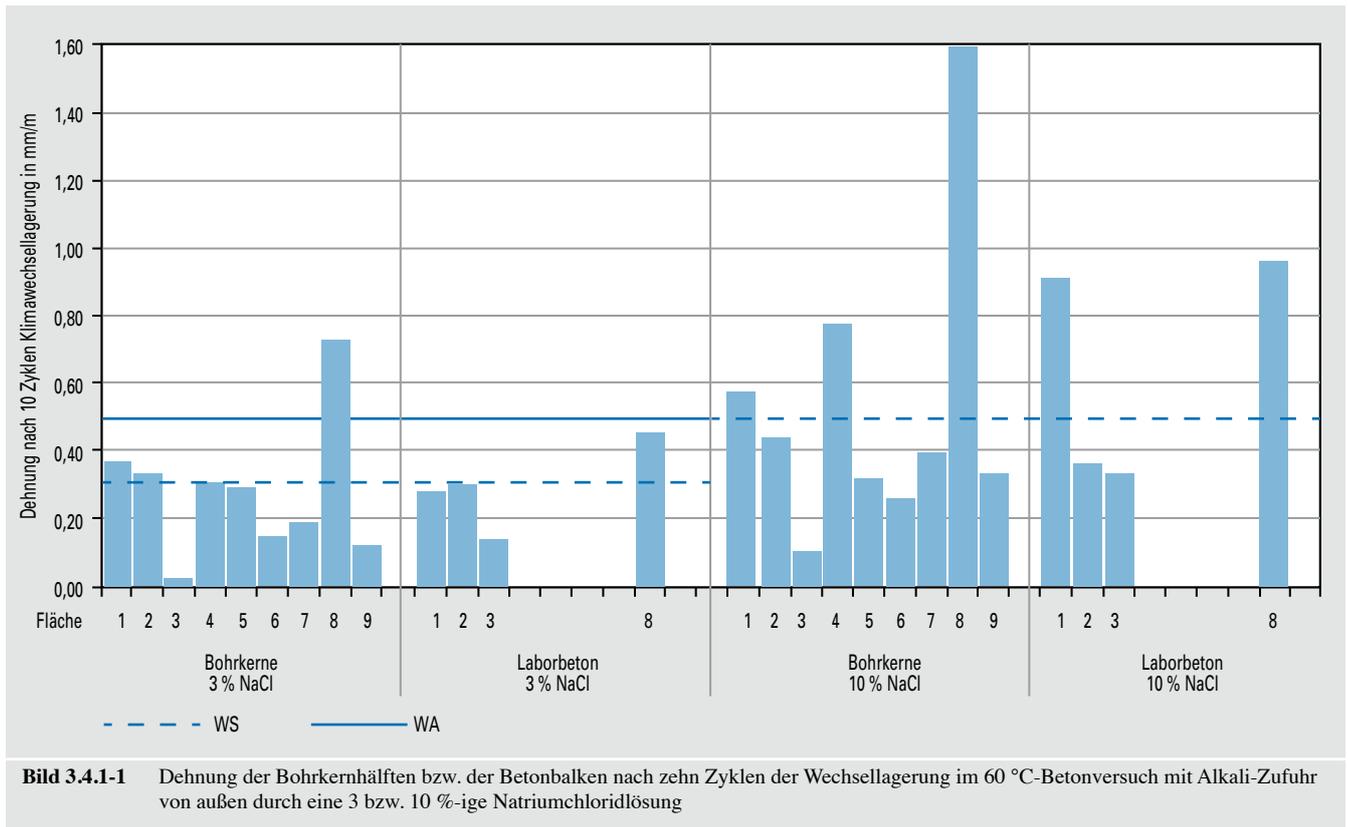
<sup>1)</sup> Äquivalente 10-t-Achsstübergänge in Mio.

#### Vorgehensweise

Das Forschungsvorhaben wurde in drei Arbeitspaketen bearbeitet. Zunächst wurden Betonflächen im kommunalen Bereich oder vergleichbarer Anwendung mit guten Praxiserfahrungen ausgewählt. Voraussetzung war eine mindestens 10-jährige Liegezeit ohne Anzeichen einer schädigenden AKR. Die Strecken wurden visuell auf AKR-spezifische Schadensmerkmale begutachtet und – wenn vorhanden – folgende Daten erhoben: Ausgangsstoffe (Zementart, Alkaligehalt, Gesteinskörnungen), Betonzusammensetzung und sonstige Randbedingungen (Baujahr, Oberbau, Taumittelsatz). Um das Verhalten der Betone in Laborprüfungen festzustellen, wurden in einem zweiten Schritt Bohrkerne aus den Fahrbahndecken entnommen und mit den vom VDZ für die Feuchtigkeitsklassen WA bzw. WS entwickelten Prüfverfahren untersucht. Außerdem wurden Chloridprofile ausgewählter Betondecken bestimmt und mit den Ergebnissen von Autobahnen verglichen. Schließlich wurden ausgewählte Betone im Labor nachgestellt und eine WS- bzw. WA-Performance-Prüfung unter Verwendung der Informationen der damaligen Erstprüfung sowie eine Nebelkammerprüfung der Gesteinskörnungen (Splitt und Kies) nach Alkali-Richtlinie durchgeführt.

#### Versuchsergebnisse

Im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen zeigten mit einer Ausnahme alle Bohrkerne Dehnungen unterhalb des Bewertungskriteriums für die Feuchtigkeitsklasse WA (**Bild 3.4.1-1** linker Teil). In einem Fall (Fläche Nr. 8) traten Dehnungen über dem Bewertungskriterium auf. Die Fläche ist nach Angaben des Probenbereitstellers im Alter von zehn Jahren ungeschädigt. Der Beton würde aufgrund der Nebelkammerprüfung der Gesteinskörnung voraussichtlich nicht der Alkali-Richtlinie in der Feuchtigkeitsklasse WA entsprechen. Bei der Fläche Nr. 3 aus dem Seitenstreifen einer Bundesautobahn wäre der Splitt ebenfalls E III-S zuzuordnen und dürfte nach Alkali-Richtlinie bei einem Zementgehalt > 350 kg/m<sup>3</sup> nicht in der Feuchtigkeitsklasse WA verwendet werden. Bei einem Zementgehalt bis 350 kg/m<sup>3</sup> könnte die Gesteinskörnung mit NA-Zement verwendet werden. Der Beton der untersuchten Fläche 3 lag bei 350 kg/m<sup>3</sup> und der verwendete Zement hatte NA-Eigenschaft.



**Bild 3.4.1-1** Dehnung der Bohrkernhälften bzw. der Betonbalken nach zehn Zyklen der Wechsellagerung im 60 °C-Betonversuch mit Alkali-Zufuhr von außen durch eine 3 bzw. 10 %-ige Natriumchloridlösung

Die vier Laborbetone zeigten durchgängig Dehnungen unterhalb des Bewertungskriteriums für die Feuchtigkeitsklasse WA. Fünf von neun Bohrkernen erfüllten ebenfalls die Bewertungskriterien für die Feuchtigkeitsklasse WS. Dies galt auch für zwei Laborbetone.

In den untersuchten Fällen erscheint die Anwendung der Regeln der Alkali-Richtlinie für die Feuchtigkeitsklasse WA für Fahrbahndecken angemessen. Es wird vorgeschlagen, dass sich bei Betonfahrbahndecken im kommunalen Bereich bis einschließlich der Belastungsklasse Bk10 die AKR-vorbeugenden Maßnahmen zukünftig an der Feuchtigkeitsklasse WA orientieren (**Tabelle 3.4.1-1**, rechte Spalte). Die Betonzusammensetzungen und die Ausgangsstoffe müssen den Anforderungen der Alkali-Richtlinie entsprechen. Die Anforderungen an Zemente nach TL Beton-StB (Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton) blieben unabhängig von der Feuchtigkeitsklasse bestehen, wenn die Ausschreibung Bezug auf die TL Beton-StB nimmt. Bei Einstufung in die Feuchtigkeitsklasse WA können in bestimmten Fällen für den Zement zusätzlich die Anforderungen der DIN 1164-10 (NA-Zement) gelten. Performance-Prüfungen wären dann in den in der Alkali-Richtlinie definierten Fällen oder in Zweifelsfällen durchzuführen.

### 3.4.2 Verhalten verschiedener Gesteine unter beschleunigenden Bedingungen in AKR-Prüfverfahren

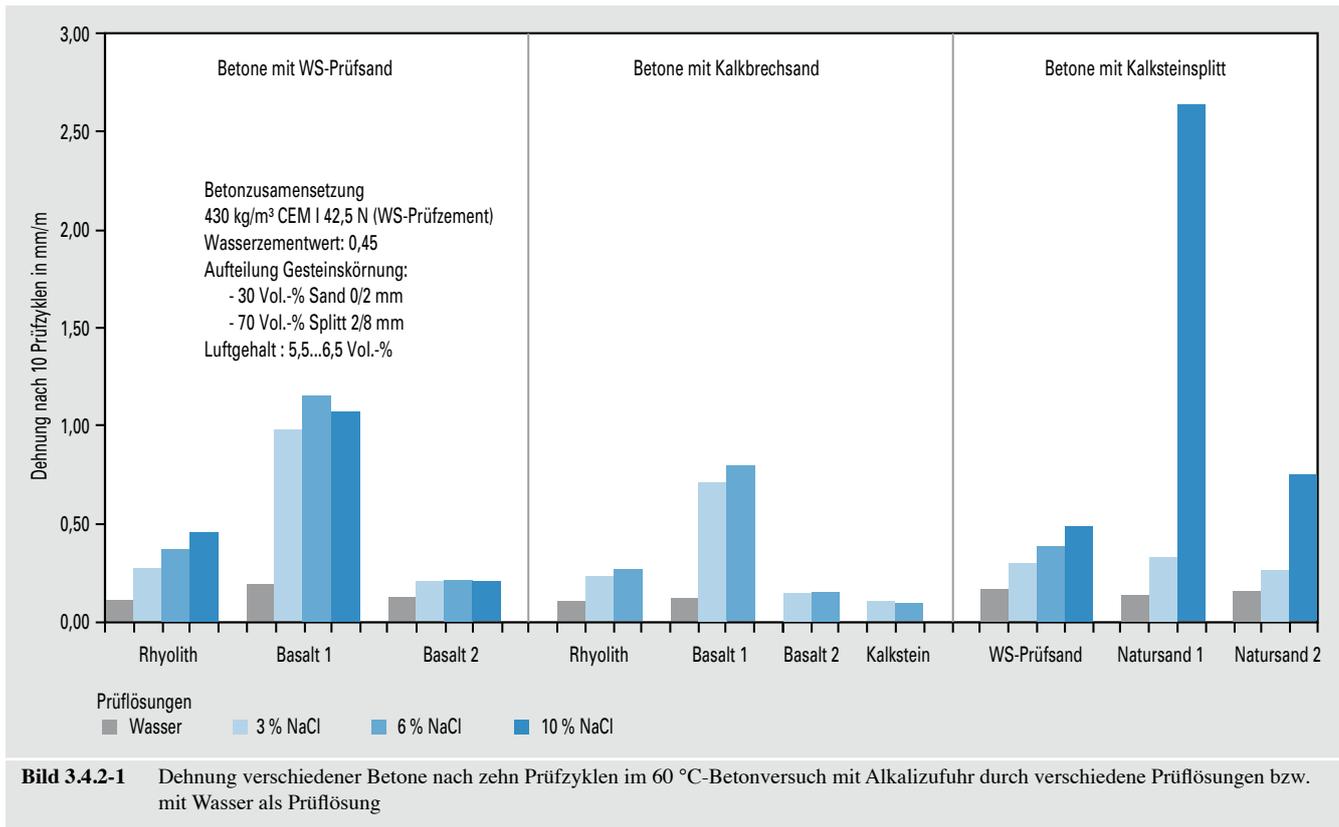
IGF-Vorhaben 19077 BG, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
 Projektpartner: TU München (Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm)), Bauhaus-Universität Weimar (F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde (FIB))  
 Projektzeitraum: 03/2016 – 02/2019

#### Hintergrund und Ziele

Mit dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 04/2013 wurde durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung ein Maßnahmenpaket eingeführt, das u. a. Prüfverfahren zur Vermeidung von Schäden infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) in neu gebauten Fahrbahndecken aus Beton für Bundesfernstraßen (Feuchtigkeitsklasse WS) vorsieht. Das im ARS Nr. 04/2013 beschriebene Prüfverfahren (AKR-Performance-Prüfung bzw. WS-Grundprüfung) hat sich für Regionen mit bekanntermaßen reaktiven Gesteinskörnungen und hoher Schadenshäufigkeit in der Praxis bewährt. Mit Einführung des ARS Nr. 04/2013 ist dieses Vorgehen nun auch in Regionen anzuwenden, in denen bislang scheinbar kaum eine AKR-Problematik bekannt ist. Es existieren dabei Anhaltspunkte dafür, dass die Prüfungen nicht in allen Fällen zu Ergebnissen führen, die mit den derzeit bekannten praktischen Erfahrungen übereinstimmen. Vor diesem Hintergrund soll das IGF-Vorhaben 19077 BG grundlegende Erkenntnisse über das Verhalten verschiedener Gesteine unter den beschleunigenden Bedingungen der AKR-Prüfverfahren hervorbringen. Die Forschungsergebnisse sollen dazu beitragen, Gesteinskörnungen zur Verwendung in Betonen der Feuchtigkeitsklasse WS gleichermaßen sicher wie praxisgerecht zu beurteilen. Es soll sichergestellt werden, dass das erreichte Sicherheitsniveau nicht verlassen wird, ohne dabei jedoch brauchbare, lokal verfügbare Gesteinskörnungen bzw. Betone auszuschließen.

#### Vorgehensweise

Für die Untersuchungen wurden sieben Splitte und vier Sande ausgewählt, die sich hinsichtlich ihrer Reaktivität unterscheiden und in vorangegangenen Prüfungen teilweise ein auffälliges Verhalten gezeigt hatten. Nach einer grundlegenden chemisch-mineralogischen Charakterisierung der Gesteinskörnungen wurden durch unterschiedliche Kombinationen der Splitte und Sande insgesamt zwölf Betonzusammensetzungen erstellt, deren Verhalten im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr (Forschungsstellen



**Bild 3.4.2-1** Dehnung verschiedener Betone nach zehn Prüfzyklen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch verschiedene Prüflösungen bzw. mit Wasser als Prüflösung

VDZ und cbm) und teilweise in der Klimawechsellaagerung (Forschungsstelle FIB) untersucht wird. Die Zusammensetzung der Betone wurde in Anlehnung an die Vorgaben des ARS Nr. 04/2013 für Oberbeton in WS-Grundprüfungen gewählt. Der gemäß ARS Nr. 04/2013 zu verwendende WS-Prüfsand wurde in einigen Betonzusammensetzungen gegen einen als inert einzustufenden Kalksteinbrechsand bzw. gegen zwei unterschiedlich reaktive Natursande ersetzt. Durch diese Kombinationen von Gesteinskörnungen wird der Einfluss der Sande auf das Prüfergebn untersucht. Durch die gezielte Variation der Konzentration der Lagerungslösung im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen werden die Einflüsse der beschleunigenden Prüfbedingungen festgestellt. Neben den üblicherweise verwendeten Prüflösungen mit 3 % NaCl und 10 % NaCl wird eine NaCl-Dosierung von 6 % verwendet. Des Weiteren wird eine Lagerung in Wasser ohne NaCl-Dosierung durchgeführt.

Nach Abschluss der Betonversuche werden alle Versuchschargen mittels Polarisationsmikroskopie an Dünnschliffen auf evtl. aufgetretene Gefügeveränderungen untersucht und dahingehend petrografisch und mikroanalytisch charakterisiert. Mittels REM/EDX (Rasterelektronenmikroskop/Energiedispersive Röntgenspektroskopie) wird an ausgewählten Proben die chemische Zusammensetzung der ggf. gebildeten AKR-Reaktionsprodukte ermittelt.

Das Löseverhalten der einzelnen Gesteinskörnungen wird in künstlichen Porenlösungen untersucht. Die Lagerungslösungen bestehen aus einer künstlichen Porenlösung ( $\text{KOH} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ ), die in Anlehnung an die Betonversuche teilweise zusätzlich mit 3 % und 10 % NaCl aufdotiert wird. Nach einer Lagerungszeit von 28, 91, 180 und 365 Tagen wird die Lagerungslösung entnommen und analysiert. Ziel der Löseversuche ist es, die Einflüsse beschleunigender Prüfbedingungen (Temperatur, Lösungskonzentrationen) auf die jeweilige Gesteinskörnung unabhängig vom Betongefüge zu untersuchen.

### Stand der Arbeiten

Die bisher vorliegenden Ergebnisse der 60 °C-Betonversuche mit Alkalizufuhr bzw. mit Wasser als Prüflösung zeigen erwartungsgemäß in nahezu allen Fällen eine umso höhere Dehnung, je höher die NaCl-Dosierung der Prüflösung ist (**Bild 3.4.2-1**). Eine Ausnahme von diesem Verhalten zeigt der Beton mit WS-Prüfsand und Basalt 1, bei dem die Dehnung bei Alkalizufuhr durch eine 6 %ige NaCl-Lösung geringfügig höher ist als bei Alkalizufuhr durch eine 10 %ige NaCl-Lösung.

Die Dehnungen der Betone mit dem als inert anzusehenden Kalksteinbrechsand sind durchgehend geringer als die der entsprechenden Betone mit WS-Prüfsand. Die Betone mit unterschiedlichen Sanden in Kombination mit dem als inert einzustufenden Kalksteinsplitt zeigen teilweise hohe Dehnungen, insbesondere bei einer Alkalizufuhr durch eine 10 %ige NaCl-Lösung. Aus diesen Zwischenergebnissen lässt sich ableiten, dass der Sand die Dehnung des Betons, die als Beurteilungskriterium für den AKR-Widerstand herangezogen wird, signifikant beeinflussen kann.

Im weiteren Projektverlauf werden Dünnschliffe aus den Betonprobekörpern mittels Durchlichtmikroskopie auf Gefügeveränderungen und eventuelle Rissbildung untersucht. Die mikroskopischen Untersuchungen dürften zusammen mit den Löseversuchen (beides bei Redaktionsschluss noch nicht beendet) zu einem verbesserten Verständnis der Reaktionsmechanismen unter beschleunigenden Prüfbedingungen beitragen.

### 3.4.3 Carbon Concrete Composite – C<sup>3</sup> ■

C<sup>3</sup> - Carbon Concrete Composite ist derzeit Deutschlands größtes Bauforschungsprojekt. Bereits während der Projektlaufzeit erhielt C<sup>3</sup> im Jahr 2015 den Deutschen Nachhaltigkeitspreis in der Kategorie Forschung sowie im Jahr 2016 den Zukunftspreis des Bundespräsidenten. In dem ambitionierten Projekt arbeiten über 130 Partner aus Wissenschaft, Verbänden und Industrie an der Erforschung und Etablierung des neuen Baustoffes Carbonbeton. Der VDZ ist Partner in drei Teilprojekten. Das Forschungsvorhaben C<sup>3</sup>-Carbon Concrete Composite wird im Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung „Zwanzig20-Partnerschaft für Innovation“ gefördert.

#### 3.4.3.1 Teilprojekt 1: Nachweis- und Prüfkonzepete für Normen und Zulassungen

Projektpartner: Technische Universität Dresden: Institut für Massivbau (Verbundkoordinator)<sup>1)</sup>  
Projektzeitraum: 12/2015 – 03/2018

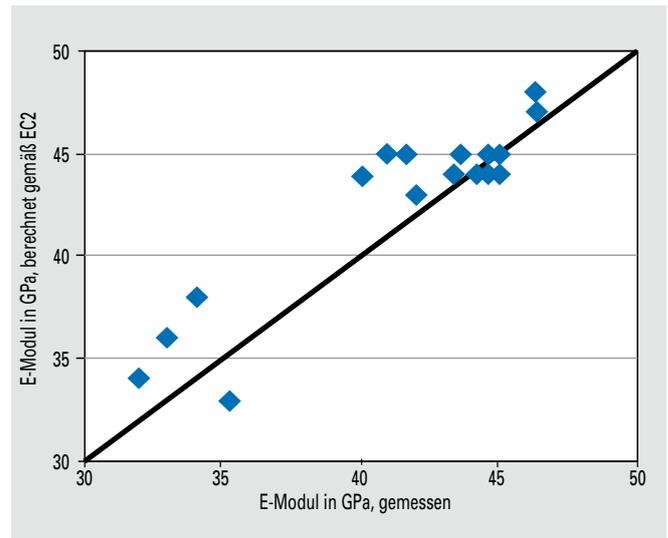
##### Hintergrund und Ziele

Eines der Projektziele ist die Beseitigung von Markthemmnissen durch eine eindeutige Regelwerksetzung. Gemeinsam mit dem Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), dem Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein, namhaften Universitäten und weiteren Partnern aus der Industrie ist der VDZ angetreten, um Grundlagen für Regelwerke zu schaffen. Diese zielen auf die Verwendung von Carbonbeton sowohl für Verstärkungsmaßnahmen als auch für Neubauteile. Regelwerke, die im Nachgang des Forschungsvorhabens erstellt werden können, sollen es ermöglichen, Carbonbeton in der Praxis zu etablieren.

##### Vorgehensweise

Die Erarbeitung von Regelwerksgrundlagen erfolgte in den Bereichen „Bemessung“, „Carbonbewehrung“, „Betonmatrix“ und „Bauausführung“. Der VDZ koordiniert die Arbeitsgruppe „Betonmatrix“. Ausgangspunkt der Arbeiten war ein Vergleich bestehender Erkenntnisse zu Betonen, die in Kombination mit Carbonbewehrung verwendet werden können, mit vorhandenen nationalen und europäischen Regelwerken. Insbesondere sind hier die EN 206-1, die DIN 1045-2 sowie die DAfStb-Richtlinien „Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung“ und „Herstellung und Verwendung von Trockenbeton und Trockenmörtel“ zu nennen.

Carbonbewehrung wird vor allem in Form von Gelegen eingesetzt, die im Vergleich zu Stahlmatten z. T. deutlich geringere Maschenweiten aufweisen (z. B. 38 mm). Daraus resultiert die Verwendung von Gesteinskörnungssieblinien mit einem Größtkorn von maximal rd. 13 mm. In der Forschung kommen bisher Referenzbetone mit einem Größtkorn von 8 mm für Normalbetone sowie 5 mm bzw. 2 mm für hochfeste Betone zum Einsatz. Aus dem geringen Größtkorn resultiert eine geringe Packungsdichte der Gesteinskörnung und damit verbunden ein hoher Leimbedarf sowie ein Mehlkorngehalt, der über dem derzeit genormten, höchstzulässigen Gehalt liegt. Der Mehlkorngehalt des Betons beeinflusst verschiedene Frisch- und Festbetoneigenschaften, wie beispielsweise die Verarbeitbarkeit, das Schwinden und Kriechen, den Elastizitätsmodul oder den Frostwiderstand.



**Bild 3.4.3.1-1** Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem E-Modul (EC2)

Es war daher zu prüfen, ob für Betone mit von der Norm abweichender Zusammensetzung dennoch die bisher verwendeten Zusammenhänge zwischen verschiedenen Festbetoneigenschaften gelten. So wurde in der Bemessung aus der Betondruckfestigkeit sowohl auf den E-Modul als auch auf die Zugfestigkeit des Betons geschlossen. Gemäß Eurocode 2 („EC2“), Tabelle 3.1, gelten die folgenden Zusammenhänge:

Formel 1 (E-Modul)

$$E_{cm} = 22 \cdot (f_{cm}/10)^{0,3}$$

Formel 2 (mittlere Zugfestigkeit gemäß Heilmann)

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} (\leq C50/60)$$

Formel 3 (mittlere Zugfestigkeit gemäß Rammel)

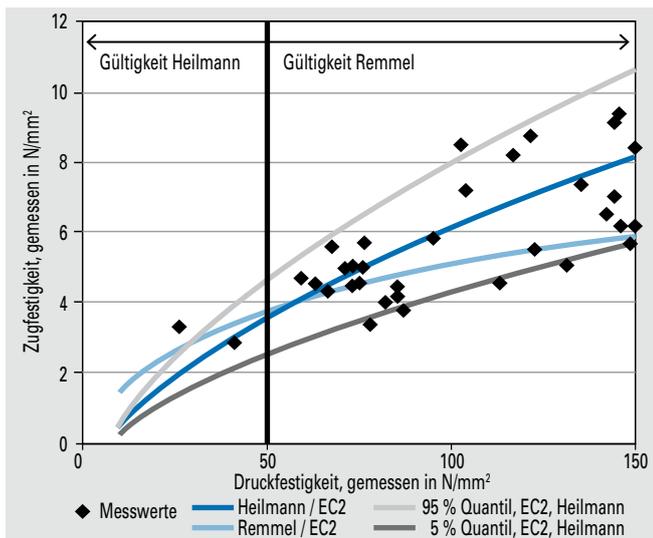
$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln [1 + (f_{cm}/10)] (> C50/60)$$

Ein Vergleich gemessener und gemäß Formel 1 berechneter E-Moduln ist in **Bild 3.4.3.1-1** dargestellt. Die berechneten E-Moduln werden durch den Zusammenhang in Formel 1 in der richtigen Größenordnung abgebildet, liegen jedoch um bis zu 10 % höher als die gemessenen Werte. Gemeinsam mit der Arbeitsgruppe „Bemessung“ wird diskutiert, ob diese Abweichung in der Bemessung toleriert werden kann oder eine Anpassung von Formel 1, beispielsweise durch eine lineare Verschiebung, vorzunehmen ist.

Für den Zusammenhang zwischen Druck- und Zugfestigkeit werden im Eurocode 2 zwei Formeln angegeben, die in unterschiedlichen Festigkeitsbereichen gültig sind. Der Zusammenhang zwischen gemessener Druck- bzw. Zugfestigkeit ist zusammen mit den berechneten Werten in **Bild 3.4.3.1-2** dargestellt. Es fällt auf, dass auch bei höheren Druckfestigkeiten Formel 2 die Messwerte besser abbildet als Formel 3. Für genauere Aussagen muss zunächst die Datenbasis erweitert werden. Nahezu alle derzeit verfügbaren Werte liegen innerhalb eines 5 %-Quantils der Formel 2. In Zusammenarbeit der Arbeitsgruppen „Betonmatrix“ und „Bemessung“ wird diskutiert, ggf. für alle Festigkeitsbereiche der Betone für die Verwendung in Carbonbeton Formel 2 für den Zusammenhang zwischen Druck- und Zugfestigkeit anzusetzen.

Um den Einfluss erhöhter Mehlkorngehalte auf das Schwinden und Kriechen zu untersuchen, wurden Schwinden und Kriechen

<sup>1)</sup> Eine Liste aller Projektpartner ist abrufbar unter: <https://vdz.info/tw4x1>



**Bild 3.4.3.1-2** Zusammenhang zwischen Druck- und Zugfestigkeit

gemäß Eurocode 2 modelliert und mit Messwerten der Feinkornbetone verglichen. Sowohl das Schwinden als auch das Kriechen werden durch die Modelle in der richtigen Größenordnung abgebildet. Bei hochfesten Feinkornbetonen mit einem Größtkorn von 2 mm ist das gemessene Schwinden um rd. 0,15 mm/m höher als das berechnete Schwinden.

### Ergebnisse

Nach derzeitigem Kenntnisstand weichen die Betone, die in Carbonbeton verwendet werden, in der Gesteinskörnungssieblinie und dem Mehlkorngelalt von heute weit verbreiteten Betonen ab. Die daraus resultierenden Veränderungen der Festbetoneigenschaften können mit bekannten Modellen in der richtigen Größenordnung abgebildet werden. Um die projektierten Frisch- und Festbetoneigenschaften der Carbonbetone zielsicher auch unter Praxisbedingungen zu erreichen, werden Betone mit relativ hohen Leimgehalten (Stoffraum Zement + Zusatzstoffe + Feinanteil der Gesteinskörnung + Wasser) verwendet. Zur Sicherstellung der Robustheit der Betoneigenschaften unter Praxisbedingungen wird in Regelwerk ggf. ein Mindestleimgehalt festzuschreiben sein.

### 3.4.3.2 Teilprojekt 2: Beschleunigung von Regelwerksetzung und Genehmigungsverfahren im Hinblick auf eine versuchsgestützte Bemessung und Performanceprüfungen für C<sup>3</sup>-Produkte (CarbonSpeed)

Projektpartner: Technische Universität Dresden, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V  
Projektzeitraum: 07/2017 – 06/2018

#### Hintergrund und Ziele

Die Markteinführung neuer Technologien im Bauwesen benötigt in der Regel mehrere Jahre, da neben der Entwicklungsarbeit und den Nachweisen der Leistungsfähigkeit auch baurechtliche Rahmenbedingungen zu beachten sind.

In dem C<sup>3</sup>-Vorhaben CarbonSpeed soll eine Leitlinie entwickelt werden, die sich zwischen bereits vorhandenen bauaufsichtlichen Nachweislinien einfügt (Zustimmungen im Einzelfall, allgemeine bauaufsichtliche Zulassung), wodurch sich die Zeitspanne bis zur Einführung von Lösungen mit Carbonbeton verkürzen lässt.

### Vorgehensweise und Stand der Arbeiten

In europäischen Normungsgremien, die sich mit der Fortschreibung der Eurocodes bzw. der Normen in der Betontechnik befassen, werden leistungsorientierte Ansätze für die Bewertung von Produktneuentwicklungen diskutiert. Ähnliche Ansätze gibt es bei der Bauaufsicht (Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt) und bei der European Organisation for Technical Assessment (EOTA). Innerhalb des Projekts sollten diese Ansätze auf Carbonbeton übertragen und gemeinsam mit Entscheidungsträgern der Bauaufsicht hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit beraten werden.

Die Auswertungen im Zuge des im Abschnitt 3.4.3.1 dargestellten Teilprojektes zeigten, dass die im Rahmen von C<sup>3</sup> untersuchten bzw. verwendeten Betone fallweise in folgenden Aspekten von den derzeit gültigen Normen DIN EN 206-1/DIN 1045-2 abweichen:

- Verwendung der bisher nicht geregelten Zementart CEM II/C-M (S-LL)
- Erhöhter Mehlkorngelalt
- Größtkorn der Gesteinskörnung zwischen 2 und maximal 8 mm
- Teilweise für die betrachtete Expositionsklasse zu geringer Mindestzementgehalt bzw. erhöhter Wasserzementwert

Demgegenüber stehen die in der bisherigen Zulassungspraxis des DIBt definierten Fälle:

- I Bindemittel für Beton nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2
- II Betonzusatzstoff zur Verwendung nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.3
- III Beton zur Verwendung wie Beton nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2

Soll in Carbonbeton der oben erwähnte CEM II/C-M (S-LL) verwendet werden, wäre eine Zulassung gemäß I notwendig. Dies ist unabhängig von der Verwendung in Carbonbeton.

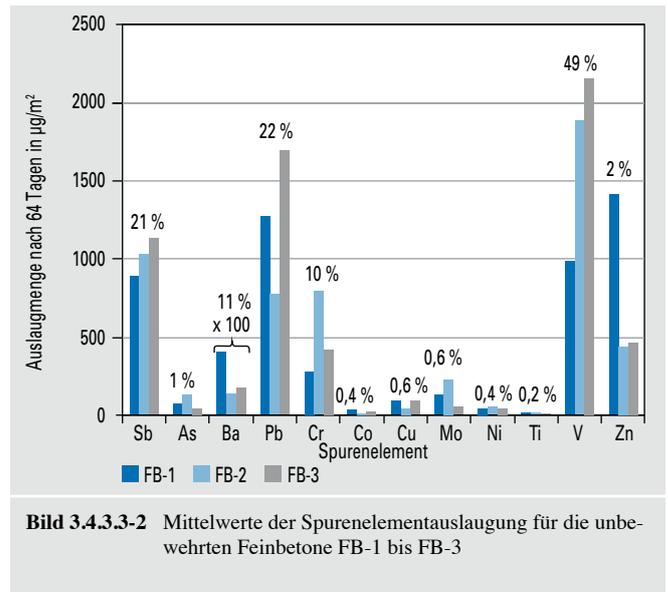
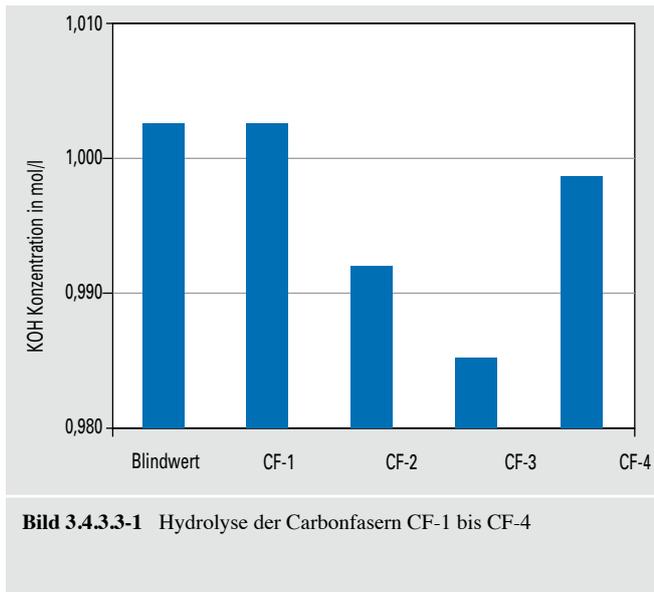
Ein Abweichen von Mindestzementgehalt bzw. maximalem Wasserzementwert (Abweichung Norm-Tabelle F.2.2) bedürfte einer Zulassung gemäß III.

In einem Interview mit dem DIBt wurde die Frage diskutiert, welche Nachweise notwendig wären, wenn die einzigen Abweichungen im Mehlkorngelalt bzw. im Größtkorn bestünden. Wenn mit geringem Größtkorn (z.B. 2 mm) gearbeitet werden muss, resultiert aus den geforderten Verarbeitungseigenschaften, dass der Mehlkorngelalt zu erhöhen ist. Der Mehlkorngelalt beeinflusst im Wesentlichen Eigenschaften wie E-Modul, Schwinden und Kriechen, Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand sowie ggf. Abriebwiderstand (XM). Wenn im Rahmen von C<sup>3</sup> Nachweise erbracht werden, dass diese Eigenschaften nicht verschlechtert werden, wären gesonderte Zulassungen dann wohl nicht erforderlich. Das Thema ist nach Vorlage einer ausreichenden Datenbasis in den Gremien des DIBt abschließend zu diskutieren.

### 3.4.3.3 Teilprojekt 3: Charakterisierungs- und Auslaugversuche zur Bestimmung der Umweltverträglichkeit von C<sup>3</sup> - Carbon Concrete Composite ■

Projektpartner: RWTH Aachen, Institut für Bauforschung; Hentschke Bau GmbH

Projektzeitraum: 03/2017 – 02/2019



## Hintergrund und Ziele

Neben den bautechnischen Eigenschaften kommt der Umweltverträglichkeit von Bauprodukten eine immer größere Bedeutung zu. In Deutschland wird derzeit davon ausgegangen, dass genormte oder bauaufsichtlich zugelassene Bauprodukte alle Anforderungen an die Umweltverträglichkeit erfüllen. Für neue, unbekannte Produkte ist die Unbedenklichkeit gegebenenfalls entsprechend den „Grundsätzen zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) nachzuweisen (vgl. Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen Ausgabe 2017/1; Anhang 10 „Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Gewässer (ABuG): 2017-07“).

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, durch entsprechende Auslaug- und Beregnungsversuche (Labor und Freiland) an Carbonbetonprüfkörpern eine breite, wissenschaftlich abgesicherte Datenbasis zu erstellen, um die Umweltverträglichkeit des neuen Verbundbaustoffs Carbonbeton zu beurteilen. Auf dieser Basis können Carbonbetone gegebenenfalls so eingestuft werden, dass weitere Umweltprüfungen nicht mehr erforderlich sind.

## Vorgehensweise

Die für die Herstellung von Carbonbeton eingesetzten Carbonfasern werden durch ein Tränkungsmittel auf Polymerbasis miteinander verklebt. Da das Tränkungsmittel niedermolekulare organische Bestandteile enthalten kann oder diese in geringem Umfang im hochalkalischen Milieu des Betons aus dem Tränkungsmittel abgespalten werden können (Hydrolyse), wurde die mögliche Auslaugung dieser Substanzen aus Carbonbetonen untersucht. Dazu wurden der europäische Langzeitstandtest (DSLST) gemäß CEN/TS 16637-2 für den ständigen Wasserkontakt sowie Labor- und Freilandberegnungsversuche für intermittierende Beaufschlagungen durchgeführt. Da die Stoffkonzentration im Porenwasser die Diffusionsgeschwindigkeit und damit auch die Auslaugung beeinflusst, wurde neben der Freisetzung organischer Substanzen auch die Spurenelementfreisetzung untersucht.

Dabei wurde davon ausgegangen, dass auch das Auslaugverhalten der Spurenelemente durch die eventuell vorhandenen bzw. gebildeten niedermolekularen organischen Verbindungen beeinflusst werden kann. Neben einer schnelleren Diffusion entlang der Bewehrung ist auch eine Komplexierung der Spurenelemente

durch die niedermolekularen organischen Verbindungen und eine damit einhergehende bessere Löslichkeit der Spurenelemente im Porenwasser des Zementsteins denkbar.

## Ergebnisse/Stand der Arbeiten

Die Charakterisierungsuntersuchungen an Carbonfasern, Fertigmischungen, Zementen, zementären Bindemitteln und Füllern zur Festlegung der Carbonfaser und des Feinbetons für die weitergehenden Untersuchungen sind abgeschlossen. Dazu wurden vier Carbonfasern infrarotspektroskopisch und rasterelektronenmikroskopisch untersucht. Außerdem wurde der Spurenelementgehalt der Fasern sowie deren TOC-Abgabe (Total Organic Carbon) und Hydrolysebeständigkeit ermittelt. Für insgesamt sieben Fertigmischungen, Zemente/Bindemittel und Füller wurde der Spurenelementgehalt analysiert. Auf dieser Basis wurden drei Feinbetonmischungen festgelegt und die Prüfkörper (Feinbetonplatten 150 mm · 150 mm · 20 mm) für die DSLT-Auslaugung hergestellt und eluiert.

Die Untersuchung der Carbonfasern hat gezeigt, dass die Faser CF-3 die höchste TOC-Abgabe und die geringste Hydrolysebeständigkeit (**Bild 3.4.3.3-1**) aufweist. Daher haben die Projektpartner festgelegt, dass diese Faser für die weiteren Auslaug- und Beregnungsversuche mit den carbonfaserbewehrten Feinbetonprüfkörpern eingesetzt wird. Die DSLT-Auslaugung der drei unbewehrten Feinbetone hat gezeigt, dass diese ein sehr ähnliches Auslaugverhalten aufweisen. In **Bild 3.4.3.3-2** sind die 64-Tage-Mittelwerte der Dreifachbestimmung der Spurenelementauslaugung der Feinbetone FB-1 bis FB-3 dargestellt. Cadmium und Quecksilber sind in diesem Bild nicht aufgeführt, da alle Messwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen. Über den Balken sind jeweils die Prozentsätze für die maximal freigesetzten Mengen angegeben, wenn man sie in Relation zu den zulässigen DIBt-Grenzwerten setzt (vgl. ABuG: 2017-07 – Anhang A; Tabelle A-6 bzw. A-8). Aus dem Bild geht hervor, dass für die meisten Elemente nur bis etwa 10 % der zulässigen Auslaugmengen erreicht werden. Lediglich die Elemente Antimon, Blei und Vanadium zeigen höhere Freisetzungsmengen, die für Vanadium rd. 50 % des Grenzwerts erreicht. Aufgrund der hohen, gut messbaren und gleichmäßigen Bariumfreisetzung haben die Projektpartner festgelegt, dass der Feinbeton FB-1 für die weiteren Auslaug- und Beregnungsversuche mit den carbonfaserbewehrten Feinbetonprüfkörpern eingesetzt wird.

### 3.4.4 Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit hüttensand- und flugaschereichen Zementen ■

IGF-Vorhaben 18228 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
 Projektpartner: FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.  
 Projektzeitraum: 07/2014 – 12/2016

#### Hintergrund und Ziele

Das Forschungsprojekt baut auf den Erkenntnissen des IGF-Vorhabens 16148 N auf. Dort wurden Möglichkeiten und Grenzen der Leistungsfähigkeit von Zementen sowohl mit genormten wie auch mit nicht genormten Zusammensetzungen aus Portlandzementklinker, Hüttensand und Steinkohlenflugasche ermittelt. Dies geschah vor allem im Hinblick auf die Normeigenschaften der Zemente. Dabei wurden insbesondere die Auswirkungen auf die Druckfestigkeiten statistisch ausgewertet. Über weite Bereiche der untersuchten Zusammensetzungen war es möglich, Zemente mit einer Normdruckfestigkeit entsprechend der Festigkeitsklasse 42,5 MPa herzustellen. Hieran anschließend haben der VDZ und das FEhS-Institut für Baustoff-Forschung nunmehr die dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften untersucht.

Die Zusammensetzung der untersuchten Zemente reichte von den bisher bekannten CEM II-Zementen bis hin zu zukünftig genormten CEM II/C bzw. CEM VI-Zementen. Mittels statistischer Methoden wurde ein Versuchsplan von 40 Zementen bei fünf verschiedenen Zementzusammensetzungen erarbeitet.

#### Vorgehensweise

Basierend auf den Ergebnissen der Parameterstudie wurden fünf Zementzusammensetzungen ausgewählt. Die Fortschreibung der DIN EN 197-1 (Einführung von CEM II/C- und CEM VI-Zement) wurde durch drei Zemente berücksichtigt. Zwei noch darüber hinausgehende Zusammensetzungen wurden gewählt, um das Potenzial hüttensand- und flugaschereicher Zemente abzuschätzen (**Tabelle 3.4.4-1**).

Darüber hinaus kamen zwei industriell hergestellte Hochofenzemente CEM III/A 42,5 N als Referenzzemente zur Anwendung.

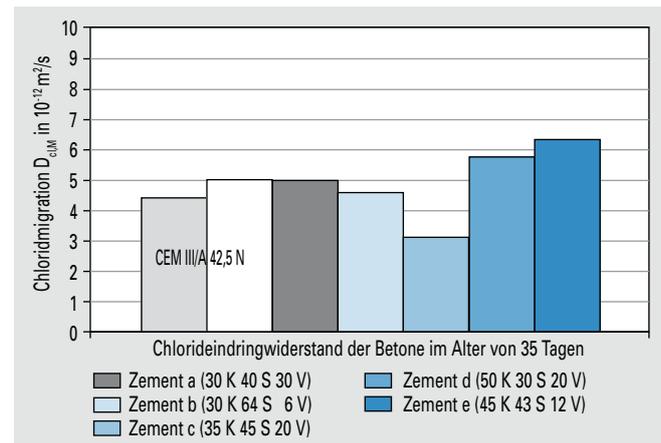
Als Maßstab für die Bewertung der Dauerhaftigkeit wurden die in Deutschland (Zulassungsverfahren des Deutschen Instituts für Bautechnik, DIBt) geforderten dauerhaftigkeitsrelevanten Parameter (Verfahren und Kriterien) gewählt. Die eingesetzten Verfahren haben Eingang gefunden in das Europäische Bewertungsdokument Bewertungsdokument (European Assessment Document, EAD) EAD 150001-00-0301 sowie in die Verfahrensgrundsätze CEN/TR 16563 Anhang B.

#### Ergebnisse

Die Prüfungen des Carbonatisierungsverhaltens von Feinbetonen gemäß dem Europäischen Bewertungsdokument EAD 150001-00-0301, Verfahren lfd. Nr. 15, Methode  $C_{dc}$ , zeigten einen deutlichen Einfluss der Dauer der Vorlagerung, die zwischen 7 und 28 Tage variierte. An den Feinbetonen unter Verwendung des Zements mit 45 M.-% Klinker, 43 M.-% Hüttensand und 12 M.-% Flugasche wurden in Abhängigkeit vom Prüfalter Carbonatisierungstiefen im Bereich der Referenzfeinbetone mit CEM III/A ermittelt. Alle anderen Feinbetone wiesen im Vergleich höhere Carbonatisierungstiefen auf und lagen außerhalb des Be-

**Tabelle 3.4.4-1** Zusammensetzung der Versuchszemente (Angaben sulfatfrei)

Zement	Klinker	Hüttensand	Flugasche
M.-%			
a)	30	40	30
b)	30	64	6
c)	35	45	20
d)	50	30	20
e)	45	43	12



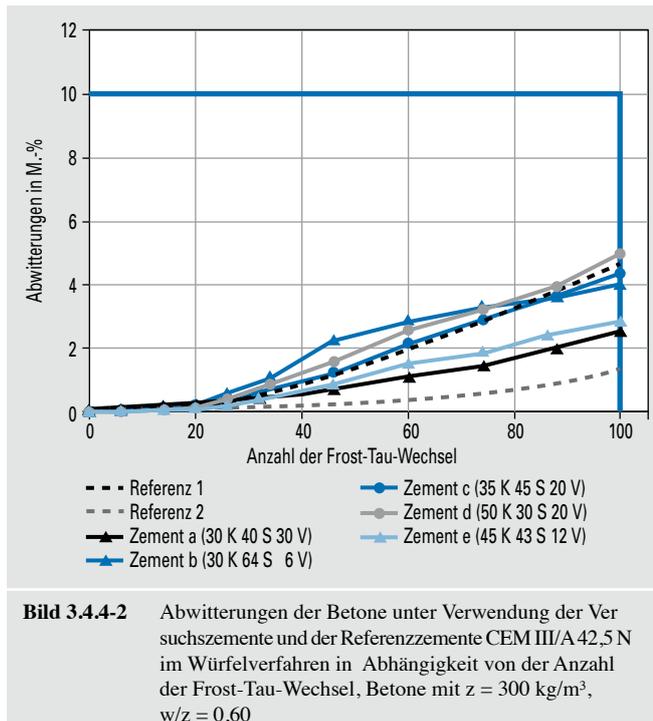
**Bild 3.4.4-1** Chloridmigrationskoeffizienten der Betone unter Verwendung der Versuchszemente und der Referenzzemente CEM III/A 42,5 N im Schnelltest, Betone mit  $z = 320 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,50$ , Prüfalter 35 Tage

wertungshintergrundes nach CEN TR 16563, Anhang B, Bilder B.3 bzw. B.4 bzw. EAD 150001-00-0301, Annex D. Die in diesen Feinbetonen enthaltenen Zemente wären voraussichtlich in den Expositionsklassen XC in Deutschland nicht zulassungsfähig.

In den Zulassungsverfahren des DIBt gilt ein Beurteilungskriterium für den Chloridmigrationskoeffizienten (Methode  $D_{mig}$  gemäß Verfahren lfd. Nr. 16 EAD 150001-00-0301) von  $25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  im Prüfalter von 35 Tagen. Alle Betone ( $z = 320 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,50$ ) haben das Kriterium mit Abstand eingehalten. Nach dem von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) herausgegebenen Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ liegt das Beurteilungskriterium für den Chloridmigrationskoeffizienten bei  $10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  für die Expositionsklassen XS1/XD1 und XS2/XD2 bzw. bei  $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  für die Expositionsklassen XS3/XD3. Die Werte lagen zum Teil im Bereich des Beurteilungskriteriums für die Expositionsklasse XS3/XD3 (**Bild 3.4.4-1**). Die Zemente wären somit für den allgemeinen Betonbau (DIBt) ebenso einsetzbar wie für den Wasserbau (BAW).

Auch das in den DIBt-Zulassungsprüfungen des Sulfatwiderstandes (Methode  $S_{FPM}$  gemäß Verfahren lfd. Nr. 14 EAD 150001-00-0301) angelegte Bewertungskriterium wurde durchweg eingehalten.

Die Betone erreichten mit allen Versuchszementen im Würfelverfahren (Methode  $FT_{cube}$  gemäß Verfahren lfd. Nr. 17 EAD 150001-00-0301) nach 100 Frost-Tau-Wechseln Abwitterungen  $< 10 \text{ M.-%}$  und erfüllten damit das Kriterium in Zulassungsversuchen. Sie wären somit in den Expositionsklassen XF1 und XF3 nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 in Deutschland zulassungsfähig (**Bild 3.4.4-2**).



Im CIF-Test (Capillary suction, Internal damage and Freeze-thaw test/Methode  $FT_{CF}$  gemäß Verfahren lfd. Nr. 17 EAD 150001-00-0301) wurde die innere Gefügeschädigung anhand des relativen dynamischen E-Moduls (RDM) der Betone untersucht. Nach 28 Frost-Tau-Wechseln wurde das Bewertungskriterium (RDM nach 28 FTW > 75 %) an drei Betonen eingehalten. Die Zemente, mit denen das Bewertungskriterium erfüllt wurde, hatten die Zusammensetzungen a, b und e. Sie wären somit auch im Wasserbau einsetzbar.

Der Frost-Tausalz-Widerstand der Luftporenbetone (Methode  $FTS_{CDF}$  gemäß Verfahren lfd. Nr. 18 EAD 150001-00-0301) wurde im CDF-Test untersucht. Das Beurteilungskriterium von  $1,5 \text{ kg/m}^2$  Abwitterungen nach 28 Frost-Tau-Wechseln wurde von zwei Betonen eingehalten. Unter Verwendung der Zemente mit Zusammensetzung d (50 M.-% Klinker) und Zusammensetzung e (45 M.-% Klinker) wurde der Test bestanden. Diese Zemente wären somit in Deutschland zulassungsfähig für die Expositionsclassen XF2 und XF4 nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2. Die Betone unter Verwendung der Zemente a, b und c (30 bzw. 35 M.-% Klinker) haben den Test nicht bestanden.

Ergänzend zu den Laborversuchen an den Betonen wurden auf Basis des Hydratationsgrades von Zementstein sowie der Porosität von Normmörteln Kennwertberechnungen angewendet, die aufgrund früherer Erfahrungen aus IGF-Nr. 17123 N geeignet erscheinen, die Ergebnisse des Würfelverfahrens und des CDF-Tests vorherzusagen. Frostwiderstand und Frost-Tausalz-Widerstand der zulassungsfähig zusammengesetzten Betone ließen sich anhand der Zementstein- und Mörtel Eigenschaften gut abschätzen (siehe auch 3.4.5).

### 3.4.5 DURAFOR – Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Betonen mit neuen klinkerbasierten Zementen ■

IGF-Vorhaben 187 EN, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
 Projektpartner: CRIC (Belgien), Smart Minerals (Österreich)  
 Projektzeitraum: 02/2017 – 01/2019

#### Hintergrund und Ziele

Aufgrund unterschiedlicher klimatischer Bedingungen und Bau-traditionen ist die europäische Betonnorm EN 206 bisher nicht harmonisiert. Entsprechend gelten in den Mitgliedsstaaten unterschiedliche Anwendungsregeln für die Verwendung verschiedener Betonausgangsstoffe wie Zement im Beton. Für die Zulassung von Zementen, die in einem Mitgliedsstaat bisher nicht verwendet werden dürfen, gelten europaweit unterschiedliche Verfahren. Naheliegender ist der Nachweis der Dauerhaftigkeit von Betonen mit diesen Zementen in Laborversuchen. Die europäischen Betonnormen bieten bisher kein geschlossenes Konzept an, einen solchen Nachweis zu führen. Auf europäischer Ebene stünde die „Europäische Technische Bewertung (European Technical Assessment, ETA)“ zur Verfügung. Ein entsprechender Prüfplan (European Assessment Document, EAD) mit Prüfverfahren wurde für Calciumsulfoaluminatzement veröffentlicht. Die Prüfverfahren stammen in einigen Fällen aus vormaligen nationalen, insbesondere deutschen, Zulassungsverfahren für Portlandzementklinker basierte Zemente.

Im Zuge der Entwicklung neuer, klinkereffizienter Zemente wären einfach zu handhabende Methoden zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Betonen mit solchen Zementen hilfreich. In einem CORNET-Forschungsvorhaben (Collective Research Networking) haben sich die Projektpartner CRIC (Belgien), Smart Minerals (Österreich) und VDZ (Deutschland) unter Konsortialführung des VDZ zusammengeschlossen, um charakteristische Kenngrößen an Zement- und Mörtelproben zu ermitteln sowie diese mit den Ergebnissen von Dauerhaftigkeitsprüfungen zu vergleichen und nach Möglichkeit zu korrelieren.

#### Vorgehensweise/Stand der Arbeiten

Die zu ermittelnden Kennwerte können Prüfungen im Vorfeld von Zulassungsverfahren ergänzen sowie Entwicklungspotenziale und -grenzen aufzeigen.

Derartige Kennwerte könnten ggf. auch zum fortlaufenden Nachweis der Leistungsbeständigkeit eingesetzt werden, da die Betondruckfestigkeit i. d. R. keine hinreichenden Korrelationen zu Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons liefert, wie aus der Literatur und dem vorangegangenen, nationalen Forschungsvorhaben bekannt ist. Zurzeit wird diskutiert, ob die europäische Betonnorm EN 206 in der Zukunft eine Klassifizierung des Dauerhaftigkeitspotenzials der Betone jenseits der nationalen deskriptiven Regeln z. B. anhand von Prüfungen enthalten soll. Bei Einführung solcher so genannten Widerstandsklassen ließe sich ggf. bereits anhand der Kennwerte an Zementstein und Mörtel eine mögliche Klassenzuordnung erkennen.

Den Prüfungen vorangestellt wurde die Auswertung europäischer Umfragen und Berichte, um nationale Zulassungsverfahren, Prüfverfahren und Bewertungsmethoden zu ermitteln.

**Tabelle 3.4.5-1** Zemente für die Herstellung von Beton gemäß Tabelle 3.4.5-2

	CRIC	Smart Minerals (SMG)	VDZ
1	CEM I 52,5 R	CEM I 52,5 R	CEM I 52,5 R
2	CEM II/C-M (S-LL) (A)	CEM VI (B)	CEM VI (A)
3	CEM II/C-M (V-LL) (B)	CEM II/C-M (V-LL) (A)	CEM II/C-M (S-LL) (B)
4	CEM II/C-M (S-V) (B)	CEM II/C-M (S-V) (B)	CEM II/B-M (S-LL) (A)
5	CEM II/B-M (LL-S-V) (B)	CEM II/B-M (LL-S-V) (A)	CEM II/B-LL (A)
6	CEM II/B-M (V-LL) (B)	CEM II/B-M (S-LL) (B)	CEM II/A-S (B)
7	CEM II/B-LL (B)	CEM II/B-M (V-LL) (A)	CEM III/B (A)

(A): CRIC: Klinker fein; S, LL, V fein, SMG: Klinker konstant; S, LL, V fein, VDZ: Klinker fein; S, LL, V konstant

(B): CRIC: Klinker grob; S, LL, V grob, Smart Minerals: Klinker konstant; S, LL, V grob, VDZ: Klinker grob; S, LL, V konstant

**Tabelle 3.4.5-2** Betone und Prüfverfahren

	Zement- gehalt in kg/m <sup>3</sup>	w/z	Luftge- halt in %	Ursprung	Prüfung gemäß
1	350	0,50	-	EAD	Karbonatisierung: EN 13295 mit 1 % CO <sub>2</sub> Sulfatwiderstand: SIA 262, Anhang D Chloriddiffusion: EN 12390-11:2015 Chloridmigration: NT BUILD 492 Frostwiderstand: CIF (CEN/TS 12390-9 in Kombination mit CEN/TR 15177)
2	260	0,65	-	CEN/TR: Deutschland	Karbonatisierung: EN 13295 mit 1 % CO <sub>2</sub>
3	300	0,55	-	CEN/TR: Österreich	Sulfatwiderstand: SIA 262, Anhang D Chloriddiffusion: EN 12390-11:2015 Chloridmigration: NT BUILD 492 (Migration)
4	340	0,45	5 ± 2	CEN/TR: meistgenutzt	Frost-Tausalz-Widerstand: Plattenprüfverfahren gemäß CEN/TS 12390-9
5	300	0,55	5 ± 2	CEN/TR: UK	Frost-Tausalz-Widerstand: Plattenprüfverfahren gemäß CEN/TS 12390-9

CEN/TR: CEN/TR 15868:2009 „Survey of national requirements used in conjunction with EN 206-1:2000“

EAD: EAD 15001-00-0301 für Calciumsulfoaluminatzemente

#### Auswahl der Zemente

Für die Untersuchungen wurden neben drei Referenzzementen, die in jeder der beteiligten Forschungsstellen untersucht werden, zwölf weitere Zemente in jeweils zwei Modifikationen je Forschungsstelle hergestellt und hinsichtlich ihrer Normeigenschaften geprüft. Dabei wurden insbesondere Zemente der Zusammensetzung CEM II/B-M nach derzeit gültiger EN 197-1 sowie CEM II/C-M- und CEM VI-Zemente gemäß dem aktuellen Entwurf der EN 197-1 berücksichtigt. Aus diesen 75 Zementen wurden ein Portlandzement als Referenz sowie weitere sechs Zemente je Forschungsstelle ausgewählt (**Tabelle 3.4.5-1**). Mit diesen Zementen werden die Betone gemäß **Tabelle 3.4.5-2** hergestellt und mit den angegebenen Verfahren geprüft.

#### Betonzusammensetzungen

Die Betonzusammensetzungen (vgl. **Tabelle 3.4.5-2**) stammen aus dem Technischen Bericht CEN/TR 15868:2009 „Survey of national requirements used in conjunction with EN 206-1:2000“ sowie dem European Assessment Document EAD 15001-00-0301 für Calciumsulfoaluminatzemente. Als Referenzbeton wurde der in **Tabelle 3.4.5-2** genannte EAD-Beton für alle Prüfungen mit Ausnahme der Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstand gewählt. Hier wurden LP-Betone (Luftporenbetone) eingesetzt. Zusätzlich wurde für jede Dauerhaftigkeitsprüfung der Beton mit dem niedrigsten Zementgehalt sowie dem höchsten Wassermenge für die jeweilige Expositionsklasse aus dem CEN/TR ausgewählt. So wird neben verschiedenen Zementen auch eine große Spannweite von in Europa üblichen Betonen untersucht werden.

#### Weitere Prüfungen

Neben den in **Tabelle 3.4.5-2** genannten Prüfungen werden an jedem Beton das Ausbreit- oder Setzmaß sowie der Frischbetonluftgehalt im Druckausgleichsverfahren bestimmt. Druckfestigkeiten werden im Alter von 2, 28 und 91 Tagen geprüft.

Analog zum abgeschlossenen nationalen Forschungsvorhaben (IGF 17123 N, vgl. VDZ-Tätigkeitsbericht 2012-2015) werden von jedem der ausgewählten Zemente die zeitliche Entwicklung des Hydratationsgrades, die Menge an chemisch gebundenem Wasser sowie die Porenradialverteilung der entsprechenden Mörtel geprüft. Das chemisch gebundene Wasser wird dabei vergleichend mittels Thermogravimetrie (CRIC) sowie mittels Kohlenstoff- und Wasserstoff-Feuchte-Analysator bestimmt.

#### Kennwertermittlung

Parameter aus der Porenradialverteilung sowie die Menge des chemisch gebundenen Wassers zu verschiedenen Prüfzeitpunkten werden zu empirischen Kennwerten zusammengefasst und mit den Ergebnissen der Dauerhaftigkeitsprüfungen verglichen sowie (wenn möglich) korreliert. Die Ergebnisse werden zum Abschluss des Forschungsvorhabens im Januar 2019 vorliegen.

### 3.4.6 Einfluss betontechnologischer Parameter auf die Feuchtespeicherung und den Feuchtetransport in Betonen und Zementestrichen sowie auf den hieraus resultierenden Feuchtegehalt unter verschiedenen Umweltbedingungen ■

IGF-Vorhaben 17928 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektzeitraum: 01/2014 – 12/2016

#### Hintergrund und Ziele

Bei der Planung von Bauteilen aus Beton und der Anwendung von Zementestrichen kommt es aktuell zu zwei Fragestellungen im Zusammenhang mit der Feuchtespeicherung und dem Feuchtetransport:

##### 1. Trocknungsverhalten von Zementestrich

Verschiedentlich wurde berichtet, dass sich das Trocknungsverhalten von Estrichen mit CEM II-Zementen (Portlandkompositzementen) und CEM III-Zementen (Hochofenzementen) von dem Trocknungsverhalten von Estrichen mit Portlandzementen unterscheidet und die Trocknung bis zur Belegreife in manchen Fällen länger sei als bei Estrichen mit Portlandzement. Estrichleger neigen daher nach wie vor dazu, auf die Anwendung von CEM II- und CEM III-Zementen zu verzichten und stattdessen auf Portlandzemente zurückzugreifen. Im vorliegenden Forschungsprojekt sollte der Einfluss der Zementart auf das Trocknungsverhalten von zementgebundenen Estrichen systematisch untersucht werden.

##### 2. Abplatzungen bei Bauteilen unter Brandbeanspruchung

Wenn Betonbauteile im Brandfall hohen Temperaturen ausgesetzt sind, kann es zum Abplatzen von Betonstücken kommen. Besondere Bedeutung haben hierbei die so genannten explosiven Abplatzungen, bei denen sich Betonstücke schlagartig von den betroffenen Bauteilen lösen und mit lauten, explosionsartigen Geräuschen fortgeschleudert werden. Dieses Thema rückt zum einen durch die Verwendung von hochfesten Betonen, zum anderen aber auch durch Regeln in der DIN EN 1992-1-2 zur Tragwerksbemessung im Brandfall in den Fokus. In der Norm ist angegeben, dass explosive Betonabplatzungen unwahrscheinlich sind, „wenn der Feuchtigkeitsgehalt des Betons weniger als  $k \cdot \text{Gew.}\%$  beträgt“, wobei  $k$  auf nationaler Ebene festzulegen ist.

Systematische Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Betonzusammensetzungen und Umgebungsbedingungen auf den Feuchtegehalt und die Feuchteverteilung in Betonbauteilen lagen bislang nicht vor. Daher wurde im Forschungsvorhaben mit einer rechnergestützten Simulation untersucht, welche Feuchtegehalte und -verteilungen bei Betonen verschiedener Zusammensetzungen unter üblichen Umweltbedingungen typischerweise vorliegen. Gleichzeitig wurde überprüft, welchen Einfluss die Betonzusammensetzung und der Feuchtegehalt des Betons auf das Auftreten von Abplatzungen beim Erhitzen von Beton haben können.

#### Vorgehensweise

Zur Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Zementestrichen wurden Probekörper mit zwei Zusammensetzungen und jeweils fünf Zementarten hergestellt. Die Feuchtemessung der Estriche erfolgte jeweils 7, 14, 28, 56 und 168 Tage nach der Herstellung, um so die zeitliche Entwicklung des Trocknungsprozesses doku-

mentieren zu können. Die Feuchtemessung erfolgte an repräsentativen Teilproben auf zwei Arten:

- CM-Messung (Calciumcarbidmethode)
- Darren durch Ofentrocknung bei 105 °C bis zur Massenkonstanz

Als Eingangsgrößen für die Simulationen zur Bestimmung der Feuchteverteilung in Betonen wurden die Feuchtespeicherfunktion/Sorptionsisotherme, die Wasserdampfdurchlässigkeit sowie der Wasseraufnahmekoeffizient für Betone verschiedener Zusammensetzungen experimentell bestimmt.

Zur Untersuchung des Verhaltens der Betone beim Erhitzen und eines möglichen explosiven Abplatzens wurde ein Versuchsaufbau gewählt, der zum ersten Mal von Kalifa<sup>1)</sup> beschrieben und seitdem von vielen Wissenschaftlern verwendet wurde. Hierbei wird die Oberfläche eines Betonkörpers mit den Abmessungen 30 cm x 30 cm x 12 cm mit elektrischen Heizstrahlern erhitzt. Der Versuch wird in einigen Quellen als „PTM-Versuch“ bezeichnet, da die Änderung von Porendruck, Temperatur und Masse bestimmt wird.

#### Ergebnisse

Die Untersuchungen zum Trocknungsverhalten von Zementestrichen und Zementstein zeigten Folgendes:

- Estrichmörtel mit Hochofenzementen wiesen nach einer Lagerung von bis zu einem halben Jahr im Klima 20 °C/65 % r. F. (relative Feuchte) höhere Feuchtegehalte (CM-Feuchte und mittels Ofentrocknung bei 105 °C bestimmter Massenanteil der enthaltenen Feuchte) auf als Estriche mit anderen Zementarten.
- Zementsteine mit Hochofen- und Portlandhüttenzementen zeigten bei Lagerung in den Klimata 20 °C/65 % r. F. und 40 °C/30 % r. F. deutlich geringere Massenverluste und beim Klima 20 °C/65 % r. F. bereits nach wenigen Wochen Massenkonstanz, d. h. es wurde keine weitere Baustofffeuchte in die Umgebung abgegeben.

Der Ausgleichsfeuchtegehalt von Estrichen mit Hochofenzement ist bei üblich vorherrschenden relativen Luftfeuchten höher als der von Estrichen mit Portlandzement. Daher kann ein Maximalwert für den Feuchtegehalt, der anhand des Trocknungsverhaltens von Estrichen mit Portlandzement definiert wurde, bei Verwendung eines Hochofenzements möglicherweise nicht unterschritten werden. Der Feuchteverlust, letztlich entscheidend für das mögliche Auftreten von Schäden an Fußbodenkonstruktionen, ist bei Verwendung von Hochofenzementen i. d. R. geringer als bei Estrichen mit Portlandzement. Die aufgrund des Trocknungsverhaltens bestehenden Vorbehalte bei Hochofenzementen und einigen Portlandkompositzementen erscheinen damit unbegründet.

Die Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports zeigte, dass sich im Inneren von Betonbauteilen nach mehreren Jahren eine weitestgehend konstante relative Luftfeuchte einstellt, die der mittleren vorherrschenden relativen Luftfeuchte der Umgebung entspricht. Die Feuchte der äußeren ca. 2,5 bis 5 cm eines Betonbauteils wird maßgeblich von Schwankungen des Klimas im Jahresverlauf beeinflusst. Je dichter der Beton ist, desto geringer ist die Randzone, die durch Klimaschwankungen beeinflusst wird.

<sup>1)</sup> Kalifa, P. et al., Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. Cement and Concrete Research 2000, 30, S. 1915-1927

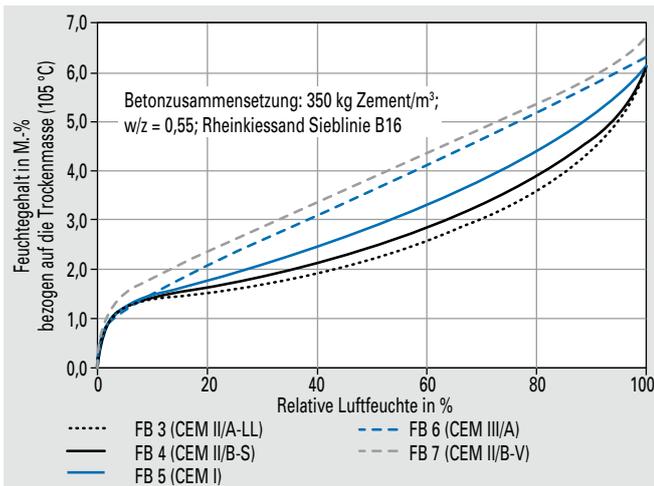


Bild 3.4.6-1 Beispielhafte Desorptionsisothermen von Beton



Bild 3.4.6-2 Oberfläche eines Probekörpers nach dem Abplatzen

Die relative Luftfeuchte, die sich im Bauteilinneren einstellt, entspricht

- für Innenbauteile bei typischen Raumklimabedingungen rd. 50 %
- für ungedämmte Bauteile bei typischen Außenklimabedingungen in Deutschland rd. 75 % bis 80 %, falls die Bauteile Regen ausgesetzt sind, auch höher.

Mit Hilfe der im Projekt bestimmten Sorptionsisothermen der Betone (Beispiele in **Bild 3.4.6-1**) konnte den relativen Feuchtegehalten der entsprechende Feuchtegehalt in Gew.-% über die Bauteildicke zugeordnet werden. Dies ermöglicht die Überprüfung, ob  $k$  in Gew.-% bei den vorliegenden Klimabedingungen überschritten wird und somit nach DIN EN 1992-1-2 explosive Abplatzungen wahrscheinlich sind.

Die Versuche zum explosiven Abplatzen von Beton im Brandfall führten zu folgenden Ergebnissen:

- Hohe Porendrücke waren im vorliegenden Forschungsprojekt nicht die Hauptursache für das Auftreten von explosivem Abplatzen von Beton.
- Während andere Wissenschaftler mit dem durchgeführten „PTM-Versuch“ kein Abplatzen feststellten, wurde im vorliegenden Forschungsvorhaben über eine Modifizierung des Versuchs (Aufbringen einer Druckbelastung) in mehreren Fällen explosives Abplatzen beobachtet (**Bild 3.4.6-2**). Das Aufbringen von Drucklasten ist folglich entscheidend für das Auftreten von Abplatzen im PTM-Versuch.
- Explosives Abplatzen trat auf bei hochfesten Betonen sowie bei normalfesten Betonen mit Hochofenzement (CEM III/A) und Portlandflugaschezement (CEM II/B-V). Im Vergleich zu anderen Betonen im Versuchsprogramm weist der Zementstein dieser Betone einen geringeren Kapillarporenanteil und einen größeren Gelporenanteil auf.

Auf der Grundlage von eigenen Beobachtungen und Erkenntnissen aus der Literatur wurden Hypothesen zur Ursache des explosiven Abplatzens im Forschungsprojekt aufgestellt. Diese Hypothesen und der relative Beitrag der vermuteten Phänomene zum Abplatzen werden in einem nachfolgenden Forschungsvorhaben untersucht werden.

### 3.4.7 Nachträgliche Ermittlung der Betonzusammensetzung ■

Forschungsvorhaben T218/24815/2013, gefördert durch die Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff-Stiftung  
Projektzeitraum: 01/2013 – 12/2016  
sowie

IGF-Vorhaben 17829 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektzeitraum: 06/2013 – 12/2015

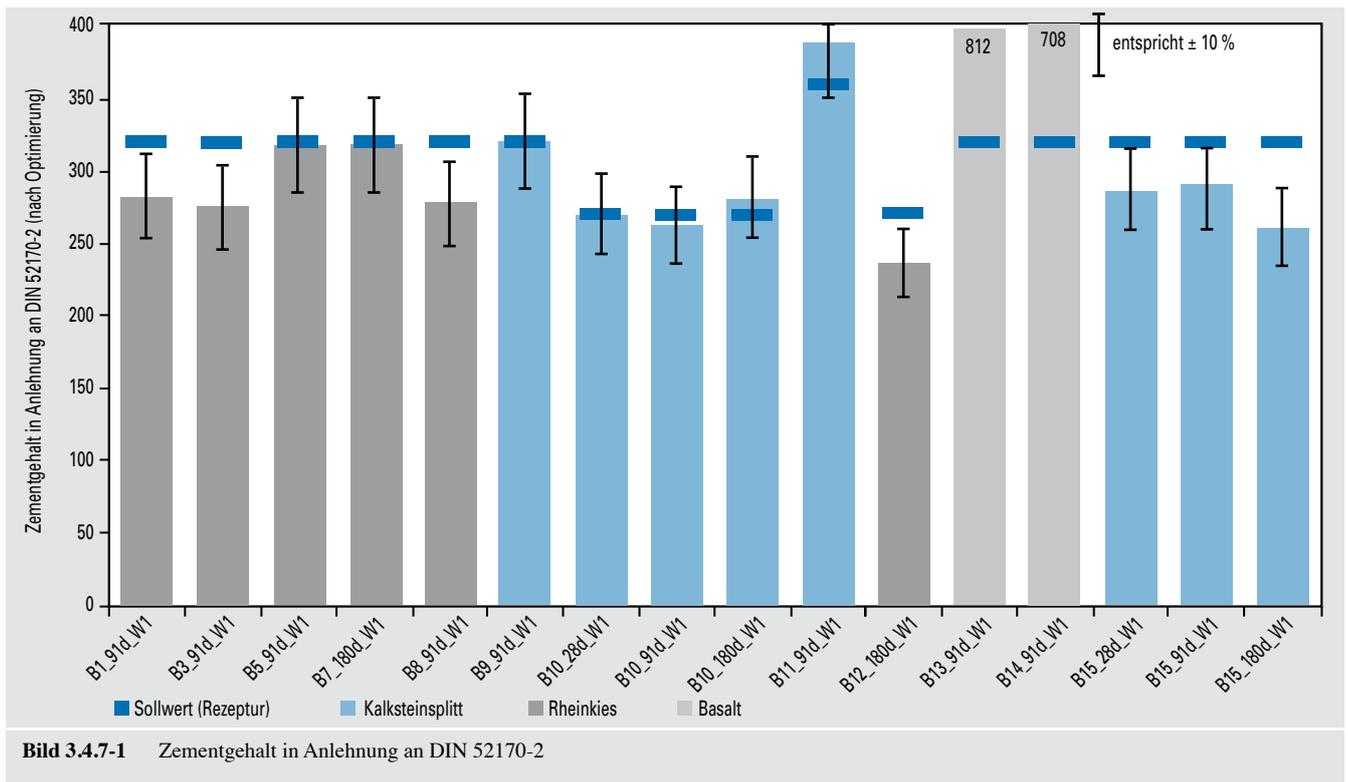
#### Hintergrund und Ziele

Bei einer Revitalisierung und Umnutzung von Bauwerken mit zementgebundenen Baustoffen, aber auch bei Mängeln und Schadensfällen, ist die Kenntnis der Betonzusammensetzung von großer Bedeutung. Oft liegen entsprechende baubegleitende Dokumentationen nicht mehr vor. Deshalb ist eine präzise nachträgliche Bestimmung des Zementgehaltes, der Zementart sowie der Gehalte an Zusatzstoffen und Gesteinskörnung im Festbeton notwendig. Dies ist jedoch mit den bisher verfügbaren Analyseverfahren nicht oder nur unzureichend möglich.

In den Projekten wurden Methoden erarbeitet, mit denen der Zementgehalt sowie die Zementart oder der Zusatzstoffgehalt zuverlässig am erhärteten Beton bestimmt werden können. Hierbei wurden insbesondere Zemente eingesetzt, die weitere Zementhauptbestandteile neben Klinker enthielten.

#### Vorgehensweise

Zur Erarbeitung und Validierung der Prüfverfahren wurden zunächst Zemente aus einzelnen Zementhauptbestandteilen (u. a. Hüttensand, Kalkstein, Trass, getemperter Ton) hergestellt. Anschließend wurden Betone unter Verwendung dieser Zemente erzeugt, sodass die Anteile der Zement- und Betonbestandteile in den Betonen genau bekannt waren und die Leistungsfähigkeit der Prüfverfahren bewertet werden konnte. Die Prüfverfahren in den Projekten verfolgten dabei im Wesentlichen zwei grundlegende unterschiedliche Ansätze. Zum einen wurden nasschemische Methoden in Anlehnung an DIN 52170 und CEN/TR 196-4 so optimiert, dass eine Vielzahl an Parametern mit höchstmöglicher Genauigkeit bestimmt werden können. Zum anderen wurden bildanalytische Ansätze verfolgt, deren Bilder durch Element-Mappings mit einer Mikro-RFA (Röntgenfluoreszenzanalyse) sowie einem Rasterelektronenmikroskop (REM) mit energiedispersiver



Röntgenmikroanalyse (EDX) gewonnen wurden. Diese Methoden wurden an diversen Betonen validiert. Dabei wurden die Einflüsse von Zement- und Zusatzstoffgehalt, Betonalter sowie verschiedenen Zementarten und Gesteinskörnungen auf die Anwendbarkeit/Genauigkeit der Verfahren untersucht.

### Ergebnisse

Bei den Ergebnissen der Zementgehaltsbestimmung traten bei dem Verfahren gemäß DIN 52170-2 häufiger größere Fehler auf als in der Norm angegeben. Dies war auf verfahrensbedingte, systematische und unsystematische Fehler zurückzuführen. So setzt die Norm DIN 52170-2 z. B. voraus, dass bei  $\text{CO}_2$ -Gehalten  $> 0,75\%$  Kalkstein in der Gesteinskörnung des Betons vorliegt. Rechnerisch wird dieser Kalksteingehalt in diesem Fall der Gesteinskörnung zugeordnet. Bei Verwendung von Portlandkalksteinzementen oder Portlandkompositzementen kann diese Annahme jedoch zu deutlichen Unterbestimmungen im Zementgehalt führen, da der Kalkstein zum Zement und nicht zur Gesteinskörnung gehört. Auch bei puzzolanhaltigen Zementen (z. B. mit Trass oder Flugasche) war eine Unterbestimmung des Zementgehaltes zu erwarten, da sich diese Puzzolane im Analyseverfahren eher wie Gesteinskörnungen verhalten. Ein Teil der Ergebnisse ist in **Bild 3.4.7-1** dargestellt. Hierbei handelt es sich um Ergebnisse von Optimierungsversuchen nach DIN 52170-2. Die Optimierung konzentrierte sich im Wesentlichen auf die Bestimmung des unlöslichen Rückstandes und die Berücksichtigung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes des Betons. Hier zeigt sich, dass der Zementgehalt in einigen Fällen gut ermittelt werden konnte, bei anderen Betonen jedoch größere Fehler auftraten. Bei den Betonen B13 und B14 wurde der Zementgehalt stark überbestimmt, da dieser Beton eine teilweise säurelösliche Gesteinskörnung (Basalt) enthielt.

Als Alternative zu der nasschemischen Bestimmung des Zementgehaltes wurde ein bildanalytisches Verfahren entwickelt, das auf  $\mu$ -RFA-Mappings basiert. Hierbei wurde ein Querschnitt des Be-

tons präpariert und mindestens zwei Flächen von  $10\text{ cm} \cdot 10\text{ cm}$  analysiert. Bei der Analyse wurde alle  $50\ \mu\text{m}$  die elementare Zusammensetzung des Betons mittels  $\mu$ -RFA bestimmt, um so zwischen Zementstein und Gesteinskörnung unterscheiden zu können. Anschließend wurde mithilfe bildanalytischer Techniken der Flächenanteil von Zement und Gesteinskörnung bestimmt. Zur Bildanalyse kam die freie Software ImageJ zum Einsatz. Die Unterscheidung zwischen Zementstein und Gesteinskörnung (Segmentierung) erfolgte mit Hilfe der implementierten Schwellwertalgorithmen. Auf diese Weise konnte eine weitgehend anwenderunabhängige Segmentierung erfolgen. Anschließend wurden die Gehalte anhand der Dichten und Volumenverhältnisse in Masseanteile umgerechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass es sich um ein vielversprechendes Verfahren handelt, da für alle verwendeten Gesteins- und Zementarten eine Quantifizierung möglich war. Vor dem Einsatz dieses Verfahrens in der Praxis müssen jedoch noch einige Randparameter, wie z. B. der Einfluss von Gesteinsmehlen oder unterschiedlichen w/z-Werten (Wasserzementwerten), untersucht werden. Hierzu ist ein Nachfolgevorbahn angelaufen.

Zur nasschemischen Abschätzung des Hüttensandgehaltes am Beton wurde ein selektives Löseverfahren in Anlehnung an CEN/TR 196-4 eingesetzt. Dieses beruht darauf, dass Hüttensand in Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA) weitgehend unlöslich ist und in  $\text{HNO}_3$  gelöst werden kann. Bei Durchführung beider Löseschritte kann demnach der Hüttensandgehalt des Systems durch die Differenz der unlöslichen Rückstände abgeschätzt werden. Hierbei muss jedoch die Veränderung des Löseverhaltens durch die Hydratation berücksichtigt werden. Diese Veränderung wurde anhand von Literaturangaben und durch eigene Laborversuche abgeschätzt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit diesem Verfahren grundsätzlich eine Abschätzung des Hüttensandgehaltes möglich ist. Für eine verlässliche Analyse ist jedoch auch das Löseverhalten der Gesteinskörnung zu berücksichtigen, da die Gesteinskörnung i. d. R. den größten Masseanteil im Beton ausmacht. Hierzu muss

eine Rückstellprobe der Gesteinskörnung vorliegen. In einem Nachfolgeprojekt wird geprüft, ob die Gesteinskörnung so aus dem Beton extrahiert werden kann, dass deren Löslichkeit zu ermitteln ist. Dies würde die Notwendigkeit von Rückstellproben aufheben.

Als Alternative zu der nasschemischen Abschätzung des Hütensandgehaltes wurde eine bildanalytische Methode auf der Basis von Element-Mappings am Rasterelektronenmikroskop (REM) mittels energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX) erarbeitet. Hierbei wurden mindestens acht Mappings je Beton in 500-facher Vergrößerung durchgeführt. Zunächst wurde die Gesteinskörnung identifiziert und der verbleibende Flächenanteil dem Zementstein und Poren zugeordnet. Dieser Flächenanteil wurde anschließend in einen Zementgehalt umgerechnet. Daraufhin konnten die Flächenanteile von Hütensand, Flugasche, Trass und getempertem Ton ermittelt und auf den Zementgehalt bezogen werden. Die Ergebnisse belegen, dass eine erste Abschätzung der Anteile von Zementbestandteilen mit diesem Verfahren möglich ist. Für eine genauere Analyse ist jedoch eine größere Anzahl an Mappings empfehlenswert – insbesondere, wenn die Bestandteile unterschiedlich groß sind. In der Partikelgröße könnte auch ein limitierender Faktor der Methode liegen, da sich bei sehr feinen Partikeln mittlere Zusammensetzungen in der EDX ergeben, die ggf. nicht immer einem Bestandteil zugeordnet werden können. Im Rahmen dieses Projektes konnten dennoch für alle genannten Bestandteile gute Abschätzungen der Anteile erreicht werden.

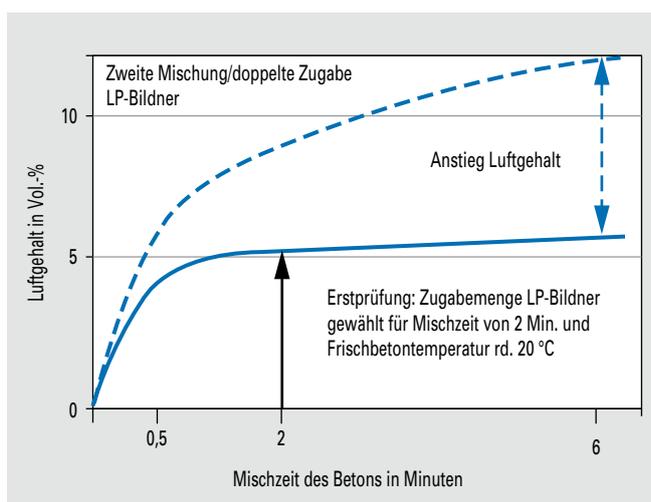
### 3.4.8 Erweiterte Erstprüfung für Luftporenbeton mit Fließmittel unter Berücksichtigung baupraktischer Bedingungen ■

IGF-Vorhaben 18854 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektzeitraum: 01/2016 – 12/2017

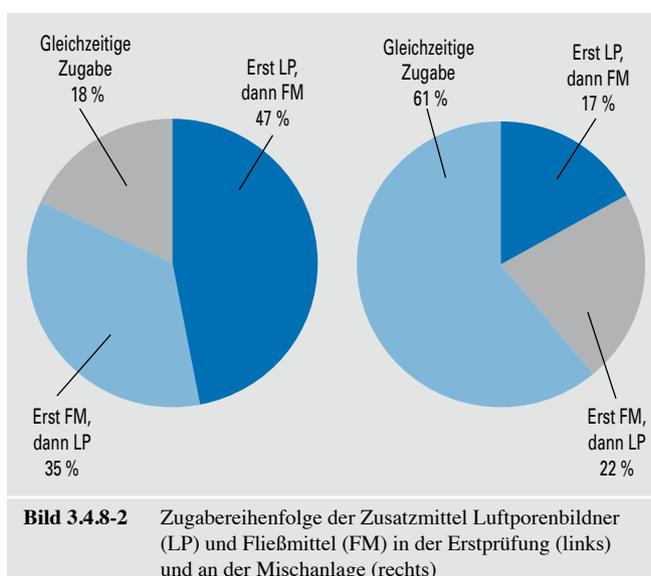
#### Hintergrund und Ziele

Die Betonbauweise wird zunehmend auch für innerstädtische Verkehrsflächen eingesetzt, z. B. für Kreisverkehre und Busspuren. Der Luftporenbeton (LP-Beton) wird im Transportbetonwerk hergestellt, mit Fahrmischern zur Einbaustelle gebracht und dort meist händisch oder mit leichten Einbaugeräten eingebaut. Die für den Einbau nötige weichere Konsistenz wird mit einer Fließmittelzugabe (FM) eingestellt. Wechselwirkungen zwischen Luftporenbildner (LP) und Fließmittel (FM) sowie baupraktische Schwankungen von Wassergehalt und Temperatur erhöhen das Risiko, dass Luftporenbildung und Stabilität des Frischbetons beeinträchtigt werden. Ursachen sind u. a. die nachträgliche Aktivierung des LP-Bildners im Fahrmischer während des Transports oder eine nicht einheitliche Zugabereihenfolge von LP und FM.

Das Nachaktivierungspotenzial kann im Rahmen einer erweiterten Erstprüfung abgeschätzt werden. Dabei wird in einem Zusatzversuch (**Bild 3.4.8-1**) die in der Erstprüfung ermittelte LP-Bildner-Zugabemenge verdoppelt und der Luftgehalt der Mischungen mit beiden Zugabemengen nach einer kurzen Mischzeit von 30 Sekunden und nach einer verlängerten Mischzeit von rund vier bis sechs Minuten bestimmt. Im Falle eines wesentlich ansteigenden Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge und verlängerter Mischzeit besteht bei der Bauausführung die Gefahr einer nachträglichen Erhöhung des Luftgehalts. Systematische Untersuchungen an steifen Straßenbetonen ohne Fließmitteleinsatz zeigten, dass das Nachaktivierungspotenzial von LP-Bildnern mit natürlicher



**Bild 3.4.8-1** Prüfung des Nachaktivierungspotenzials einer Betonzusammensetzung bei der Erstprüfung im Labor



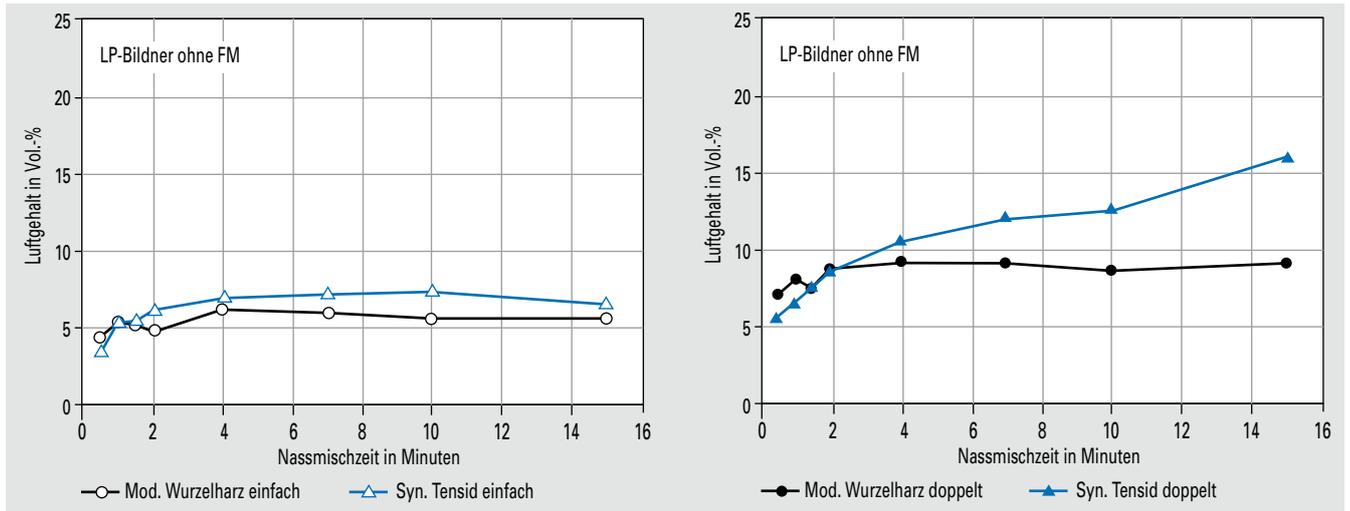
**Bild 3.4.8-2** Zugabereihenfolge der Zusatzmittel Luftporenbildner (LP) und Fließmittel (FM) in der Erstprüfung (links) und an der Mischanlage (rechts)

Wirkstoffbasis als gering zu bewerten ist. Ursache hierfür ist, dass der größte Anteil des Wirkstoffs in der Porenlösung ausfällt. Eine wesentliche nachträgliche Erhöhung des Luftgehalts ist bei synthetischen Tensiden zu erwarten.

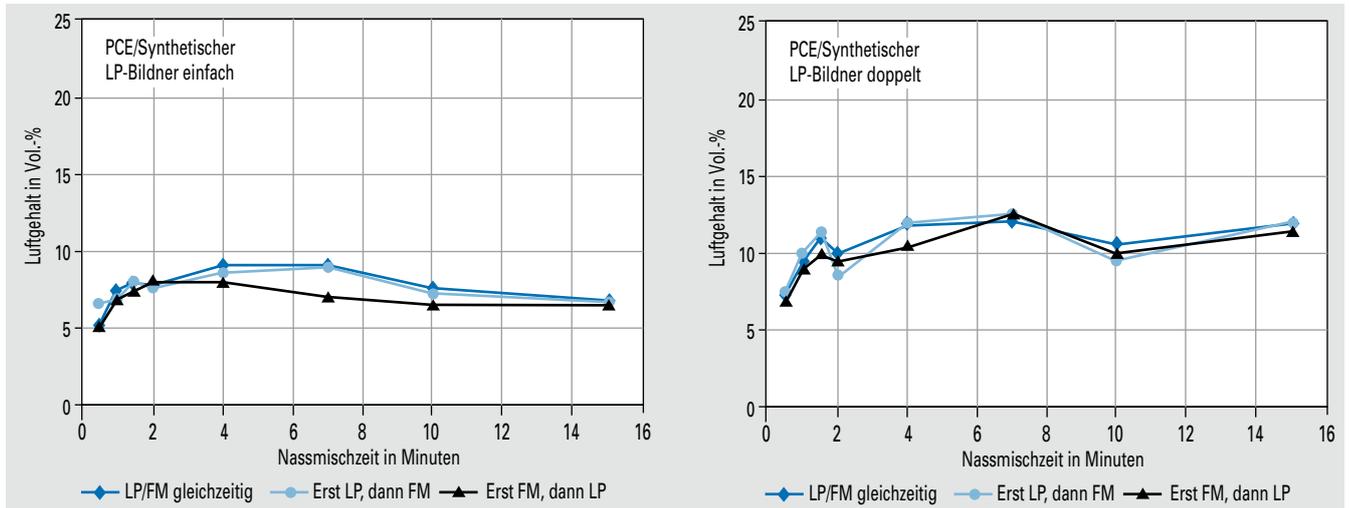
In diesem Forschungsvorhaben sollte nunmehr überprüft werden, ob die bei LP-Betonen ohne Fließmittel (steife Konsistenz) gefundenen Zusammenhänge zwischen Mischzeit, Wirkstoffbasis und Zugabemenge des LP-Bildners auf das Nachaktivierungspotenzial auch bei LP-Betonen mit Fließmittel erhalten bleiben. Dabei wurde insbesondere der Einfluss der Zugabereihenfolge von LP-Bildner und Fließmittel in Laborversuchen untersucht. Für die kombinierte Verwendung von LP und FM gab es bisher aber keine Empfehlung für eine erweiterte Erstprüfung.

#### Vorgehensweise

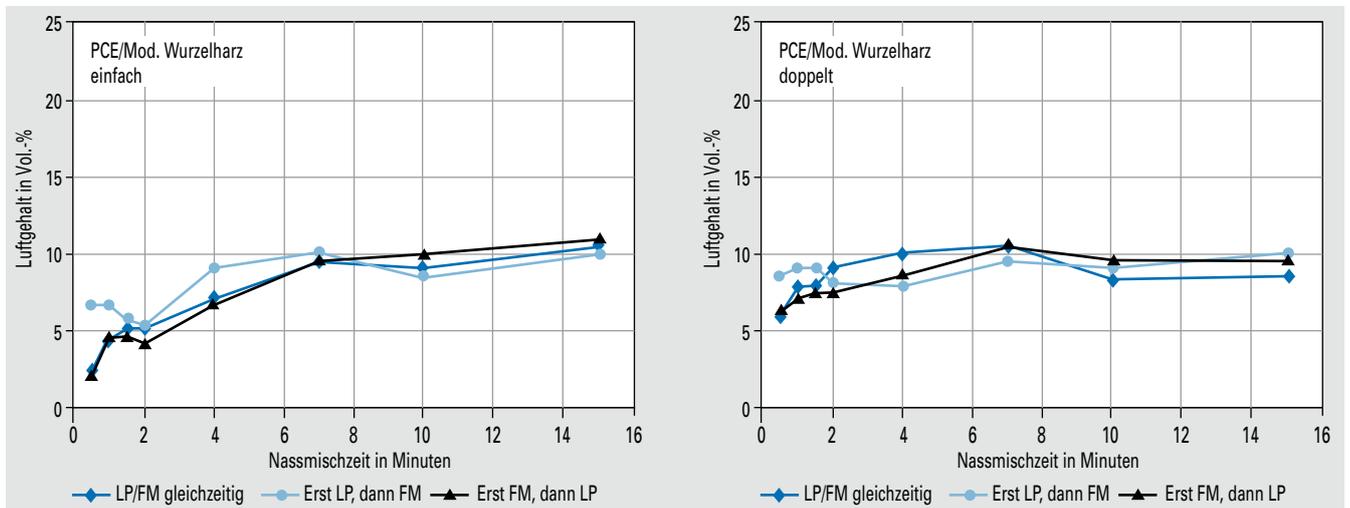
Die Entwicklung einer Prüfvorschrift im Labor und die Feststellung von deren Übertragbarkeit auf baupraktische Verhältnisse erfolgte in fünf Arbeitspaketen (AP). In einem ersten Schritt wurden drei Zusatzmittelkombinationen LP/FM (AP 1) für die



**Bilder 3.4.8-3 a und b** Mischzeitabhängige Luftporenbildung von LP-Beton ohne Fließmittel in Abhängigkeit des LP-Bildners: links einfache Zugabemenge LP-Bildner, rechts doppelte Zugabemenge LP-Bildner



**Bilder 3.4.8-4 a und b** Mischzeitabhängige Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Zugabereihenfolge bei der Kombination PCE/syn. LP-Bildner: links einfache und rechts doppelte Zugabemenge LP-Bildner



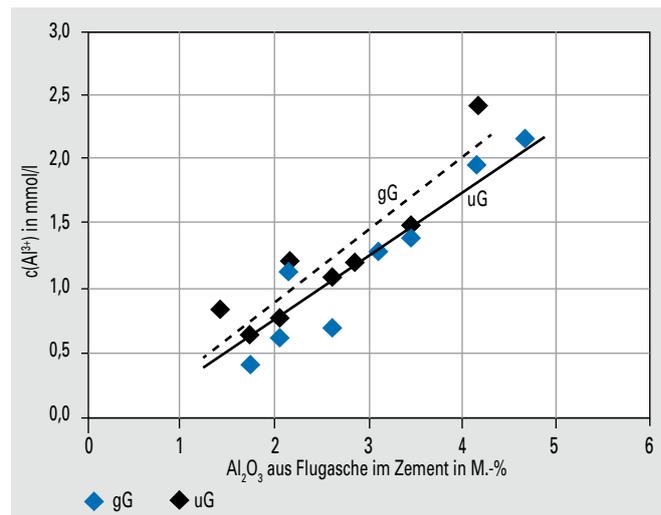
**Bilder 3.4.8-5 a und b** Mischzeitabhängige Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Zugabereihenfolge bei der Kombination PCE/mod. Wurzelharz: links einfache und rechts doppelte Zugabemenge LP-Bildner

Labor- und Praxisversuche ausgewählt. Die Erfahrungen der Hersteller von LP-Beton wurden mit einem Fragebogen erfasst (AP 2). Anschließend galt es, ein Transportbetonwerk für die Praxisversuche auszuwählen und die Ausgangsstoffe, die Betonzusammensetzung und den Ablauf der Praxisversuche festzulegen (AP 3). Mit dem im Mischwerk verwendeten Zement wurde die Luftporenbildung im Frisch- und Festbeton in Laborversuchen untersucht (AP 4). Anschließend waren Praxisversuche im Transportbetonwerk durchzuführen (AP 5). Der Vergleich der Versuchsergebnisse ermöglichte eine Aussage zur Übertragbarkeit von Laborversuchen auf baupraktische Verhältnisse. Als Ergebnis wurden Empfehlungen für eine erweiterte Erstprüfung bei der kombinierten Verwendung von LP und FM erarbeitet, die eine zielgerechte Luftporenbildung in der Praxis sicherstellen sollen.

### Ergebnisse

Es wurden zwei LP-Bildner (keine Konzentrate) auf natürlicher (modifiziertes Wurzelharz) bzw. synthetischer Wirkstoffbasis (Alkylsulfat) mit geringem bzw. hohem Nachaktivierungspotenzial und zwei Fließmittel (PCE, Polycarboxylatether, Transportbetonanwendungen und Kombinationsprodukt aus Naphthalinsulfonat/Melaminsulfonat) eines Herstellers ausgewählt und in verschiedenen Kombinationen FM/LP eingesetzt: PCE/synthetisches Tensid, PCE/modifiziertes Wurzelharz und Kombinationsprodukt/modifiziertes Wurzelharz. Die Befragung zur Zugabereihenfolge LP-Bildner und Fließmittel zum Zeitpunkt der Erstprüfung im Labor zeigte folgendes Ergebnis: Bei der Erstprüfung wurde in 47 % der Fälle zuerst der LP-Bildner und danach das Fließmittel zugegeben (**Bild 3.4.8-2**). Auf die umgekehrte Variante entfielen 35 %. 18 % der Befragten nannten die Variante „LP und FM gleichzeitig“. Bei der Herstellung in der Praxis in der Mischanlage entfielen 61 % der Antworten auf die gleichzeitige Zugabe von LP und FM. In 17 % der Fälle wurde zuerst der LP-Bildner und danach das Fließmittel und in 22 % zuerst das Fließmittel und danach der LP-Bildner zugegeben. Damit zeigte sich in der Praxis eine andere Zugabereihenfolge als in der Erstprüfung. Es fand eine Verlagerung der Hauptantwortgruppe „erst LP, dann FM“ (Erstprüfung) zur „gleichzeitigen Zugabe von LP und FM“ bei der Praxisanwendung statt. Grund hierfür dürfte die damit verbundene kürzere Mischzeit sein, die einen höheren Durchsatz der Mischanlage erlaubt.

In Laborversuchen wurde der Einfluss der Art und der Zugabereihenfolge der Zusatzmittel sowie der Mischzeit auf die Luftporenbildung mit einer Standardmischung untersucht. Die Frischbetone wurden nach einem festgelegten Mischregime so hergestellt, dass sie 45 Minuten nach Ende der Mischzeit einen Luftgehalt von 5,5 ( $\pm 0,5$  Vol.-%) und ein Ausbreitmaß von 40 bis 45 cm aufwiesen. Dabei zeigte sich, dass bei den Fließmittelbetonen wesentlich geringere Mengen an LP-Bildner erforderlich waren als bei den steifen Betonen ohne FM. Anschließend wurde die mischzeitabhängige Luftporenbildung mit einfacher und doppelter Zugabemenge in Abhängigkeit von der Zusatzmittelkombination und der Zugabereihenfolge ermittelt. In die Auswertung wurden ebenfalls die Betone ohne Fließmittel einbezogen (**Bilder 3.4.8-3 a und b**). Es zeigte sich, dass die Zugabereihenfolge die mischzeitabhängige Luftporenbildung nicht beeinflusste (**Bilder 3.4.8-4 a und b** sowie **3.4.8-5 a und b**). Das bei steifen Betonen ohne FM typische Nachaktivierungspotenzial bei synthetischen LP-Bildnern ist kaum mehr ausgeprägt. Ursache ist vermutlich die wesentlich geringere Zugabemenge an LP-Bildner bei weichen LP-Betonen. Die Versuche zeigten, dass die Prüfvorschrift auch für LP-Betone mit Fließmittel einsetzbar und ebenfalls auf Praxisverhältnisse übertragbar ist.



**Bild 3.4.9-1** Al-Konzentration in Porenlösungen in Abhängigkeit vom reaktiven Al aus Flugasche im Laborzement; uG: Flugasche im Ausgangszustand; gG: aufbereitete Flugasche; Alter: 365 d

### 3.4.9 Vermeidung einer schädigenden AKR durch Portlandflugaschezement – Wirkungsmechanismen im Beton ■

IGF-Vorhaben 19112 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektzeitraum: 04/2016 – 09/2018

#### Hintergrund und Ziele

Das Forschungsvorhaben knüpft an das Projekt „Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion durch den gezielten Einsatz von Steinkohlenflugasche als Zementhauptbestandteil“ (IGF 17249N; siehe Tätigkeitsbericht 2012-2015, S.124) an und verfolgt zwei Ziele. Zum Ersten wurde untersucht, wie sich die Eigenschaften flugaschehaltiger Zemente auf die Freisetzung von Aluminium in die Porenlösung auswirken, das einen deutlichen Einfluss auf die Löslichkeit von Silikaten und damit auf den Verlauf einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) zu haben scheint. Die Ergebnisse vervollständigen die umfassenden Erkenntnisse zu Wirkungsmechanismen von Flugasche und flugaschehaltiger Zemente zur Vorbeugung einer AKR. Zum Zweiten sollten Betonversuche mit gezielt ausgewählten flugaschehaltigen Laborzementen zeigen, welche Wirkungsmechanismen wie stark zur Vorbeugung einer schädigenden AKR beitragen.

#### Vorgehensweise

Unter anderem wurden aus einem Portlandzement und sechs verschiedenen Steinkohlenflugaschen durch Mischen Laborzemente mit 20, 30 oder 40 M.-% Flugasche hergestellt. Die Flugaschen wurden im Ausgangszustand (uG) und teilweise in aufbereiteter Form (gG: Grobanteil > 45  $\mu\text{m}$  abgesichtet, gemahlen und mit Feinanteil < 45  $\mu\text{m}$  gemischt) eingesetzt. Der Zustand gG stellte dabei das Ergebnis der für die Zementherstellung typischen Aufbereitung der Flugasche nach.

Die Laborzemente wurden mit einem Wasserzementwert (w/z) von 0,50 für bis zu 365 Tage bei 20 °C hydratisiert. Danach wurden aus den Zementsteinen Porenlösungen ausgepresst. In den Lösungen wurde photometrisch der Gehalt an Aluminium bestimmt.

Für die Betonversuche wurden Laborzemente mit 20 und 30 M.-% Flugasche eingesetzt. Um die Effekte der verschiedenen Wirkungsmechanismen trennen zu können, wurden Flugaschen mit hohen und niedrigen Alkaligehalten sowie hohen und niedrigen Gehalten an reaktionsfähigem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und Flugaschen in verschiedenen Aufbereitungszuständen (uG, gG) eingesetzt. Für die Untersuchungen kam der 60 °C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr von außen zum Einsatz.

### Ergebnisse/Stand der Arbeiten

In den Porenlösungen wurden nach 365 Tagen Hydratation 0,4 bis 2,4 mmol/l Aluminium (Al) gefunden. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass die Al-Konzentration in der Porenlösung im Wesentlichen von der Menge an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  abhing, die als „reaktives Aluminium“, also als Bestandteil des Flugascheglasses, in den Laborzement eingebracht wurde (Bild 3.4.9-1). Die Menge an gelöstem Al nahm mit steigendem Anteil an reaktivem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in der Flugasche und mit steigendem Flugascheanteil im Laborzement zu. Die Ergebnisse fallen für die zementtypisch aufbereitete Flugasche etwas günstiger aus. Es konnte gezeigt werden, dass über den gezielten Einsatz von Flugasche als Zementhauptbestandteil die Freisetzung von Al in die Porenlösung gesteuert und so die Wirkung des Zements hinsichtlich einer AKR-Vorbeugung optimiert werden kann.

Bei den Betonversuchen handelt es sich um Langzeitversuche. Daher sind endgültige Ergebnisse zum Einfluss der verschiedenen Wirkungsmechanismen von Flugasche zur AKR-Vorbeugung erst zum Ende der Projektlaufzeit zu erwarten.

### 3.4.10 Schädigungsmechanismen von Beton unter Frosteinwirkung: Einfluss von Zementhauptbestandteilen auf die innere Gefügeschädigung ■

IGF-Vorhaben 18439 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Zeitraum: 01/2015 – 06/2017

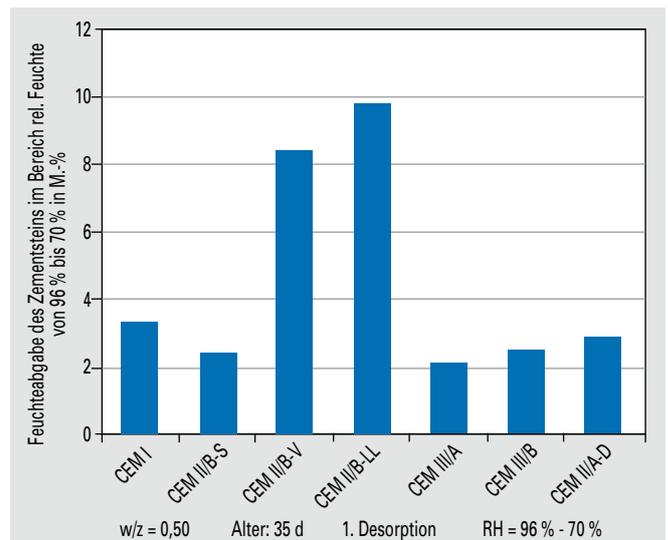
#### Hintergrund und Ziele

Ausgangspunkt des Forschungsvorhabens waren frühere Untersuchungen, in denen die Gefügeschädigung durch Frostbeanspruchung im CIF-Test (Capillary suction, Internal damage and Freeze-thaw test) gemäß dem Technischen Bericht CEN/TR 15177 bei Vorhandensein von Silikastaub deutlich ausgeprägt war. Der starke Abfall des relativen dynamischen E-Moduls während der Frostbeanspruchung wurde mit einer Gelbildung des Silicastaubs über Alkalisilicate begründet. Diese Gelbildung führte früh zu einer kritischen Sättigung der Poren im Beton mit Wasser.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Bindung und die Gefrierbarkeit des Wassers in Abhängigkeit von der Zementart zu charakterisieren und den Einfluss auf Gefügeschädigungen während der Frostbeanspruchung zu ermitteln.

#### Vorgehensweise

Es kamen Laborzemente mit den Hauptbestandteilen Klinker, Hüttensand, Kalkstein, Flugasche und Silicastaub zum Einsatz. Die Bindung des Wassers im Zementstein und das Porengefüge des Zementsteins wurden mittels Wasserdampfsorptionsisothermen und Quecksilberdruckporosimetrie charakterisiert. Die innere Schädigung des Betons unter Frostbeanspruchung wurde im CIF-



**Bild 3.4.10-1** Feuchteabgabe von Zementsteinen mit verschiedenen Zementen während der 1. Desorption im Bereich relativer Luftfeuchte von 96 % und 70 %

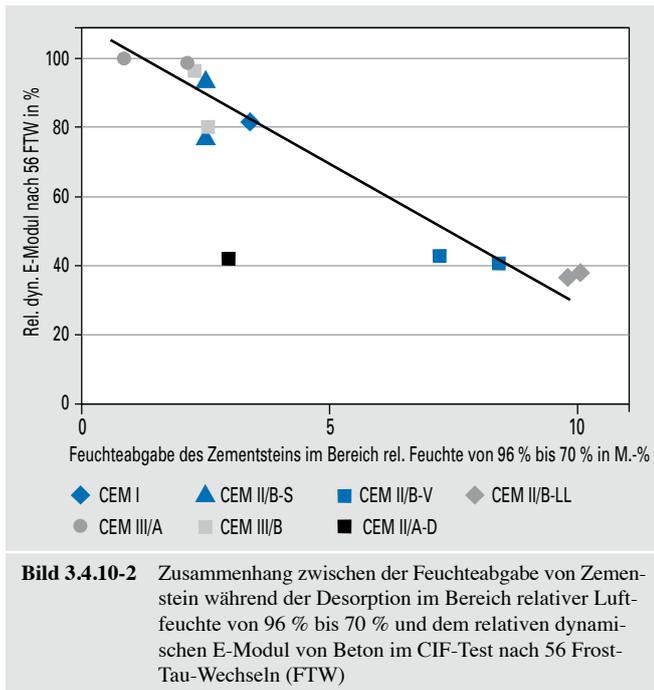
Test untersucht. Über den relativen Porenfüllungsgrad wurde die Sättigung des Betons ermittelt.

#### Ergebnisse

Im Sorptionsversuch wird bei einer definierten relativen Luftfeuchte der Ausgleichsfeuchtegehalt bestimmt. Anhand der Kelvingleichung kann für die betrachtete relative Luftfeuchte ein Porenradius im Zementstein zugeordnet werden, aus dem das Wasser desorbiert. Über die Verknüpfung der relativen Luftfeuchte mit dem Ausgleichsfeuchtegehalt des Zementsteins und der entsprechenden Porenradienverteilung kann geschlossen werden, über welche Bindungsart das Wasser überwiegend im Zementstein gebunden ist. Beispielsweise desorbiert im Bereich relativer Luftfeuchten zwischen 96 % und 70 % insbesondere kapillarkondensiertes sowie auch mehrschichtadsorbiertes Wasser aus Poren mit einem Radius zwischen etwa 26,5 und 3,0 nm. Im Bereich relativer Luftfeuchte von maximal 20 % desorbiert chemi- oder physisorbiertes Wasser aus Zementsteinporen mit deutlich kleinerem Radius bis maximal 0,7 nm.

Es wurde beobachtet, dass aus Zementsteinen mit Portlandflugaschezement bzw. mit Portlandkalksteinzement im Bereich relativer Luftfeuchten zwischen 96 und 70 % mehr Wasser desorbiert als aus Zementsteinen mit reinem Portlandzement, mit Portlandsilikastaubzement, mit Portlandhüttenzement sowie mit Hochofenzement (Bild 3.4.10-1). Demnach ist in Zementsteinen mit Portlandkalksteinzement und mit Portlandflugaschezement mehr Wasser über Kapillarkondensation sowie Mehrschichtadsorption gebunden als in Zementsteinen mit Portlandzement, mit Portlandsilikastaubzement, mit Portlandhüttenzement und mit Hochofenzement.

Ergebnisse aus der Quecksilberdruckporosimetrie der Zementsteine wurden den Wasserdampfsorptionsisothermen dieser Zementsteine gegenübergestellt. Bei Zementen mit einer hohen Kapillarporosität (Radien  $r \geq 0,01 \mu\text{m}$ ) wurde während der Desorption eine hohe Feuchteabgabe im Bereich relativer Luftfeuchte zwischen 96 und 70 Vol.-% beobachtet. Bei Zementsteinen mit hoher Kapillarporosität findet demnach gemäß der Kelvingleichung die Wasserbindung überwiegend über Kapillarkondensation statt.



**Bild 3.4.10-2** Zusammenhang zwischen der Feuchteabgabe von Zementstein während der Desorption im Bereich relativer Luftfeuchte von 96 % bis 70 % und dem relativen dynamischen E-Modul von Beton im CIF-Test nach 56 Frost-Tau-Wechseln (FTW)

Die Wasserdampfsorptionsisothermen der Zementsteine wurden den Ergebnissen aus der CIF-Prüfung gegenübergestellt. Für Zemente mit den weiteren Hauptbestandteilen Hüttensand, Flugasche und Kalkstein wurde folgender Zusammenhang beobachtet: Je höher die Feuchteabgabe während der Desorption im Bereich relativer Luftfeuchte zwischen 96 und 70 Vol.-% war, desto höher war der Abfall des relativen dynamischen E-Moduls nach 56 Frost-Tau-Wechseln im CIF-Test. Die Feuchteabgabe erfolgte hier im Wesentlichen aus den Zementsteinporen mit einem Radius zwischen 26,5 und 3,0 nm. Dieses Wasser war im Zementstein überwiegend über Kapillarkondensation gebunden (**Bild 3.4.10-2**). Lediglich mit dem Portlandsilikastaubzement war dieser Zusammenhang nicht erkennbar. Trotz geringer Wasserbindung im Zementstein über Kapillarkondensation wurde der Beton während der Frostbeanspruchung im CIF-Test stark geschädigt. Diese Beobachtung kann ggf. erklärt werden über die Hypothese aus dem früheren Forschungsvorhaben, dass gefrierbares Wasser in Alkalisilikaten gebunden wird.

Es zeigte sich somit, dass unter Verwendung verschiedener Zementarten Wasser in verschiedenen Porenbereichen des Zementsteins entweder überwiegend über Kapillarkondensation und Mehrschichtadsorption oder über Physi- und Chemisorption gebunden wird. Bei Betonen, in denen Wasser hauptsächlich über Kapillarkondensation gebunden ist, wurde eine starke Gefügeschädigung unter Frostbeanspruchung im CIF-Test beobachtet. Bei Betonen mit silikastaubhaltigen Zementen wurde ein starker Abfall des relativen dynamischen E-Moduls trotz geringer Wasserbindung über Kapillarkondensation beobachtet.

Die Bindung des Wassers im Zementstein korreliert mit Porengrößenkennwerten. Bei Zementsteinen mit hohem Kapillarporenanteil wird Wasser überwiegend über Kapillarkondensation im Zementstein gebunden.

Die Ergebnisse helfen, ein differenzierteres Verständnis sowohl für die Bindung des Wassers in der Zementsteinmatrix als auch für das Verhalten von Betonen im CIF-Test zu erlangen.

### 3.4.11 Granulometrie der Zementhauptbestandteile – Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit von Betonen mit kalksteinhaltigen Zementen ■

IGF-Vorhaben 17853 BG, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
 Projektpartner: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar  
 Projektzeitraum: 12/2013 – 11/2016

#### Hintergrund und Ziele

In dem Projekt mit dem F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde wurden kalksteinhaltige Zemente hergestellt und die granulometrischen Eigenschaften der Zemente bzw. ihrer Hauptbestandteile Klinker, Kalkstein, Hüttensand und Flugasche untersucht. Die Untersuchungsergebnisse wurden den dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften in Laborversuchen gegenübergestellt.

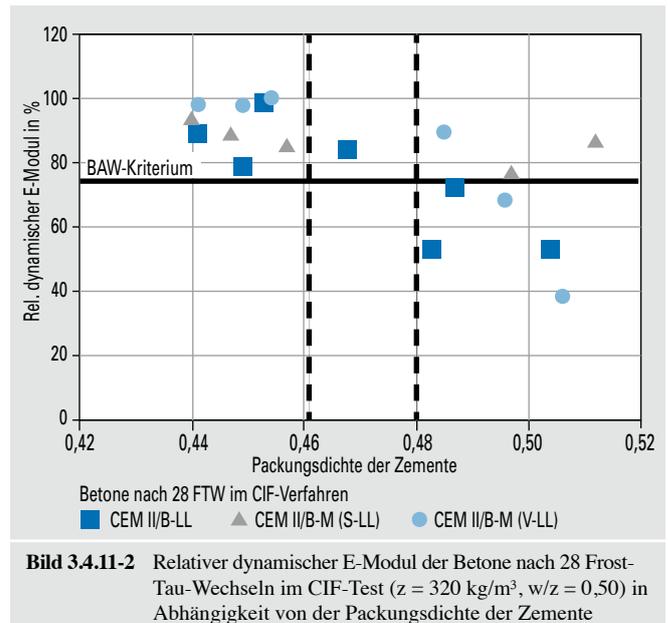
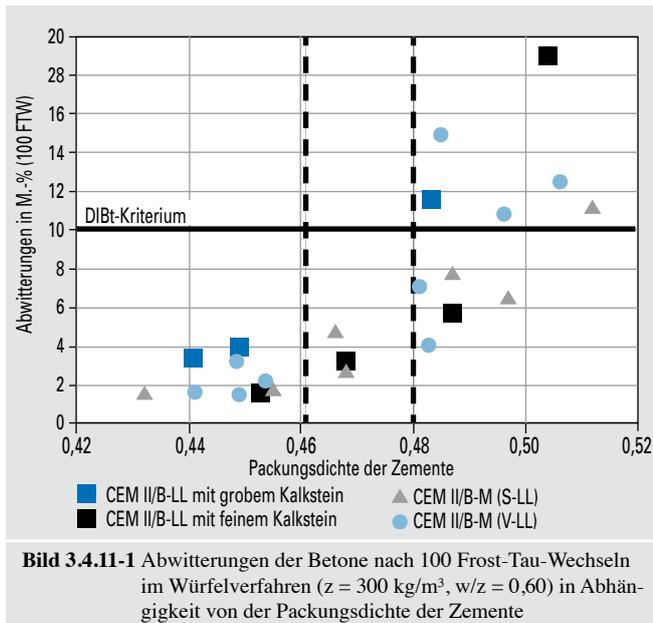
Ziel des Forschungsvorhabens war die Erarbeitung von Hinweisen zur Herstellung kalksteinhaltiger Zemente mit Zusammensetzungen nach DIN EN 197-1 sowie mit Zusammensetzungen außerhalb der Norm, die die in Deutschland (Zulassungsverfahren des Deutschen Instituts für Bautechnik, DIBt) geforderten dauerhaftigkeitsrelevanten Parameter (Verfahren und Kriterien) erfüllen. Die eingesetzten Verfahren haben Eingang gefunden in das Europäische Bewertungsdokument EAD 150001-00-0301 sowie in die Verfahrensgrundsätze CEN TR 16563 Anhang B. Es wurden systematische Untersuchungen zum Einfluss der granulometrischen Eigenschaften (z.B. der Korngrößenverteilung) der Zementhauptbestandteile bzw. zum Einfluss der Packungsdichte der Zemente auf die Dauerhaftigkeit der hieraus hergestellten Betone durchgeführt. Die Ermittlung der Zementeigenschaften erfolgte gemäß den Definitionen der DIN EN 197-1. Dies bedeutet z.B. für die Druckfestigkeit, dass diese bei konstantem Wasserzementwert (w/z) ermittelt wurde. Die Dauerhaftigkeitsprüfungen folgten der Logik von DIN EN 206-1/DIN 1045-2, wonach diese in konstanten Grenzzusammensetzungen durchgeführt werden. Dies bedeutet, dass die durch eine verbesserte Packungsdichte denkbare Verringerung des Wassergehaltes nicht in Ansatz gebracht wurde. Die granulometrisch definierten Zemente sollten über die in Deutschland geforderte Leistungsfähigkeit im Beton verfügen. Die grundlegenden Leistungsmerkmale für die Dauerhaftigkeit der mit diesen Zementen hergestellten Betone sollten in zulassungsfähigen Bereichen liegen. Eine Anpassung (Verringerung) des Wasserzementwertes zum Erreichen einer Zulassungsfähigkeit erfolgte nicht.

#### Vorgehensweise

Es wurden Zemente mit 35 bzw. 25 M.-% Kalkstein zusammen mit 10 M.-% Hüttensand bzw. 10 M.-% Flugasche hergestellt. Der überwiegende Teil der Versuchszemente wurde durch getrenntes Mahlen der Hauptbestandteile und anschließendes Mischen mit einem mehlfinen Sulfatträger erzeugt. Klinker, Kalkstein und Hüttensand wurden jeweils in zwei unterschiedlichen Mahlfeinheiten sowie in breiter bzw. in enger Korngrößenverteilung verwendet. Flugasche wurde im mehlfinen Originalzustand sowie im vollständig bzw. im selektiv gemahlten Zustand eingesetzt. Bei Variationen der granulometrischen Parameter blieb die stoffliche Zusammensetzung des Zements jeweils konstant.

#### Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass die Packungsdichten der CEM II/B-LL- bzw. CEM II/B-M-Zemente von der Korngrößenverteilung ihrer Hauptbestandteile beeinflusst werden. Da der Wertebereich



von Packungsdichten mehlfiner disperser Systeme eng begrenzt ist, lagen die Packungsdichten der in diesem Projekt untersuchten Zemente in Größenordnungen zwischen 0,42 (geringe Packungsdichte) und 0,52 (hohe Packungsdichte). Wurde z. B. ein Klinker hoher Mahlfeinheit (ca.  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$  nach Blaine) und enger Korngrößenverteilung ( $n > 1,0$  nach RRSB) mit einem Anteil von 65 M.-% eingesetzt, so wurden in den Zementen geringe Packungsdichten ( $< 0,46$ ) erreicht.

Für die Untersuchungen an Betonen, Feinbetonen und Normmörteln wurden Zemente ausgewählt, die sich in ihrer Packungsdichte entsprechend unterscheiden. Die Dauerhaftigkeit wurde jeweils bei einem Grenzwassermengewert geprüft.

Die Ergebnisse zeigen, dass an Zementen mit Packungsdichten  $> 0,48$  vergleichsweise geringe Werte für Wasseranspruch gemäß EN 196-3 und Normfestigkeiten ( $w/z = 0,50$ ) gemäß EN 196-1 ermittelt wurden. Wurde die Packungsdichte der Zemente auf  $< 0,46$  verringert, nahmen die Werte für Wasseranspruch und Normfestigkeit deutlich zu. Dementsprechend wurde auch die Verarbeitbarkeit der Frischbetone beeinflusst, bei  $w/z = 0,50$  wurden z. T. steife Konsistenzen festgestellt, wenn Zemente mit geringer Packungsdichte verwendet wurden.

Feinbetone, die nach einer Vorlagerung von sieben Tagen gemäß des Europäischen Bewertungsdokuments EAD 150001-00-0301, Verfahren lfd. Nr. 15, Methode  $C_{\text{dcr}}$  untersucht wurden, wiesen in Abhängigkeit vom Prüfalter umso höhere Carbonatisierungstiefen auf, je höher die Packungsdichte der Zemente war.

Die Untersuchungen an Betonen mit  $w/z = 0,60$  und Luftporenbetonen mit  $w/z = 0,50$  zeigten, dass der Frostwiderstand (Methode  $FT_{\text{cube}}$  gemäß Verfahren lfd. Nr. 17 EAD 150001-00-0301) und der Frost-Tausalz-Widerstand (Methode  $FTS_{\text{CDF}}$  gemäß Verfahren lfd. Nr. 18 EAD 15001-00-0301) mit abnehmender Packungsdichte der Zemente z. T. deutlich zunehmen und die entsprechenden Beurteilungskriterien (DIBt/Bundesanstalt für Wasserbau, BAW) für Abwitterungen eingehalten werden können (**Bild 3.4.11-1**). Zudem kann auch der im CIF-Test (Capillary suction, Internal damage and Freeze-thaw test/Methode  $FT_{\text{CF}}$  gemäß Verfahren lfd. Nr. 17 EAD 150001-00-0301) ermittelte relative dynamische E-Modul der Betone ( $w/z = 0,50$ ) – der als

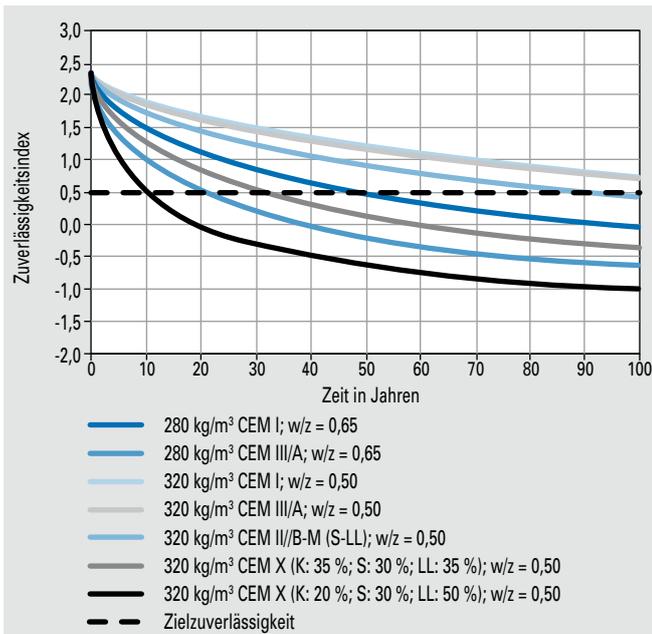
Maß der inneren Schädigung gilt – über die Packungsdichte der Zemente beeinflusst werden und Werte gemäß der Beurteilungskriterien für den Wasserbau (BAW) erzielen (**Bild 3.4.11-2**). Auf den Chlorideindringwiderstand der Betone (Methode  $D_{\text{mig}}$  gemäß Verfahren lfd. Nr. 16 EAD 150001-00-0301) hatte die Packungsdichte der hier untersuchten Zemente keinen nennenswerten Einfluss. Wurden die Hauptbestandteile Hüttensand bzw. Flugasche gezielt aufbereitet und mit vergleichsweise hoher Feinheit bzw. enger Korngrößenverteilung eingesetzt, so erreichten die Chloridmigrationskoeffizienten der CEM II/B-M-Betone ( $w/z = 0,50$ ) Werte deutlich unterhalb des Zulassungskriteriums des DIBt. Die Übertragbarkeit bzw. Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde an einigen Zementen aus anderen Herstellverfahren sowie mit anderen Zusammensetzungen bestätigt. Die Erfahrungen sollten in weiterführenden Untersuchungen an Betonen konstanter Verarbeitbarkeit bzw. mit angepassten Wassermengewerten ( $w/z \neq \text{konstant}$ ) unter Verwendung von granulometrisch optimierten Zementen mit hoher Packungsdichte überprüft und bestätigt werden.

### 3.4.12 Grenzzustandsbezogene Optimierung von Betonzusammensetzungen: Ein Schritt zur weiteren Reduzierung der $\text{CO}_2$ -Emissionen bei der Herstellung von Beton? ■

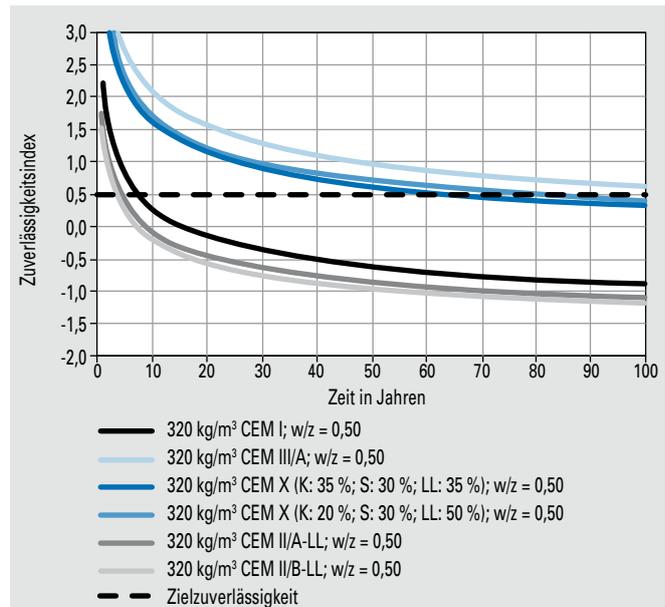
Forschungsvorhaben Nr. T218/24815/2013, gefördert durch die Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff-Stiftung  
Projektzeitraum: 07/2013 – 06/2017

#### Hintergrund und Ziele

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Ermittlung dauerhaftigkeitsrelevanter Materialparameter von Betonen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen bei Verwendung bekannter und teilweise neuer Zementarten. Die in Laborprüfungen ermittelten dauerhaftigkeitsrelevanten Kennwerte (z. B. Carbonatisierungsgeschwindigkeiten) bildeten die Eingangsgrößen für Grenzzustandsbetrachtungen nach fib (Fédération Internationale du Béton) Model Code „Service Life Design“ bzw. ISO 16204.



**Bild 3.4.12-1** Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex für den Grenzzustand Carbonatisierung



**Bild 3.4.12-2** Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex für den Grenzzustand Chlorideindringen

### Vorgehensweise

Die experimentellen Untersuchungen umfassten Versuche zum Carbonatisierungsverhalten und zum Chlorideindringwiderstand. Es wurden zwei Betonzusammensetzungen verwendet: B0 Zementgehalt  $z = 280 \text{ kg/m}^3$ , Wasserzementwert  $w/z = 0,65$  sowie B1  $z = 320 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,50$ . Es wurden einerseits Zemente eingesetzt, deren Verwendung in Deutschland für alle Expositionsklassen zugelassen ist (CEM I, CEM II/A-LL, CEM III/A). Weiterhin fanden neue Zemente Anwendung, für die es hinsichtlich Carbonatisierung und Chlorideindringen wenig bzw. keine Praxiserprobung gibt (CEM II/B-LL, CEM II/B-M (S-LL), CEM X).

Das Carbonatisierungsverhalten der Betone wurde mit verschiedenen Prüfverfahren sowohl bei natürlicher als auch bei erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration untersucht. Der Widerstand der Betone gegenüber eindringenden Chloriden wurde durch Chloridmigrations- und Chloriddiffusionsversuche untersucht, wobei jeweils das Alter zu Versuchsstart bzw. die Beaufschlagungsdauer variiert wurden.

Mit Grenzzustandsbetrachtungen wurde aufbauend auf den Versuchsergebnissen die rechnerische Leistungsfähigkeit der Betone bei der Verwendung in Stahlbetonbauteilen mit für Deutschland typischen Umgebungsbedingungen untersucht (Expositionsklassen XC3, XD2). Für die betrachteten Grenzzustände „Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung“ (kurz: Grenzzustand Carbonatisierung) und „Erreichen des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung“ (kurz: Grenzzustand Chlorideindringen) wurde die jeweilige Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex über der Zeit bis zum Erreichen des jeweiligen Grenzzustands ermittelt. Diese Zeitspanne wird nachfolgend als rechnerische „Lebensdauer“ bezeichnet und gibt die Dauer bis zum Unterschreiten eines minimalen Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 0,5$  (Zielzuverlässigkeit) an.

### Ergebnisse

Die Versuche zeigten Einflüsse der Zementart, des Wasserzementwertes und des Zementgehaltes auf das Carbonatisierungsverhalten. Wurde bei identischer Zusammensetzung des Betons die Zementart variiert, waren die bei natürlicher  $\text{CO}_2$ -Konzentration

bestimmten Carbonisierungstiefen umso größer, je geringer der Klinkergehalt des Zements war. Diese höheren Carbonisierungstiefen konnten teilweise durch eine hinsichtlich  $w/z$ -Wert und Zementgehalt optimierte Betonzusammensetzung (B1 statt B0) ausgeglichen werden.

In den Versuchen zum Chlorideindringen wurde eine deutliche Trennung der Ergebnisse in zwei Gruppen festgestellt. Die Betone mit den Zementarten CEM III/A und CEM X mit 30 M.-% Hüttensand zeigten vergleichsweise geringe Chloridmigrations- bzw. Chloriddiffusionskoeffizienten, während sich für die Betone mit den Zementarten CEM I, CEM II/A-LL und CEM II/B-LL unabhängig vom  $w/z$ -Wert und Zementgehalt deutlich höhere Werte ergaben.

Die probabilistischen Grenzzustandsberechnungen zur Carbonatisierung ergaben einen großen Wertebereich für die rechnerische „Lebensdauer“ der untersuchten Betone (**Bild 3.4.12-1**). Für die Betonzusammensetzung B1 in Kombination mit den Zementarten CEM I, CEM III/A und CEM II/B-M (S-LL) wurden hohe rechnerische „Lebensdauern“ von über 90 Jahren erreicht. Für die weiteren untersuchten Betone waren die rechnerischen „Lebensdauern“ geringer als die in der Regel für Stahlbetonbauwerke angesetzte Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren.

In den Untersuchungen zum Grenzzustand Chlorideindringen zeigte sich ein direkter Zusammenhang der Chloridmigrationskoeffizienten mit der rechnerischen „Lebensdauer“ (**Bild 3.4.12-2**). Für die Betone in der Zusammensetzung B1 mit der Zementart CEM X mit 30 M.-% Hüttensand wurden rechnerische „Lebensdauern“ von deutlich über 50 Jahren, bei Verwendung von CEM III/A mit rd. 50 % Hüttensand sogar von über 100 Jahren bestimmt. Die Betone mit CEM I, CEM II/A-LL und CEM II/B-LL erreichten dagegen rechnerische „Lebensdauern“ von weniger als 10 Jahren. Dies verdeutlicht beispielhaft den Unterschied zwischen der Formulierung von Dauerhaftigkeitsanforderungen auf Basis eines Grenzzustandes im Vergleich zu den Regelungen der Betonnorm DIN 1045-2. Die Regelungen der DIN 1045-2 stehen für eine mindestens 50-jährige Nutzungsdauer ohne makroskopisch sichtbare Korrosionsschäden.

### 3.4.13 Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation ■

Das Verbundforschungsvorhaben „R-Beton“ steht für „Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation“ und befasst sich mit der Aufbereitung und Anwendung rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Gesteinskörnung). Das Projekt umfasst die gesamte Wertschöpfungskette und greift alle Aspekte auf, die einer breiten Markteinführung des Werkstoffs R-Beton aus heutiger Sicht entgegenstehen. Der VDZ war mit einem Teilvorhaben in das Projekt eingebunden. Ziel war es u. a., einen „Leitfaden zur Verwendung von Brechsanden (feine RC-Gesteinskörnung) bei der Herstellung von Zement“ – im Rahmen des Projektes „R-Zement“ genannt – zu erstellen. Auch die ökologische Bewertung in Form einer Ökobilanz aus Sicht der Zement- und Betonherstellung gehörte zu den Arbeitszielen dieses Teilvorhabens. Des Weiteren sollte eine praxisgerechte Vorgehensweise zur zielsicheren Vermeidung einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion erarbeitet werden.

Verbundforschungsprojekt „R-Beton – Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation“, gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Förderbekanntmachung „Neue Werkstoffe für urbane Infrastrukturen – HighTechMatBau“  
Projektzeitraum: 11/2014 – 11/2017

#### 3.4.13.1 Teil 1: RC-Gesteinskörnung – Anwendung im Zement

##### Hintergrund und Ziele

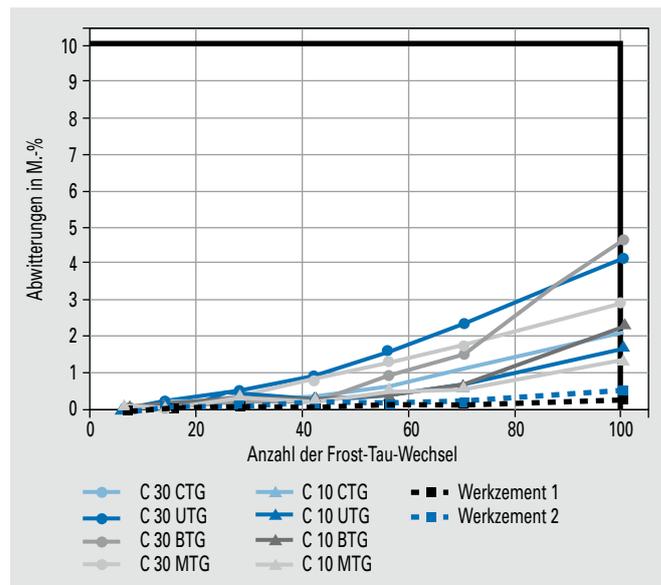
Feine rezyklierte Gesteinskörnungen, so genannte Brechsande, sind nicht als Hauptbestandteil gemäß DIN EN 197-1, Abschnitt 5.2, definiert und dürfen somit nicht im Zement genutzt werden. Zemente unter Verwendung von Brechsand als Hauptbestandteil bedürfen einer Zulassung. Im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit müssten dann voraussichtlich auch die in DIN 4226-101:2017-08 angegebenen Höchstwerte der Eluat- und Feststoffparameter eingehalten werden. Die in DIN EN 196-1 bzw. DIN EN 197-1 geforderten Zementeigenschaften müssen ebenso nachgewiesen werden wie die dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften.

##### Vorgehensweise

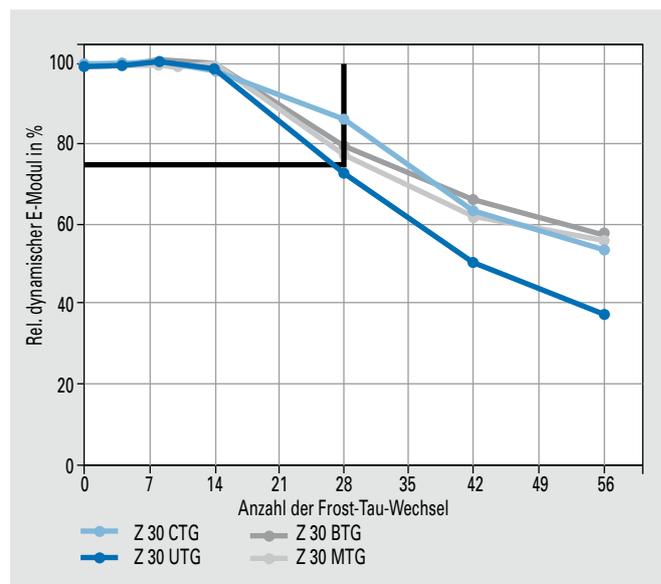
Die Grundlage der in diesem Projekt hergestellten R-Zemente (Laborzemente) bildeten Portlandzemente CEM I 42,5 R und 52,5 R. Die Brechsande unterschieden sich in ihrer Zusammensetzung (Herkunft), der Körnung und dem Aufbereitungsverfahren. Zur Anwendung kamen Brechsande aus der Aufbereitung von Bahnschwellen (CTG), Gleisschotter (UTG), Betonbruch (BTG) und Mauerwerksbruch (MTG). Die Brechsande wurden nach Anlieferung getrocknet und in einer diskontinuierlich arbeitenden Laborkugelmühle auf eine Feinheit von ca. 4000 cm<sup>2</sup>/g nach Blaine gemahlen. Die Portlandzemente wurden dann im Labor mit den mehlfinen Brechsanden zu R-Zementen gemischt. Zur Herstellung der Laborzemente wurden Anteile von 10 bzw. 30 M.-% Brechsand im Zement eingestellt. Darüber hinaus wurden großtechnische Betriebsversuche zur Herstellung von R-Zement durch gemeinsames Mahlen in einem Zementwerk durchgeführt. In den Werkzementen wurden Anteile von 8 bzw. 15 M.-% Brechsand eingestellt.

##### Ergebnisse

Die in den Labor- und Betriebsversuchen des VDZ verwendeten Brechsande erfüllten die Eluat- und Feststoffparameter der DIN



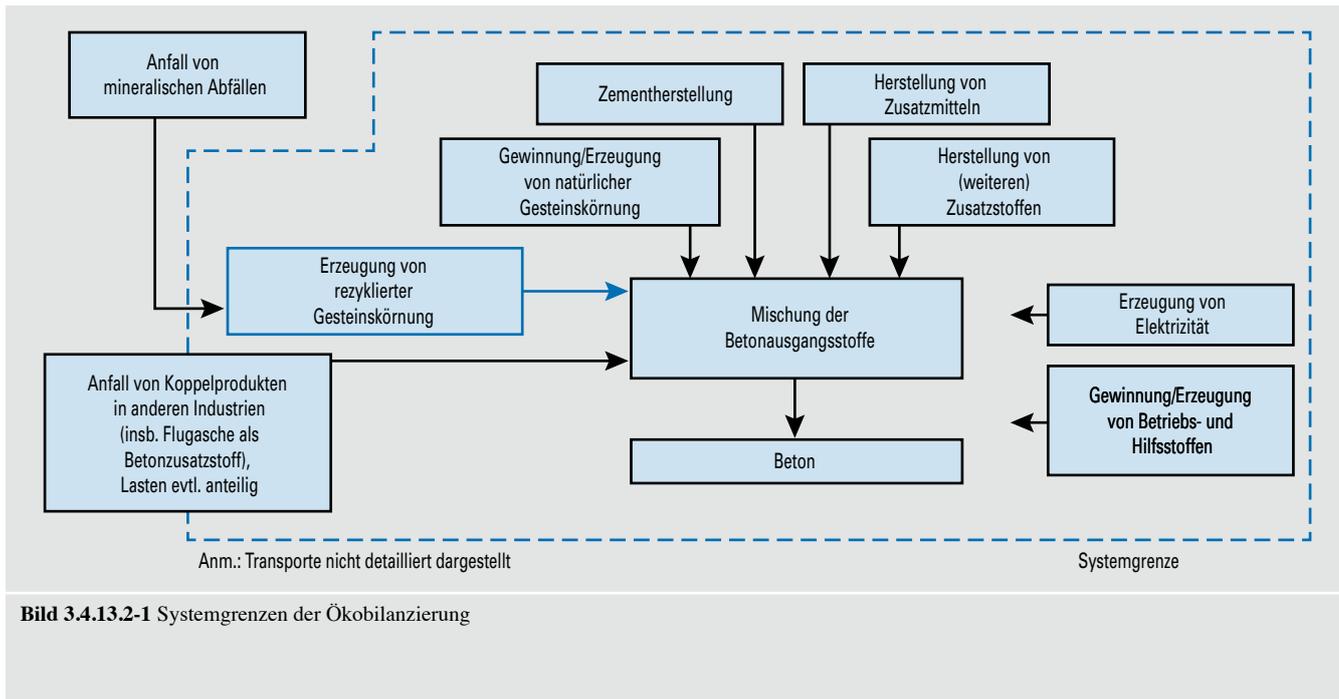
**Bild 3.4.13.1-1** Abwitterungen der Betone B 1 unter Verwendung der Labor- und Werkzemente im Würfelverfahren in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Betone mit  $z = 300 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,60$



**Bild 3.4.13.1-2** Relativer dynamischer E-Modul der Betone B2 im CIF-Test in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Betone mit  $z = 320 \text{ kg/m}^2$  und  $w/z = 0,50$

4226-101. Je nach stofflicher bzw. granulometrischer Zusammensetzung entsprachen die R-Zemente den Festigkeitsklassen 42,5 N bis 52,5 R gemäß DIN EN 197-1. Mit ausgewählten R-Zementen wurden Betone hergestellt und geprüft. Die Betone hatten folgende Zusammensetzungen: B1: Zementgehalt ( $z$ ) =  $300 \text{ kg/m}^3$ , Wasserzementwert ( $w/z$ ) =  $0,60$ ; B2:  $z = 320 \text{ kg/m}^2$ ,  $w/z = 0,50$ . Die Prüfungen zur Bestimmung des Frostwiderstandes wurden nach dem Würfelverfahren an den Betonen B1 durchgeführt. Sie entsprechen den Maßstäben, die bislang bei der Zulassung von Zementen durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) angelegt wurden. Für die Prüfung der Betone erfolgten bis zu 100 Frost-Tau-Wechsel (FTW) mit einem Wechsel pro Tag.

Die Abwitterungen der Betone zeigten nur geringe Unterschiede in Abhängigkeit von der Art der Brechsande. **Bild 3.4.13.1-1** ist zu



entnehmen, dass bei Anwendung von Laborzementen mit bis zu 30 M.-% Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R die Abwitterungen mit maximal 4,7 M.-% auf niedrigem Niveau lagen. Der in den Zulassungsprüfungen des DIBt verwendete Grenzwert für Abwitterungen von 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln wurde mit Abstand eingehalten. Unter Verwendung der R-Zemente mit 30 M.-% Brechsand in Kombination mit CEM I 52,5 R bzw. der R-Zemente mit 10 M.-% Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R wurden Betone B2 zur Untersuchung der inneren Gefügeschädigung (relativer dynamischer E-Modul) im CIF-Test hergestellt (Capillary suction, Internal damage and Freeze-thaw test).

Die Probekörper wurden gemäß dem Technischen Bericht CEN/TR 15177 hergestellt und untersucht. Die Prüfungen wurden über 56 Frost-Tau-Wechsel durchgeführt. **Bild 3.4.13.1-2** zeigt am Beispiel der R-Zemente mit 30 M.-% Brechsand in Kombination mit CEM I 52,5 R den Verlauf des relativen dynamischen E-Moduls der Betone in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel. Daraus geht hervor, dass drei von vier Betonen das Beurteilungskriterium für den CIF-Test nach Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) eingehalten haben und nach 28 Frost-Tau-Wechseln einen relativen dynamischen E-Modul von > 75 % erzielten. Der Beton, der mit dem R-Zement Z 30 UTG (Gleisschotter) hergestellt wurde, hielt das genannte Beurteilungskriterium nicht ein.

Betrachtet man alle im Projekt mit R-Zementen erzielten Ergebnisse zusammen, ist festzustellen, dass diese Zemente mit bis zu 30 % Brechsand mindestens in Innenbauteilbetonen eingesetzt werden könnten. Voraussetzung wäre ein kontinuierlicher, gleichmäßiger Stoffstrom von entsprechender Qualität zwischen Aufbereiter und Zementwerk.

### 3.4.13.2 Teil 2: RC-Gesteinskörnung – Ökobilanzierung der Zement- und Betonherstellung

#### Hintergrund und Ziele, Stand der Arbeiten

Die europäische Norm EN 15804 legt Regeln zur Ökobilanzierung von Bauprodukten fest. Der VDZ hat im Jahr 2017 in einer überarbeiteten Umweltproduktdeklaration nach EN 15804 die Ökobilanzdaten der Herstellung eines durchschnittlichen, in Deutschland produzierten Zements veröffentlicht. Als Grundlage für diese Ökobilanz dienten umweltrelevante Produktionsdaten der deutschen Zementwerke.

Im Arbeitspaket „Ökobilanzierung“ des Projekts R-Beton sollte zunächst der Frage nachgegangen werden, welchen Einfluss der Einsatz von Betonbrechsand auf die Ökobilanz der Zementherstellung hat. Zu berücksichtigen waren dabei insbesondere die Umweltlasten, die mit der Aufbereitung des Altbetons verbunden sind (Brechen, Sieben etc.) und der Ersatz von aktuell bei der Zementherstellung verwendeten Rohstoffen durch diese Brechsande. Ein Vergleich der veröffentlichten Verbandsdaten mit den neu ermittelten Ökobilanzparametern sollte zeigen, in welchem Maße der Einsatz von RC-Feinmaterial zur Reduzierung der Umweltwirkungen der Zementherstellung beitragen kann.

In ähnlicher Weise wie für Zement sollte auch der Frage nachgegangen werden, welchen Einfluss der Einsatz von RC-Gesteinskörnung auf die Ökobilanz der Herstellung von Beton haben kann. Im Jahr 2018 werden vom VDZ aktualisierte Ökobilanzen für Betone mit sechs verschiedenen Festigkeitsklassen erarbeitet, die auf typischen Betonrezepturen beruhen, welche von den Transportbeton- und Betonfertigteilverbänden Bundesverband Transportbeton e.V. (BTB) und Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e.V. (FDB) ermittelt worden waren. Diese in Umweltproduktdeklarationen veröffentlichten Ökobilanzen sollen zum Vergleich herangezogen werden. **Bild 3.4.13.2-1** zeigt die Systemgrenze der geplanten Ökobilanz, also die Übersicht der Prozesse bei der Betonherstellung, deren Einflüsse auf die Umwelt erfasst und bewertet werden sollen.

### 3.4.13.3 Teil 3: Bewertung der Alkaliempfindlichkeit rezyklierter Gesteinskörnungen

#### Hintergrund und Ziele

Bei Gesteinskörnungen für Beton nach EN 206-1 und DIN 1045-2 ist die Alkaliempfindlichkeitsklasse anzugeben. Der Betonhersteller kann dann bei Bedarf vorbeugende Maßnahmen anwenden, um Schäden infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) zu vermeiden. Bis zur Ausgabe 2010 der DAfStb-Richtlinie Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton) waren bei rezyklierten Gesteinskörnungen, die nicht eindeutig einer unbedenklichen Alkaliempfindlichkeitsklasse zugeordnet werden konnten, Maßnahmen für E III-O-Gesteinskörnungen anzuwenden (**Tabelle 3.4.13.3-1**). Seit 2007 (nach Alkali-Richtlinie) bzw. 2010 (gemäß DAfStb-Richtlinie Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen) sind die rezyklierten Gesteinskörnungen in diesem Fall in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S einzuordnen. Dadurch änderten sich die vorbeugenden Maßnahmen (siehe **Tabelle 3.4.13-1**). Im Projekt „R-Beton – Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation“ (Teilvorhaben 5) wurde diese Änderung durch AKR-Performance-Prüfungen an Betonen überprüft.

#### Vorgehensweise

Zur Überprüfung der in **Tabelle 3.4.13.3-1** markierten Maßnahme bei E III-S-Gesteinskörnungen wurden mit rezyklierten Gesteinskörnungen ungünstig zusammengesetzte Betone hergestellt. Ungünstig bedeutet, dass die Voraussetzung für eine schädigende AKR durch alkaliempfindliche Gesteinskörnungen im Ausgangsbeton und einen hohen Alkaligehalt des Zements gegeben sind. Die rezyklierte Gesteinskörnung der Betone wurde aus Betonwürfeln gewonnen, die für AKR-Untersuchungen viele Jahre im Außenlager des VDZ lagerten (**Bild 3.4.13.3-1**). Die Betone wurden seinerzeit mit einem Gemisch aus 15 % alkaliempfindlichem Kies mit Opalsandstein und Flint 2/8 der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-O – E III-OF und 85 % Rheinkiesand der Alkaliempfindlichkeitsklasse E I hergestellt. Diese Zusammensetzung wurde in den 1970er Jahren in umfangreichen Untersuchungen des VDZ als die ungünstigste Variante identifiziert. Das Gesteinskörnungsgemisch wurde deshalb in der Vergangenheit als Referenz-Gesteinskörnung zum Nachweis des niedrigen wirksamen Alkaligehalts von Zementen nach DIN 1164-10 (NA-Zement) eingesetzt.

Der AKR-Widerstand der Betone der Feuchtigkeitsklasse WF (feuchte Umgebung) wurde mit dem 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr untersucht. Der Prüfverlauf entspricht dem 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie, Anhang C. Das Verfahren wird bereits seit 2004 in Frankreich (AFNOR P18-454) und in der Schweiz (Merkblatt SIA 2042) zur Bewertung der Alkaliaktivität von Betonen angewendet.

#### Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass bei rezyklierten Gesteinskörnungen die aktuellen (E III-S)-Maßnahmen nicht in allen Fällen ausreichend sind (**Bild 3.4.13.3-2**). Die Dehnungen der zwei Betone im 60 °C-Betonversuch überschreiten den in Frankreich und der Schweiz angewendeten und in AFNOR FD P 18-456 festgelegten Grenzwert von 0,2 mm/m nach 140 Tagen deutlich.

#### Empfehlung des DAfStb

Aufgrund der Ergebnisse empfiehlt der DAfStb, rezyklierte Gesteinskörnungen wie vor 2007 bzw. 2010 als Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-O zu behandeln, wenn diese aus Betonbauwerken in dem in der Alkali-Richtlinie festgelegten

**Tabelle 3.4.13.3-1** Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton nach Alkali-Richtlinie, Ausgabe 2013

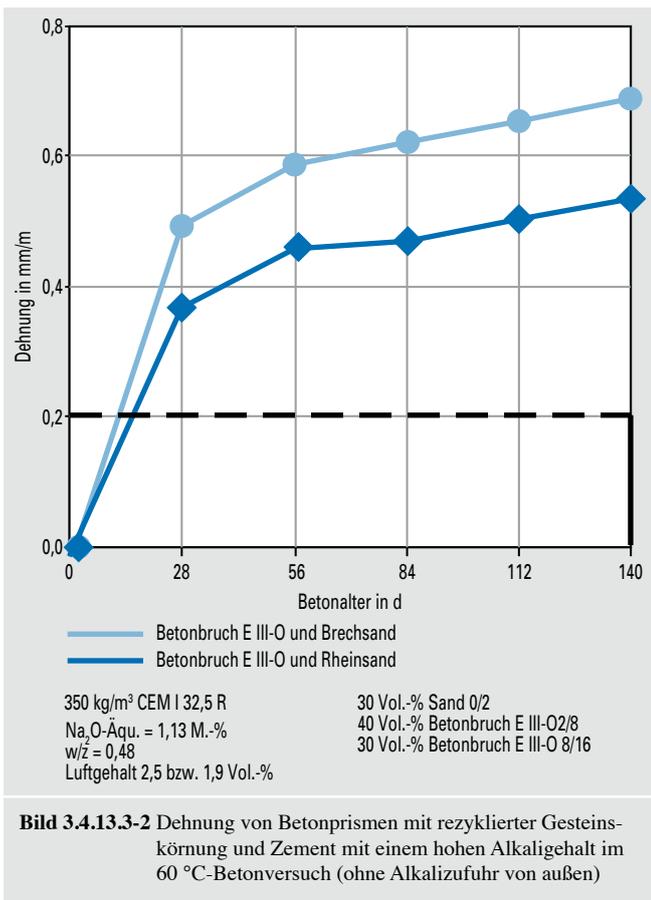
Alkaliempfindlichkeitsklasse	Zementgehalt in kg/m <sup>3</sup>	Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse			
		WO (trocken)	WF (feucht)	WA (feucht + Alkalizufuhr)	
E I, E I-O, E I-OF, E I-S	ohne Festlegung	keine	keine		
E II-O	≤ 330		keine	NA-Zement	
E III-O			NA-Zement	Austausch der Gesteinskörnung	
E II-OF			NA-Zement		
E III-OF	> 330		NA-Zement	Austausch der Gesteinskörnung	
E III-S	≤ 300		keine	keine	
	≤ 350			NA-Zement oder gutachtliche Stellungnahme <sup>1)</sup>	
	> 350			NA-Zement oder gutachtliche Stellungnahme <sup>1)</sup>	Austausch der Gesteinskörnung oder gutachtliche Stellungnahme <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Für die Erstellung einer gutachtlichen Stellungnahme sind besonders fachkundige Personen einzuschalten.



**Bild 3.4.13.3-1** Betonwürfel und -prismen im Außenlager des VDZ zur Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnung

eiszeitlichen Ablagerungsgebiet in Norddeutschland stammen und für die Gesteinskörnung ein Nachweis der Unbedenklichkeit nicht möglich ist oder nicht durchgeführt wird. Im restlichen Teil Deutschlands können rezyklierte Gesteinskörnungen, für die ein Nachweis der Unbedenklichkeit nicht möglich ist oder nicht durchgeführt wird, weiterhin in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S eingestuft werden.



### 3.4.14 Wechselwirkungen zwischen Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen und Methylcellulosen sowie deren Leistungsfähigkeit in modernen, mineralischen Trockenmörteln ■

IGF-Vorhaben 17929 BG, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
 Projektpartner: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar  
 Projektzeitraum: 01/2014 – 09/2016

#### Hintergrund und Ziele

In Beton sowie in Putz- und Mauermörtel haben sich Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen seit Jahrzehnten bewährt. Bei komplexen zementären Zubereitungen (z. B. Kleber für Fliesen und Platten), die den größten Anteil am Trockenmörtel haben, wird noch vorrangig Portlandzement eingesetzt. Dies liegt daran, dass Kenntnisse zur Leistungsfähigkeit von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen in diesen Systemen bislang fehlten und Qualitätseinbußen entsprechender Produkte befürchtet wurden.

Ziel war es nun, die Leistungsfähigkeit von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen in Trockenmörtel zu bestimmen. An einer Modellrezeptur für Fliesenkleber wurden dazu anwendungsorientiert die Benetzungsfähigkeit, die Offenzeit, das Abrutschen und die Haftzugfestigkeit ermittelt. Grundlagenorientiert wurden Wechselwirkungen der Zemente mit Celluloseethern bestimmt. Celluloseether ermöglichen eine verarbeitbare Konsistenz und die nötige Wasserretention, verzögern die Gefügeentwicklung und erhöhen die Porosität.

#### Vorgehensweise

Der Trockenmörtel bestand aus 30 M.-% Zement und 70 M.-% Quarzsand (0,5 mm Größtkorn). Hinzu kamen 0,35 M.-% Celluloseether (CE). Es wurden zwei im Handel erhältliche Methylhydroxyethylcellulosen mit Substitutionsgraden (DS) von 1,76 und 1,55 verwendet. Der CE mit DS = 1,76 wurde mit 20 M.-% Stärkeether bzw. 5 M.-% Polyacrylamid modifiziert. Portlandzement CEM I 52,5 R wurde als Referenz sowie für die Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen eingesetzt. Durch Mischen wurden Zemente mit 35 M.-% Kalkstein, Hüttensand oder Flugasche bzw. 55 M.-% Hüttensand oder Flugasche hergestellt. Die Zemente erfüllten die Anforderungen der EN 197-1.

#### Ergebnisse

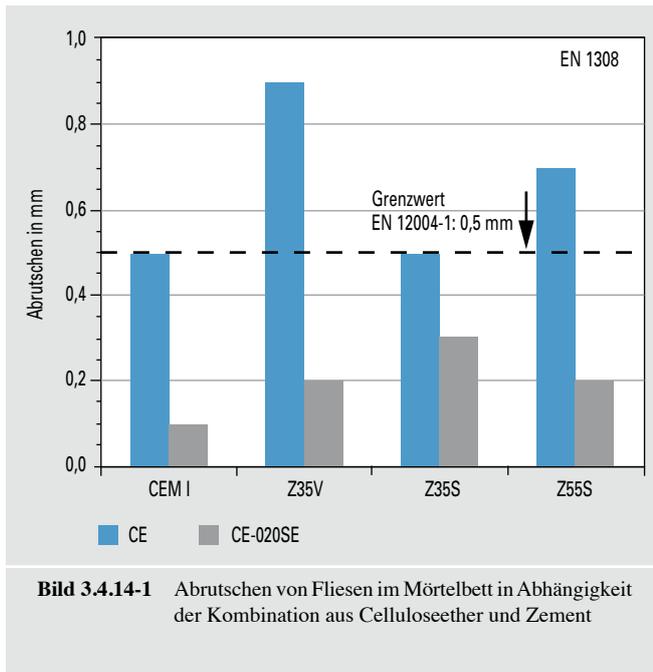
Der mit 5 M.-% Polyacrylamid modifizierte CE ergab (unabhängig vom Zement) steifere Mörtelkonsistenzen als die übrigen CE, die sich in der Wirkung nicht wesentlich unterschieden. Die Wasserretention wurde durch die Art des CE nicht wesentlich beeinflusst. Bei Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen war weniger Zugabewasser für die gleiche Konsistenz bzw. Wasserretention erforderlich. Geringere Wassergehalte führten zu einer beschleunigten Festigkeitsentwicklung und verbesserten Dauerhaftigkeit.

Die CE verzögerten erwartungsgemäß die Zementhydratation und die Gefügeentwicklung der Mörtel. Die verzögernde Wirkung der CE erhöhte sich bei allen Zementen mit sinkendem DS. Die Modifikation mit Stärkeether verzögerte mehr als die mit Polyacrylamid. Die für Portlandzement bekannten Einflüsse von DS und Stärkeether auf die Hydratation und Gefügeentwicklung sind so auf Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen übertragbar. Wurde bei gleichbleibender Menge an CE der Portlandzement durch Zemente mit Hüttensand oder Flugasche ausgetauscht, wurde keine weitere deutliche Verzögerung gemessen.

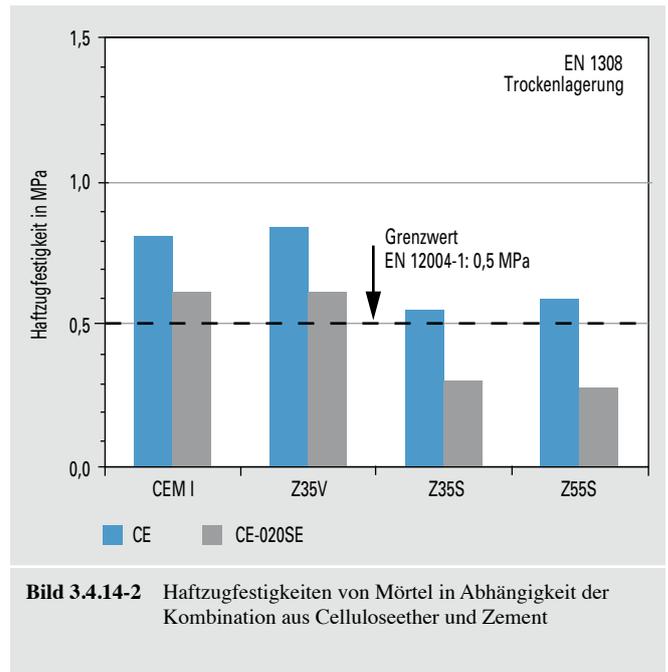
Die Mörtel mit CE wiesen infolge der luftstabilisierenden CE-Wirkung wie erwartet höhere Porositäten auf als die anderen Mörtel. Durch die CE wurden die Maxima der Porenvolumenverteilung von rd. 0,1 µm auf rd. 1 µm bis rd. 5 µm verschoben.

Im Vergleich zu Mörtel mit Portlandzement führten flugasche- bzw. hüttensandhaltige Zemente zur besseren Benetzung der Fliesen und zu längeren Offenzeiten. Durch den Einsatz immer größerer Fliesen und Platten ist geringes Abrutschen heute eine zentrale Anforderung an Kleber. Bei Verwendung der Modifikation mit 20 M.-% Stärkeether (CE-020SE) wurde (unabhängig vom Zement) der Grenzwert der EN 12004-1 sicher unterschritten (**Bild 3.4.14-1**). Bei Einsatz des nicht modifizierten CE war das Abrutschen erwartungsgemäß größer und der Grenzwert wurde in zwei Fällen überschritten. Wurde der nicht modifizierte CE verwendet, konnte mit allen Zementen die Anforderung an die Haftzugfestigkeit nach Trocken-, Wasser- und Frost-Tauwechsel-Lagerung erfüllt werden. Die Stärkeethermodifikation führte zu geringeren Werten, die in Kombination mit hüttensandhaltigem Zement nach Trockenlagerung unterhalb des Grenzwerts lagen (**Bild 3.4.14-2**).

Die Ergebnisse zeigen, dass es grundsätzlich möglich ist, ressourcenschonende Zemente mit einem durch weitere Hauptbestandteile deutlich reduzierten Klinkeranteil und dadurch erheblich verringerter spezifischer CO<sub>2</sub>-Emission auch in komplexen zementären Zubereitungen (z. B. Fliesenkleber) einzusetzen. Dies ist im Hinblick auf den Aspekt der Nachhaltigkeit von besonderem Interesse. Die Befürchtung, dass die solche Zemente enthaltenden Mörtel eine deutlich geringere Leistungsfähigkeit aufweisen könnten, hat sich nicht bestätigt. Vielmehr zeigte sich, dass von Portlandzement



**Bild 3.4.14-1** Abrutschen von Fliesen im Mörtelbett in Abhängigkeit der Kombination aus Celluloseether und Zement



**Bild 3.4.14-2** Haftzugfestigkeiten von Mörtel in Abhängigkeit der Kombination aus Celluloseether und Zement

abweichende Leistungsmerkmale vorteilhaft genutzt bzw. über Zusatzmittel angepasst werden können.

### 3.4.15 Optimale Verdichtung leichtverarbeitbarer Betone mit hoher Robustheit ■

IGF-Vorhaben 19276 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
 Projektpartner: TU München (Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen)

Projektzeitraum: 11/2016 – 04/2019

#### Hintergrund und Ziele

Leichtverarbeitbare Betone (LVB) mit fließfähiger bis sehr fließfähiger Konsistenz (Konsistenzklassen F5 und F6) eignen sich sehr gut, um Bauteile mit erhöhten Anforderungen an die Ästhetik und Dauerhaftigkeit bei kurzen Bauzeiten herzustellen. Durch die hohe Fließfähigkeit können zeitaufwendige Prozesse, wie das Verteilen des Betons in der Schalung und das Verdichten sowie das Nachbearbeiten der Betonoberfläche nach dem Einbau, auf ein Minimum reduziert werden. Die Betone müssen hierfür so eingestellt werden, dass bereits eine geringe Verdichtungsarbeit zur Entlüftung der Betone führt.

Die Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung von LVB auf der Baustelle ist eine bedarfsgerechte Verdichtung in Kombination mit einer robusten Betonzusammensetzung. Die notwendige Verdichtungsarbeit ist insbesondere von der Bauteilgeometrie, der Frischbetonkonsistenz und der Betonzusammensetzung abhängig. Für die richtige Wahl der Verdichtungsarbeit von LVB liegen bislang keine ausreichenden objektiven Bewertungskriterien vor. Bei einer Überverdichtung kann es zum Bluten oder zur Sedimentation der groben Gesteinskörnung kommen. Dies kann die Festigkeits-, Verformungs- und Dauerhaftigkeitseigenschaften des Festbetons beeinträchtigen.

Ziel des IGF-Vorhabens 19276 N ist es, grundlegende Erkenntnisse zur praxisingerechten Zuordnung der erforderlichen Verarbeitungs- bzw. Verdichtungsmethoden in Abhängigkeit von der Frischbetoneigenschaften zu gewinnen.

#### Vorgehensweise

Für die Untersuchungen werden die Konsistenz und die rheologischen Eigenschaften von Betonen gezielt variiert und die Betone in Abhängigkeit dieser Kenngrößen unterschiedlichen Verarbeitungsklassen zugeordnet. Anschließend wird die Wirkung verschiedener Verarbeitungs- und Verdichtungsmethoden auf die Frischbetoneigenschaften (Luftporengehalt, Blutneigung, Sedimentationsbeständigkeit usw.) und Festbetoneigenschaften (Rohdichte, Druckfestigkeit usw.) untersucht. Somit können Betone mit robusten Frisch- und Festbetoneigenschaften identifiziert und bedarfsgerechte Verarbeitungs- und Verdichtungsmethoden definiert werden. Aus den Ergebnissen soll ein Leitfaden für die bedarfsgerechte Verarbeitung und Verdichtung von LVB auf der Baustelle erstellt werden. Dieser soll helfen, Fehlanwendungen zu vermeiden und dadurch die Qualität der Bauweise steigern.

#### Stand der Arbeiten

Um die im Labor generierten Ergebnisse in die Praxis übertragen zu können, erfolgte zunächst eine Anbindung der Verdichtung im Labor (Rütteltisch mit steuerbarer Frequenz) an die Verdichtungswirkung von Praxismethoden (Stochern, Rakeln, Innenrüttler). Um die Vergleichbarkeit der Verdichtungswirkung zu überprüfen, wurden der Luftgehalt des Frischbetons und die Betondruckfestigkeit nach unterschiedlichen Praxis- und Laborverdichtungsszenarien bestimmt.

Zur Definition von Verarbeitungsklassen wurden die Konsistenz und die Viskosität der Betone gezielt variiert. Es wurden zunächst drei Referenzrezepturen für LVB mit unterschiedlichen äquivalenten Wasserzementwerten ( $w/z_{eq}$  bei gleichem Leimgehalt und gleichen Feinstoffzusammensetzungen (Zement/Flugasche-Verhältnis) ausgewählt. Durch die Wahl eines niedrigen ( $w/z_{eq} = 0,30$ ), eines mittleren ( $w/z_{eq} = 0,46$ ) und eines hohen äquivalenten Wasserzementwertes ( $w/z_{eq} = 0,75$ ) wurden leichtverarbeitbare Betone mit hoher, mittlerer



**Bild 3.4.15-1** Gefüge eines mittelviskosen LVB nach Verdichtung mittels Rakeln (links) bzw. nach Verdichtung auf dem Rütteltisch ( $f = 50$  Hz) für jeweils 20 Sekunden in drei Lagen (rechts); markierter Bereich: Sichtbare Sedimentation der groben Gesteinskörnung



**Bild 3.4.15-2** Gefüge eines niedrigviskosen LVB nach Verdichtung mittels Rakeln (links) bzw. nach Verdichtung auf dem Rütteltisch ( $f = 50$  Hz) für jeweils 20 Sekunden in drei Lagen (rechts); markierte Bereiche: Sichtbare Sedimentation der groben Gesteinskörnung

und niedriger Viskosität konzipiert. Die Konsistenz der Betone wurde mit einem PCE-Fließmittel (Polycarboxylatether) eingestellt. Dabei erfolgte eine Einteilung in LVB mit hoher Fließfähigkeit (Ausbreitmaß  $a = 68 \pm 3$  cm), LVB mit mittlerer Fließfähigkeit ( $a = 62 \pm 3$  cm) und LVB mit geringer Fließfähigkeit ( $a = 56 \pm 3$  cm). Um den Bereich potentieller Verarbeitungseigenschaften von LVB möglichst vollumfänglich zu erfassen, wurden zusätzlich die Zementart, die Art und Menge der Betonzusatzstoffe und der groben Gesteinskörnung (Austausch von Kies durch Splitt) variiert.

Zudem wurden die Zusammenhänge zwischen der Verdichtungseinwirkung und den resultierenden Frisch- und Festbetoneigenschaften der LVB in Abhängigkeit der Verarbeitungsklassen quantifiziert. Im weiteren Projektverlauf (nach dem Redaktionsschluss für diesen Tätigkeitsbericht) werden am Frischbeton nach unterschiedlichen Verdichtungsszenarien der Luftgehalt, das Bluten mit dem Eimerverfahren und die Sedimentation der groben Gesteinskörnung mit dem Auswaschversuch in Anlehnung an die SVB-Richtlinie (Selbstverdichtender Beton) ermittelt. Am Festbeton werden die Druckfestigkeit, die Festbetonrohichte, die Wasseraufnahme sowie die Sedimentation der groben Gesteinskörnung an Schnittbildern bestimmt. **Bild 3.4.15-1** und **Bild 3.4.15-2** zeigen beispielhaft das Gefüge eines mittelviskosen LVB mit mittlerer Fließfähigkeit ( $320 \text{ kg/m}^3$  CEM I 42,5 N,  $90 \text{ kg/m}^3$  Steinkohlenflugasche,  $w/z_{\text{eq}} = 0,46$ , Sieblinie A/B 16) und eines niedrigviskosen LVB mit hoher Fließfähigkeit ( $240 \text{ kg/m}^3$  CEM I 42,5 N,  $67 \text{ kg/m}^3$  Steinkohlenflugasche,  $w/z_{\text{eq}} = 0,75$ , Sieblinie A/B 16) nach unterschiedlichen Verdichtungsszenarien. Der Vergleich der Schnittbilder und insbesondere der durch Rechtecke markierten Bereiche verdeutlicht, dass der niedrigviskose LVB hinsichtlich des Absinkens der groben Gesteinskörnung empfindlicher auf die Verdichtungseinwirkung reagiert als der mittelviskose LVB, demgegenüber aber bei Verdichtung mittels Rakeln weniger sichtbare Luftporen zeigt.

Durch das Zusammenführen der Ergebnisse der Frisch- und Festbetonuntersuchungen soll für jede Verarbeitungsklasse eine bedarfsgerechte Verdichtung bestimmt werden. Die bedarfsgerechte Verdichtung wird eingegrenzt durch den Betrag der Verdichtungsenergie, der minimal zur Entlüftung notwendig ist, und den Betrag, der maximal eingebracht werden darf, ohne Bluten oder Sedimentation der groben Gesteinskörnung zu bewirken.

### 3.4.16 Frost-Tausalz-Widerstand zweischichtiger Betonpflastersteine – Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Laborprüfverfahren ■

IGF-Vorhaben 17996 N, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF  
Projektpartner: Universität Kassel  
Projektzeitraum: 12/2013 – 11/2016

#### Hintergrund und Ziele

Seit 2005 müssen Hersteller den Frost-Tausalz-Widerstand von Betonpflastersteinen mit dem modifizierten Slab-Test nach DIN EN 1338 (im Folgenden vereinfacht Slab-Test genannt) nachweisen. Von manchen Auftraggebern in Deutschland wird das CDF-Verfahren (Capillary Suction, De-icing agent and Freezethaw-test; DIN CEN/TS 12390-9) favorisiert, auch wenn es z. T. Diskrepanzen zwischen Laborprüfergebnissen und dem Praxisverhalten verlegter Steine gibt. So löste sich trotz bestandener CDF-Prüfung vereinzelt der Vorsatz verlegter Betonpflastersteine nach wenigen Wintern vom Kernbeton.

#### Vorgehensweise

Betonpflastersteine aus großtechnischer Produktion verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Fertigeinstellungen/ unterschiedlicher Betonzusammensetzung wurden auf einem rd.  $1 \text{ m}^2$  großem Splittbett verlegt und in Frostkammern bei niedrigen Lufttemperaturen, Beregnung und unter Bestreuung mit Tausalz untersucht. Die Einstellung der Temperatur und der Feuchte orientierte sich an mehrjährig aufgezeichneten Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes in Orten der Frosteinwirkungszonen 1 bis 3 gemäß RStO2012 (Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe 2012). Die Frost-Tauwechsel-Zyklen in den Frostkammern erfolgten zu rd. 83 % der Beaufschlagungszeit zwischen  $+20$  °C und  $-6$  °C und zu rd. 17 % der Beaufschlagungszeit zwischen  $+20$  und  $-15$  °C. Zwei Regeneignisse pro Woche wurden mit 1 Liter Leitungswasser je  $\text{m}^2$  Pflasterfläche simuliert. Die aufgestreuten Tausalzmengen (Natriumchlorid) wurden nach einem Handstreuversuch mit  $130 \text{ g/m}^2$  und Woche festgelegt. Neben Betonpflastersteinen aus Werksproduktion wurden Betonpflastersteine aus einer Technikumsanlage in die Untersuchungen mit einbezogen.

**Tabelle 3.4.16-1** Ergebnisvergleich der Untersuchungen von Betonpflastersteinen aus großtechnischer Produktion

Sorte	Frostkammeruntersuchung		Slab-Test Abwitterung in g/m <sup>2</sup>			CDF-Verfahren Abwitterung in g/m <sup>2</sup>			Übereinstimmung
	Schädigung (FTW)	USL in $\mu\text{s}$ min-max (MW)	LD	MD	HD	LD	MD	HD	SLT/CDF/FK
1	Keine (1039)	n. b. <sup>1)</sup>	4,5	7,5	4,5	58	55	159	+
2	Keine (1039)	n. b. <sup>1)</sup>	n. b.	7,0	n. b.	38	358	111	+
3	Keine <sup>2)</sup> (1 334)	30,9 ... 35,0 (33,0)	n. b.	27	n. b.	63	178	66	+
4	Keine <sup>3)</sup> (1 322)	31,8 ... 35,5 (33,0)	n. b.	6,8	n. b.	n. b.	46	n. b.	+
5	Risse (958) Abplatz. <sup>4)</sup> (1 334)	32,8 ... 123,0 (55,8)	n. b.	6,5	n. b.	168	88	60	-
6	Risse, Schollen (1 334) <sup>5)</sup>	31,8 ... 35,5 (33,3) <sup>5)</sup>	n. b.	8,0	n. b.	84	40	38	-

Abkürzungen USL – Ultraschalllaufzeit, SLT – Slab-Test, CDF – CDF-Verfahren, FK – Frostkammer, LD/MD/HD – Betonpflastersteine mit geringer/mittlerer/hoher Rohdichte, n. b. – nicht bestimmt

<sup>1)</sup> keine Schädigungen am Vorsatz nach 1039 FTW (24/13/11 Winter in FEZ 1/2/3) aus Kapazitätsgründen ausgebaut

<sup>2)</sup> keine Schädigungen am Vorsatz nach 1334 FTW (31/17/15 Winter in FEZ 1/2/3)

<sup>3)</sup> keine Schädigungen am Vorsatz nach 1322 FTW (31/17/15 Winter in FEZ 1/2/3)

<sup>4)</sup> erste Risse nach 958 FTW (30/17/15 Winter in FEZ 1/2/3) – abplatzende Vorsätze nach 1334 FTW

<sup>5)</sup> erste Risse an den Ecken/Kanten und beginnende abblätternde Vorsätze (Schollenbildung) nach 1334 FTW

## Ergebnisse/Schlussfolgerungen

### 1. Betonpflastersteine aus großtechnischer Herstellung:

Die Vorsatzbetone der Sorten 1 und 2 bzw. 3 und 4 wiesen nach 1039 bzw. 1334 Frost-Tau-Wechseln (FTW) in der Frostkammer keine sichtbaren Abwitterungen auf (**Tabelle 3.4.16-1**). Über die Oberfläche der Betonpflastersteinsorten durchgeführte Ultraschalllaufzeitmessungen lieferten keinen Hinweis auf eine innere Gefügeschädigung.

Im Vorsatzbeton der Sorte 6 traten nach 1334 Frost-Tauwechseln in der Frostkammerlagerung Risse mit schollenartigen Abblätterungen an den Kanten einzelner Betonpflastersteine auf (**Bild 3.4.16-1**).

Nennswerte Abwitterungen der Vorsatzbetone der Betonpflastersteine der Sorte 6 im Slab-Test und im CDF-Verfahren gab es hingegen nicht. Die Ergebnisse aus den Frostkammeruntersuchungen und dem Slab-Test bzw. dem CDF-Verfahren führten somit zu einer unterschiedlichen Einschätzung der Leistungsfähigkeit der Betonpflastersteine der Sorte 6. Im Vorsatzbeton der Sorte 5 bildeten sich nach 958 FTW in der Frostkammer vereinzelt erste Risse, die nach 1334 FTW teilweise zum Ablösen des Vorsatzes führten (**Bild 3.4.16-2**).

Mit keinem der beiden Laborfrostprüfverfahren konnte somit die eingetretene Schädigung der in der Frostkammer verlegten Pflasterfläche der Sorte 5 prognostiziert werden.

### 2. Betonpflastersteine aus einer Technikumsanlage – Betrachtung der Vorsatzbetone:

In einem Ringversuch untersuchten vier Labore den Vorsatzbeton von vier Betonpflastersteinsorten aus einer Technikumsanlage. Ein Labor untersuchte zusätzlich den Kernbeton. Im Slab-Test am Vorsatzbeton der Basaltsplitt-Betone (Sorten B8, B9) und der Kiesbetonsorte K11b gab es nur marginale Abwitterungsmengen, was mit dem Schädigungsverhalten der Steinflächen in den Frostkammern gut übereinstimmte (**Tabelle 3.4.16-2**).

Das Betonpflaster der Kiesbetonsorte K10 reagierte in der Frostkammeruntersuchung nach 326 Frost-Tau-Wechseln mit Rissen und Aufwölbungen im Vorsatzbeton. Die Abwitterungsmenge des Vorsatzbetons im Slab-Test hingegen blieb gering.

Mit dem CDF-Verfahren wurden in der Regel am Vorsatzbeton der Pflastersteine mit Basaltsplitt (B8 und B9) ebenfalls nur sehr geringe Abwitterungen festgestellt. Die Vorsatzbetone der Sorten K10 und K11b (Kies) hingegen wiesen in allen vier Laboren hohe Abwitterungen auf. Somit stimmen nur in 25 % der Fälle die Ergebnisse aus dem CDF-Verfahren mit dem Abwitterungsverhalten in den Frostkammeruntersuchungen überein.

In einem Labor wurden zusätzlich die Kernbetone der Pflastersteinsorten aus der Technikumsanlage untersucht. Die Slab-Test-Ergebnisse am Kernbeton stimmten in allen Fällen mit den Ergebnissen der Frostkammeruntersuchungen überein. Die Prüfung der Kernbetone mit dem CDF-Verfahren spiegelte dagegen nur in der Hälfte der Fälle das Verhalten der zweischichtigen Steine in den Frostkammeruntersuchungen wider.

Die Übereinstimmung mit dem Verhalten zweischichtiger Betonpflastersteine in praxisnahen Frostkammeruntersuchungen war am höchsten, wenn sowohl der Vorsatz- als auch der Kernbeton mit dem modifizierten Slab-Test nach EN 1338 untersucht wurden.

Es wird daher empfohlen, zusätzlich zur Prüfung an der Prüffläche „Vorsatzbeton“ die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes am Kernbeton durchzuführen. Auch im Kernbeton sollte eine robuste Betonzusammensetzung mit einem angemessenen Zementgehalt verwendet werden. Dadurch wird das Versagensrisiko im verlegten Zustand vermindert. Langfristig könnte in der DIN EN 1338 die Prüfung des Kernbetons mit dem Slab-Test verankert werden. Bis dahin könnten ausschreibende Stellen diesen Nachweis einfordern.



**Bild 3.4.16-1** Schollenartige Abblätterungen infolge von Vorsatzbetonschädigungen an den Kanten einzelner Betonpflastersteine



**Bild 3.4.16-2** Trennrisse und Ablösen des Vorsatzbetons infolge eines Kernbetonversagens

**Tabelle 3.4.16-2** Ergebnisvergleich der Untersuchungen von Betonpflastersteinen aus der Technikumsanlage

Sorte	Frostkammer Schädigung (FTW)	Slab-Test					CDF-Verfahren					
		Prüffläche: Vorsatzbeton - Abwitterung in g/m <sup>2</sup>										
		Lab1	Lab2	Lab3b	Lab4	Überein. FK/Slab	Lab1	Lab2	Lab3a	Lab4	Übereinst. FK/CDF	
B8	Keine (401)	14	60	19 <sup>1)</sup>	20	+	334	840	2 113	131	-	
B9	Keine (401)	14	113	8 <sup>1)</sup>	24	+	1 325	308	3 069	197	-	
K10	Risse, Aufwölb. (326) <sup>b)</sup>	23	77	7 <sup>1)</sup>	25	-	1 829 <sup>3)</sup>	(197) <sup>2)</sup>	1 842 <sup>4)</sup>	3 753	+	
K11b	Keine (401)	26	140	7 <sup>1)</sup>	181	+	2 191	1 224 <sup>5)</sup>	6 070	5 804	-	
	USL <sup>a)</sup> in $\mu$ s min-max (MW)	Prüffläche: Kernbeton - Abwitterung in g/m <sup>2</sup>										
B8	32,5 ... 37,0 (34,7)	75				+	360				+	
B9	32,8 ... 36,9 (34,5)	736				+	1 951				-	
K10	35 ... 109,4 (53,9)	10 222				+	83 340				+	
K11b	33,6 ... 39,9 (35,6)	8				+	2 405				-	

<sup>a)</sup> Ultraschalllaufzeit nach 326 Frost-Tau-Wechseln.

<sup>b)</sup> Hebungen, Aufwölbungen an den Ecken, Horizontalrisse in Vorsatzbeton (Ecken)

<sup>1)</sup> Tausalzlösung verbleibt nicht auf der Prüffläche

<sup>2)</sup> Ergebnis nach 22 FTW – alle Probekörper nach weiteren vier FTW zerstört

<sup>3)</sup> Ergebnis des letzten unzerstörten Steins, andere vier Steine bereits nach 22 FTW zerstört

<sup>4)</sup> Wert nach 18 FTW nach 22 FTW; vier von fünf Steinen zerstört (Abwitterung nahm ab auf 909 g/m<sup>2</sup>)

<sup>5)</sup> einer von fünf Steinen, nach 28 FTW zerstört

## 3.5 Wissenstransfer und Medien

### 3.5.1 BetonQuali – Informations- und Qualifizierungsplattform ■

Dieses Vorhaben wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und den Europäischen Sozialfonds für Deutschland (ESF) gefördert.

Partner: Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (Koordinator), Berufsförderungswerk für die Beton- und Fertigteilerhersteller e.V., Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V., Forschungsinstitut Betriebliche Bildung (f-bb) gemeinnützige GmbH, S & P Consult GmbH

Projektzeitraum: 04/2016 – 03/2019

#### Hintergrund und Ziele

Im Verbundprojekt „BetonQuali – Informations- und Qualifizierungsplattform“ des VDZ und seiner Projektpartner soll bis 2019 eine Qualifizierungsmöglichkeit für an- und ungelernte Mitarbeitende in der Betonindustrie entwickelt und erprobt werden. Diese Mitarbeitergruppen sollen sich mit Hilfe digitaler Medien auf die IHK-Prüfung (Industrie- und Handelskammer) zum Verfahrensmechaniker/zur Verfahrensmechanikerin in der Steine-und-Erden-Industrie vorbereiten können.

Die Betonindustrie weist einen hohen Anteil an Beschäftigten aus fachfremden Berufen auf. Zudem bleiben offene Ausbildungsstellen oft unbesetzt. Die gleichzeitig steigenden Anforderungen an die Mitarbeiter/-innen hinsichtlich der technologischen Entwicklung führen zu einem Qualifizierungsbedarf. Bisherige Weiterbildungs- und Qualifizierungsangebote decken diesen Bedarf kaum mehr ab. Im Rahmen des Projektes wird daher ein neuer Qualifizierungsansatz für Beschäftigte der Betonindustrie entwickelt und erprobt. Der Ansatz umfasst die Entwicklung einer digitalen Informations- und Qualifizierungsplattform, die es erlaubt, die Qualifizierung weitgehend arbeitsplatznah und anhand von praxisnahen Aufgaben durchführen zu können. Ferner werden Instrumente zur Feststellung und Dokumentation vorhandener Kompetenzen sowie zur Ableitung individueller Qualifizierungswege erarbeitet.

Ziel ist es, dass die Lernenden durch eine abschließende IHK-Prüfung einen qualifizierten Berufsabschluss nach Berufsbildungsgesetz erwerben und so auch die Grundlage für eine Weiterqualifizierung, z. B. zum Industriemeister, legen. Die Qualifizierung richtet sich vor allem an Beschäftigte in folgenden Arbeitsbereichen: Anlagensteuerung, Disposition, Logistik, Instandhaltung von Maschinen sowie Baustoffprüfung. Das Projekt soll als Best-Practice-Beispiel für die Integration digitaler Lernmedien in die berufliche Weiterbildung dienen und in der Betonbranche ein neues Weiterbildungskonzept etablieren, das sich aufgrund der geringen Fehlzeiten am Arbeitsplatz insbesondere auch für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) eignet.

#### Vorgehensweise

Das Online-Lernen mit der Informations- und Qualifizierungsplattform soll selbstorganisiertes, flexibles Lernen am Arbeitsplatz unterstützen. Es wird mit praxisnahen Lernaufgaben im Betrieb und mit klassischen Präsenzveranstaltungen, beispielsweise in überbetrieblichen Ausbildungszentren, verbunden. Zudem ist vorgesehen, dass betriebliche Ausbilder die Plattformnutzer als Lernprozessbegleiter unterstützen. So sollen vor allem Lern- und Arbeitsprozesse der Beschäftigten besser miteinander verzahnt, Abwesenheitszeiten vom Arbeitsplatz gering gehalten und die

Tabelle 3.5.1-1 Teilqualifikation und Teilprozesse

<b>Teilqualifikation 1: Betonherstellung</b>
a) Vorbereitung des Fertigungsprozesses
b) Planung der Arbeitsschritte zur Betonherstellung
c) Herstellen von Beton
<b>Teilqualifikation 2: Betonprüfung / Qualitätssicherung</b>
a) Prüfung von Betonausgangsstoffen im Werk
b) Prüfung von Beton
c) Prüfung von vorgefertigten Betonerzeugnissen
d) Werkseigene Produktionskontrolle und Konformität (Qualitätssicherung)
<b>Teilqualifikation 3: Anlagenführung und -steuerung</b>
a) Einrichtung und Bedienung von Maschinen und Anlagen
b) Umrüstung von Maschinen und Anlagen
<b>Teilqualifikation 4: Instandhaltung</b>
a) Fehlersuche und Instandhaltung
b) Reparatur von Maschinen und Anlagen
<b>Teilqualifikation 5: Kaufmännische Organisation und Vertrieb</b>
a) Vertrieb von Transportbeton bzw. vorgefertigten Betonerzeugnissen
b) Verhandlungen mit den im Betrieb beteiligten Institutionen

Lernbereitschaft und Lernmotivation der Teilnehmenden gefördert werden.

Durch die Integration digitaler Medien wird auf die besonderen Bedürfnisse der Unternehmen (z. B. saisonale Schwankungen) und der Lernenden (z. B. flexible Zeiteinteilung, individuelle Lernsteuerung, verschiedene Zugangswege, arbeitsplatznaher Erwerb von Fähigkeiten) eingegangen. Auch soll dadurch dem insgesamt steigenden Bedarf an beruflicher Qualifizierung bei gleichzeitig reduzierter Personaldecke in der Branche Rechnung getragen werden. Hierdurch soll es den branchentypischen KMU ermöglicht werden, auch mit begrenzten Personal- und Finanzmitteln zukünftig Mitarbeitern passgenaue Möglichkeiten zur Qualifizierung anzubieten. Langfristig soll somit die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen gesteigert werden.

#### Stand der Arbeiten

Im Rahmen des Projektes wurden die Ausbildungsordnung für die Berufsbilder „Verfahrensmechaniker Steine-Erden“ mit den Fachrichtungen „Transportbeton“ und „Vorgefertigte Betonerzeugnisse“ analysiert und in fünf so genannte „Teilqualifikationen“ mit ihren jeweiligen Teilprozessen zerlegt (Tabelle 3.5.1-1). Jede Teilqualifikation wird durch eine Reihe von erforderlichen Kompetenzen beschrieben.

Auf Basis dieser Kompetenzen wurden im Projekt Lerneinheiten entwickelt, die aus verschiedenen Elementen bestehen können: Onlinekurse, Tests, praktische Aufgaben, wiederholende Übungen, Präsenzseminare und digitale Medien wie z. B. Videos oder Animationen. Die Lerneinheiten werden über eine Informations- und Qualifizierungsplattform angeboten, die unter [www.BetonQuali.de](http://www.BetonQuali.de) zur Verfügung gestellt wird.

Einen besonderen Stellenwert bei der Qualifizierung mit BetonQuali nimmt der so genannte „Lernprozessbegleiter“ ein. Hierbei handelt es sich um eine Person im Unternehmen des Teilnehmers.

Diese plant zusammen mit dem Teilnehmer auf Basis einer Kompetenzanalyse die Qualifizierung (etwa, in welchen Bereichen des Unternehmens der Teilnehmer während der Qualifizierung eingesetzt werden soll). Die Person legt den individuellen Lernbedarf des Teilnehmers fest (z. B. welche Teilqualifikationen bereits anerkannt werden können), bespricht regelmäßig die letzten Erfolge sowie die nächsten Schritte mit dem Teilnehmer und bewertet auf [www.BetonQuali.de](http://www.BetonQuali.de) den Abschluss von Aufgaben und Aktivitäten des Teilnehmers.

BetonQuali wird im Jahr 2018 mit ausgewählten Betrieben praktisch erprobt und soll nach Ende des Projektes möglichst breit in der Betonindustrie genutzt werden. Erfolgreiche Bestandteile des Qualifizierungskonzeptes sollen, wenn möglich, auf andere Bereiche der Steine-und-Erden-Industrie übertragen werden.

### 3.5.2 Nachhaltige Bildung von Arbeitskräften der Zementindustrie in Russland (BIRUZEM) ■

Dieses Vorhaben wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Projektpartner: Kima Echtzeitsysteme GmbH, Teutrine GmbH, Forschungsinstitut für Rationalisierung (FIR) e. V. an der RWTH Aachen

Projektzeitraum: 01/2013 – 12/2015

#### Hintergrund und Ziele

Deutschland ist für Russland einer der wichtigsten internationalen Handelspartner. Deutsche Produkte und Dienstleistungen genießen in Russland aufgrund ihrer Qualität und Zuverlässigkeit eine hohe Wertschätzung. Infolge der erwarteten Baukonjunktur sowie der damit verbundenen Nachfrage nach hochwertigen Baustoffen eröffnen sich in Russland und den angrenzenden Märkten vielfältige Chancen für deutsche Produzenten und Dienstleister aus diesem Segment.

#### Vorgehensweise

Der VDZ hat daher auf Wunsch von VDZ-Mitgliedern, die im russischen Sprachraum aktiv sind, Anfang 2013 gemeinsam mit weiteren Dienstleistern und Universitäten damit begonnen, eine Plattform für russischsprachige Weiterbildungsangebote im Bereich der Zementherstellung und -anwendung aufzubauen. Neben klassischen Präsenzseminaren sollten Lehrgänge für angehende Führungskräfte der Zementindustrie sowie Onlinekurse für die Weiterbildung der Mitarbeiter in den russischsprachigen Zementwerken angeboten werden. Der VDZ sollte dabei den Bereich der verfahrens- und umwelttechnischen Themen abdecken, die Kima Echtzeitsysteme GmbH den Bereich der Mess- und Regeltechnik und die Teutrine GmbH den Bereich der operativen Instandhaltung. Darüber hinaus sollten weitere Unternehmen angesprochen werden, um das Spektrum an angebotenen Themenbereichen der Plattform zu erweitern. Beim Aufbau der Plattform und der Ausgestaltung der Dienstleistungen wurden die Projektpartner durch das Forschungsinstitut für industrielle Rationalisierung (FIR) an der RWTH Aachen begleitet.

Auch im Zielland wurden zu Projektbeginn Partner gefunden, die in einer Kooperation mit dem VDZ zum Erfolg des Projektes beitragen sollten. So baute der VDZ in Russland Kontakte zu dem Zementherstellerverband „Soyuzcement“, zum Veranstalter der Fachkonferenzen „BusinessCem“, zum Herausgeber der renommierten Fachzeitschrift „Journal Cement and its Applications“



**Bild 3.5.2-1** Qualifizierungskurs für Meister und angehende Führungskräfte in Russisch: Laborbesichtigungen im VDZ

und Veranstalter der Konferenz „PetroCem“ sowie zu der „Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia“ auf.

Die Arbeit im Projekt hatte folgende Zielsetzungen:

- Zusammenarbeit im Verbund: Dienstleistungsentwicklung und Maßnahmenkoordination
- Zusammenarbeit mit Auftragnehmern: Lokalisierung der Seminare, Lehrgänge und Onlinekurse, Entwicklung einer Online-Lernplattform in russischer Sprache auf Basis der Open-Source-Plattform „ILIAS“ (Integriertes Lern-, Informations- und Arbeitskooperationssystem), Import der Lerninhalte in die Plattform, Drucken von diversen Präsentations- und Werbematerialien in russischer Sprache
- Zusammenarbeit mit den Partnern im Zielland und mit weiteren Partnern: Aufbau von Netzwerken und Präsentieren des Weiterbildungsvorhabens, fachliche Unterstützung bei der Übersetzung und Lokalisierung der Onlinekurse, Erprobung der Onlineplattform, Beratung bei der Erarbeitung des Weiterbildungskonzeptes, Schaffung organisatorischer Voraussetzungen

#### Ergebnisse/Stand der Arbeiten

Im Rahmen des Projektes sind mehrere Weiterbildungsangebote in russischer Sprache entwickelt und erprobt worden. Dies sind ein achtwöchiger Qualifizierungskurs für Meister (**Bild 3.5.2-1**) und angehende Führungskräfte in russischer Sprache sowie Tages- und Wochen-Seminare zu den Themen:

- Moderne Methoden der Instandhaltung
- Kompositzemente
- Qualitätskontrolle nach DIN EN 196

Bereits während der Laufzeit des Projektes wurde der Qualifizierungskurs für Meister und angehende Führungskräfte in russischer Sprache zweimal durchgeführt. Der Kurs erhielt gute Bewertungen von den Teilnehmern. Das Seminar „Moderne Methoden der Instandhaltung“ wurde im Juni 2015 zusammen mit einem der Projektpartner im Zielland erfolgreich durchgeführt (**Bild 3.5.2-2**).



**Bild 3.5.2-2** Seminar in Sankt Petersburg



**Bild-3.5.2-3** Seminar zu Kompositzementen in der Ukraine

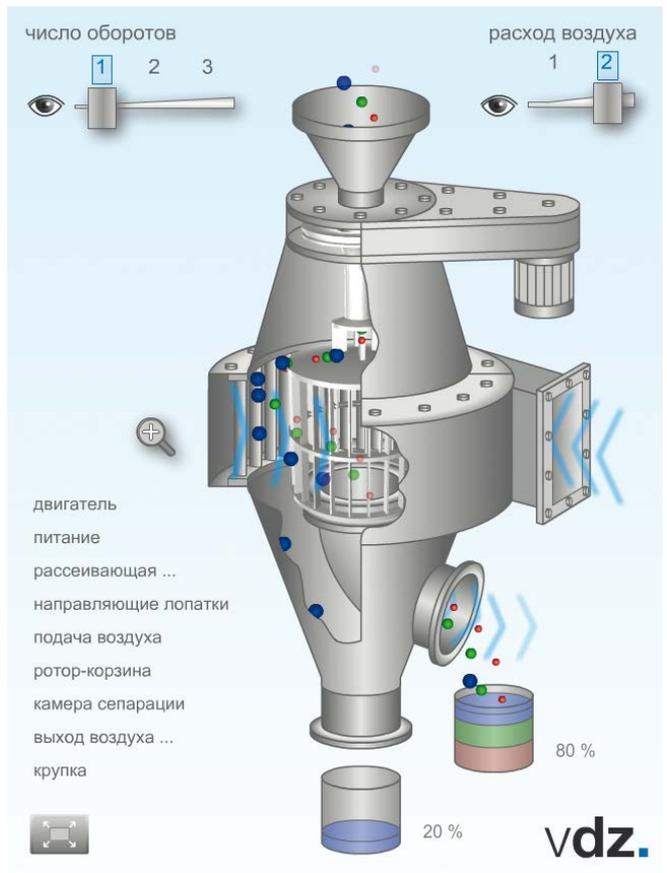
Die Durchführung der Lehrgänge und Seminare erfolgte sowohl in Deutschland als auch im Zielland (**Bilder 3.5.2-1 bis 3.5.2-3**).

Für alle Fachdisziplinen wurden überwiegend russischsprachige Mitarbeiter des VDZ und seiner Partner eingesetzt. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Veranstaltungen wurden mittlerweile in das Weiterbildungsportfolio des VDZ aufgenommen und werden standardmäßig angeboten. Die Anmeldungsabwicklung wurde für die russischsprachigen Kunden angepasst, die Inhalte werden regelmäßig aktualisiert, Teilnahmebescheinigungen werden in englischer und russischer Sprache ausgestellt.

Der Aufbau des Weiterbildungswerks und die daraus entstandenen Beziehungen zu russischen Partnern ermöglichen es dem VDZ, seinen Kunden in russischsprachigen Ländern auch weiterhin aktuelle Seminare zu wichtigen Themen anzubieten. Hierzu zählen z. B.:

- Kompositzemente
- Qualitätskontrolle nach DIN EN 196
- Moderne Instandhaltung im Zementwerk
- Nasschemische Untersuchungen

Im Rahmen der Projektarbeit ist auch eine Online-Lernplattform für Kurse in russischer Sprache entstanden. Der Zugriff darauf erfolgt über die im Rahmen des Projekts speziell entwickelte Internetseite [www.cementtraining.com](http://www.cementtraining.com). Auf der Lernplattform sind 40 Onlinekurse mit diversen Lernmedien – Abbildungen, Videos und Animationen – zu finden (**Bild 3.5.2-4**). Die Inhalte eines Onlinekurses lassen sich leicht in eine PDF-Datei umwandeln. Jeder Onlinekurs schließt mit einem Test, den die Teilnehmer zur Selbstlernkontrolle machen. Der Lernfortschritt kann vom Tutor jederzeit verfolgt werden. Das Angebot wurde innerhalb der russischen Zementindustrie weit verbreitet. Das Interesse an der Nutzung der Onlinekurse in russischer Sprache wächst.



**Bild 3.5.2-4** Animation eines Stabkorbsichters (in Russisch)

### 3.5.3 WiTraBau – Wissenstransfer im Bauwesen ■

Dieses Vorhaben wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Projektpartner: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb), Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V. (DBV), Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. (FTB), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV), Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau (IRB)

Projektzeitraum: 12/2014 - 11/2018

#### Hintergrund und Ziele

Im Forschungsprojekt „WiTraBau – Wissenstransfer im Bauwesen“ haben sich sieben Verbundpartner aus den Bereichen Forschung, Industrie und Regelwerksetzung zusammengeschlossen, um die baupraktische Anwendung neuer innovativer Werkstoffe innerhalb der BMBF-Förderbekanntmachungen „Nanotechnologie im Bauwesen – NanoTecture“ und „Neue Werkstoffe für urbane Infrastrukturen – HighTechMatBau“ zu begleiten. Das vom BMBF geförderte Projekt ist Bestandteil des Materialforschungsprogramms des Ministeriums. Das übergeordnete Ziel des Programms besteht darin, die Innovationskraft zukunftsfähiger Märkte wie der Bauindustrie in Deutschland aktiv zu fördern.

Eine wesentliche Aufgabe des Projektes ist die Analyse und adressatengerechte Aufbereitung der Forschungsergebnisse für die unterschiedlichen Zielgruppen der Wertschöpfungskette des Bauwesens (z.B. Baustoffhersteller, Ingenieurbüros, Architekten und Bauunternehmen). Zudem sollen die erzielten Projektergebnisse verbreitet und in der Fachöffentlichkeit diskutiert werden. Projektschwerpunkte für den VDZ sind u. a. die Sichtung und Aufbereitung der Ergebnisse – insbesondere im Betonbereich, die Beratung der Forschungsergebnisse in Fachöffentlichkeit und VDZ-Gremien sowie die Entwicklung und der Betrieb einer zentralen Informations- und Kommunikationsplattform.

#### Vorgehensweise

Die zugänglichen Ergebnisse der Projekte aus der Förderbekanntmachung „NanoTecture“ wurden zunächst von den WiTraBau-Partnern in einer neu entwickelten zentralen Informations- und Kommunikationsplattform erfasst. Um einseitige Meinungen weitgehend auszuschließen, wurde jedes Projekt zunächst von zwei WiTraBau-Reviewstellen getrennt bearbeitet, die sich dann anschließend auf einen abgestimmten Vorschlag für die weiteren Verwertungswege einigten. Entsprechend ihres Erkenntnis- und Reifungsgrades (z.B. Grundlagenforschung oder anwendungsbezogene Forschung) konnten Ergebnisse von den Reviewstellen für eine oder mehrere der folgenden Verwertungsoptionen vorgeschlagen werden:

- Nachfolgende Forschungsprojekte
- Fachspezifische Veröffentlichungen, Vorträge und Fachzeitschriften etc., Aufnahme in Forschungsdatenbanken
- Vorlesungen an Hochschulen, Fachhochschulen u. ä.
- Leitfäden und Lehrmaterialien für Industrie und Gewerbe (z.B. für die Aus- und Weiterbildung des Werkpersonals)
- Sachstandberichte und Wissensdokumente als Vorstufe zur Regelwerksetzung
- Merkblätter mit Branchenbezug (Zementindustrie, Bauwirtschaft, Transportbetonindustrie)



**Bild 3.5.3-1** Auftaktveranstaltung am 28.09.2015

- Regelwerke mit „Normencharakter“, Regelwerke der Verbundpartner (z.B. Richtlinien); Aufnahme in bestehende oder neue Regelwerke
- Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ), Einbringen in Normenausschüsse des DIN (Normenausschuss Bauwesen, NABau)
- Anwendungsbezogene Entwicklung
- Verwertungsvorschläge der Zuwendungsempfänger

Die Ergebnisse sowie die vorgeschlagenen Verwertungswege aus den Reviews wurden in den weitreichenden Netzwerken der sieben Projektpartner beraten:

- Diskussion der Forschungsergebnisse in Gremien
- Veranstaltungen zur Präsentation der Forschungsergebnisse
- Erarbeitung von Informations- und Lernmaterialien

Nach der Analyse und Aufbereitung der Forschungsergebnisse aus „NanoTecture“ widmeten sich die Partner der aktiven Verwertung der Forschungsergebnisse, die innerhalb der BMBF-Förderbekanntmachungen „Neue Werkstoffe für urbane Infrastrukturen – HighTechMatBau“ erzielt worden waren. Die Forschungsprojekte aus „HighTechMatBau“ laufen zeitlich parallel zum Transferprojekt, sodass „WiTraBau“ für diese Projekte eher eine beratende Rolle einnimmt. Die Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Hochschulen können so bereits zu Beginn ihrer Arbeiten unterstützt werden, indem gemeinsam eine geeignete Verbreitung vorbereitet und die Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis geplant werden.

#### Stand der Arbeiten

Die Projektergebnisse der Bekanntmachung „NanoTecture“ wurden vollständig in der Datenbank des Projektes erfasst, ausgewertet und den o. g. Verwertungsoptionen zugewiesen. Es ergaben sich für den VDZ so insgesamt 67 Zuordnungspaare, die im Projektverlauf weiterverfolgt wurden. In den Gremien des VDZ wurde zu jedem Ergebnis eine abgestimmte Meinung erarbeitet und in Umfragen bestätigt. Diese Ergebnisse und Verwertungsaktivitäten wurden wieder in der Datenbank registriert, sodass der jeweils aktuelle Stand der Verwertung festgehalten wurde. Die Mehrheit der Optionen bezog sich mit fast 40 % auf die Verwertung im Rahmen neuer Forschungsprojekte.

Nach der Auftaktveranstaltung am 28.09.2015 im VDZ wurde für die laufenden Projekte der Bekanntmachung „HighTechMatBau“ die Begleitung der Verwertung angestoßen (**Bild 3.5.3-1**). Die Forschungsstellen werden vom VDZ und den weiteren WiTraBau-Partnern dabei unterstützt, Ergebnisse und Verwertungsstrategien in ihren Projekten zu identifizieren und diese systematisch zu verfolgen. Alle hierbei erfolgten Aktivitäten und erzielten Ergebnisse werden ebenfalls wieder in der zentralen Datenbank registriert. So soll am Ende eine Auswertung möglich sein, welche Projektergebnisse wie verwertet werden konnten.

Im Januar 2018 fand die Konferenz „HighTechMatBau – Die Konferenz für Neue Materialien im Bauwesen“ mit mehr als 400 Teilnehmern aus Wissenschaft, Bauindustrie und Politik in Berlin statt (**Bild 3.5.3-2**). In zahlreichen Vorträgen hatten die geförderten Projekte die Gelegenheit, ihre Ergebnisse einem breit gefächerten Fachpublikum zu präsentieren. Ausgewählte Förderprojekte wurden in einem kurzen Film vorgestellt, den der VDZ zusammen mit den WiTraBau-Partnern konzipiert und über einen Dienstleister umgesetzt hatte.

Alle geförderten Projekte aus den Bekanntmachungen „NanoTecture“, „HighTechMatBau“ und ausgewählte Projekte

aus dem Förderschwerpunkt „KMU-innovativ“ können auf der Website des WiTraBau-Projektes [www.hightechmatbau.de](http://www.hightechmatbau.de) recherchiert werden.



**Bild 3.5.3-2** Im Januar 2018 fand in Berlin die Konferenz „HighTechMatBau – Die Konferenz für Neue Materialien im Bauwesen“ statt

140



**Bild 3.5.3-3** Videobeitrag "HighTechMatBau - Neue Werkstoffe für urbane Infrastrukturen"



## Anhang





## Vorstand des Vereins Deutscher Zementwerke e. V.

### Ehrenvorstand

Gerhard Hirth, Ulm

### Präsident

Christian Knell, Heidelberg

### Vizepräsidenten

Dirk Beese, Wiesbaden

Thomas Spannagl, Ulm

Dr. Dirk Spenner, Erwitte

Gerd Aufdenblatten, Dotternhausen (bis 5/2018)

Karl Brügggen, Karsdorf

Lars Bücken, Solnhofen (ab 4/2017)

Dr. Michael Bücken, Solnhofen (bis 4/2017)

Danilo Buscaglia, Leipzig

Jens Diebold, Hamburg (bis 5/2018)

Mike Edelmann, Rohrdorf

Dr. Stefan Fink, Ulm (ab 4/2017)

Bernward Goedecke, Wiesbaden

Thorsten Hahn, Hamburg (ab 5/2018)

Gerhard Kaminski, Ulm (ab 4/2017)

Marcel Kecke, Karsdorf

Urs Kern, Dotternhausen (bis 12/2017)

Dr. Bernhard Kleinsorge, Heidelberg (ab 11/2016)

Marcel Krogbeumker, Beckum

Rüdiger Kuhn, Rüdersdorf

Wolfgang Matthias, Erwitte

Winfried Müller, Großenlütder (bis 12/2015)

Maximilian Graf Pückler-Märker, Harburg

Jörg Ramcke, Üxheim-Ahütte

Eduard Schleicher, Ulm (bis 4/2017)

Volker Schneider, Heidelberg (bis 11/2016)

Norbert Schultz, Wiesbaden

Marius Seglias, Hamburg (bis 6/2018)

Hubertus Seibel, Erwitte (bis 12/2017)

Philipp Seibel, Erwitte (bis 5/2018)

Claus Tausendpfund, Pommelsbrunn (ab 4/2017)

Kurt Tausendpfund, Pommelsbrunn (bis 4/2017)

Matthias von der Brelje, Hamburg

Ottmar Walter, Heidelberg

## Hauptgeschäftsführer des VDZ und Leiter des Forschungsinstituts

Dr. Martin Schneider

## VDZ gGmbH

### Geschäftsführer

Dr. Volker Hoenig

Dr. Christoph Müller

## FIZ GmbH

### Geschäftsführer

Dr. Jörg Rickert

## Technisch-Wissenschaftlicher Beirat

### Vorsitzender

Dr. Bernhard Kleinsorge, Heidelberg

### Obleute der Ausschüsse und Kommissionen

Werner Rothenbacher, Ulm (Betontechnik)

Dr. Wolfgang Dienemann, Leimen (Zementchemie)

Ottmar Walter, Heidelberg (Kommission Transportbeton)

Dr. Stefan Lorenz, Wiesbaden (Energie)

Peter Lyhs, Rüdersdorf (Kommission Alkali-Kieselsäure-Reaktion)

Wolfgang Matthias, Erwitte (Ständiger Gast)

Dr. Hendrik Möller, Ulm (Fachausschuss Überwachungsgemeinschaft)

## VDZ und sein Forschungsinstitut

Dr. Martin Schneider

## Haushaltsbeirat und Rechnungsprüfer

### Vorsitzender

Dr. Stefan Fink, Ulm

Karl Brügggen, Karsdorf

Dr. Stefan Fink, Ulm

Gerlinde Geiß, Harburg

Volker Janke, Düsseldorf (Rechnungsprüfer)

Ralf Keller, Ulm (Rechnungsprüfer)

Markus Lappe, Wiesbaden

## Veröffentlichungen

### Schriftenreihe der Zementindustrie

- Böhm, Matthias: *Beitrag von Steinkohlenflugasche in Zement zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion*  
Düsseldorf: Verlag Bau u. Technik, 2016 (Schriftenreihe der Zementindustrie 83)
- Suchak, Christian: *Ursachen der Niedertemperaturkorrosion im Abgasweg von Zementdrehofenanlagen*  
Düsseldorf: Verlag Bau u. Technik, 2016 (Schriftenreihe der Zementindustrie 82)

### Merkblätter und Prüflisten

#### Sicherheits-Merkblätter

- Nr. 129 Gefahr des Einziehens bei Förderbändern
- Nr. 130 Absturz mit Todesfolge beim Tausch eines Ofenschusses
- Nr. 131 Absturz bei Arbeiten mit einem Presslufthammer
- Nr. 132 Sichere Begehung von Kugelmühlen
- Nr. 133 Absturz einer Plattform bei Trennarbeiten
- Nr. 134 Mehldurchschuss
- Nr. 135 Staubaustritt durch fehlendes Freischalten
- Nr. 100-2 Ladungssicherung bei Zementsackware und Big-Bags (aktual. Version d. Merkblatts Nr. 100)
- Nr. 136 Umgang mit chromathaltigen Bauteilen und Ansätzen im Ofenbereich
- Nr. 137 Einsatz und Prüfung von Lichtgitterrosten

#### Sicherheits-Prüflisten

- Nr. 109 Gefahr des Einziehens bei Förderbändern
- Nr. 110 Gefahr des Absturzes bei Arbeiten in der Höhe
- Nr. 111 Arbeiten mit schweren Handarbeitsgeräten
- Nr. 112 Sichere Begehung von Kugelmühlen
- Nr. 113 Trenn- und Schweißarbeiten an Anlagenteilen
- Nr. 114 Sofortmaßnahmen Gefahr eines Mehldurchschusses
- Nr. 115 Freiwerdende Energien
- Nr. 116 Einsatz und Prüfung von Lichtgitterrosten

### VDZ-Mitteilungen

Nr. 159 (Dezember 2015) – Nr. 167 (September 2018)

### **Umweltdaten**

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2014.  
Düsseldorf, 2015

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2015.  
Düsseldorf, 2016

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2016.  
Düsseldorf, 2017

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2017.  
Düsseldorf, 2018

### **Betontechnische Berichte**

Betontechnische Berichte 2013–2015

### **Zahlen und Daten**

*Zahlen und Daten: 2016; Stand: August 2016.*  
Berlin, 2016

*Zahlen und Daten: 2017; Stand: August 2017.*  
Berlin, 2017

*Zahlen und Daten: 2018; Stand: August 2018.*  
Berlin, 2018

### **Zementindustrie im Überblick**

*Zementindustrie im Überblick: 2016/2017.*  
Berlin, 2016

*Zementindustrie im Überblick: 2017/2018.*  
Berlin, 2017

*Zementindustrie im Überblick: 2018/2019.*  
Berlin, 2018

**Tagungsberichte**

*VDZ-Fachtagung Zementchemie: Die Schwerpunkte der Tagung lagen in den Bereichen neue Zemente und Analytik.*  
In: Beton. 2015, 65(7-8), S.422-423

*Industrie 4.0: VDZ – Jahrestagung Zement 2015.*  
In: Beton. 2015, 65(9), S.436

*Große Herausforderungen für die Zementindustrie: VDZ-Jahrestagung – 2015: Rückgang des Zementverbrauchs erwartet.*  
In: Beton. 2015, 65(11), S.531

*Zementindustrie – wirtschaftspolitischer Rahmen und technische Innovationen: Düsseldorf – Jahrestagung Zement 2015 des Vereins Deutscher Zementwerke.*  
In: Beton. 2015, 65(12), S.612-614

*Jahrestagung Zement 2015: Düsseldorf, Deutschland (22.-23.09.2015).*  
In: Cement International. 2015, 13(2), S.20

*VDZ-Fachtagung Zementchemie 2015: Düsseldorf, Deutschland (19.03.2015).*  
In: Cement International. 2015, 13(4), S.24-28

*Jahrestagung Zement 2015 des Vereins Deutscher Zementwerke: Düsseldorf, Deutschland (22.-23.09.2015).*  
In: Cement International. 2015, 13(6), S.20-27

*Strunge, J.; Bilgeri, P.: VDZ-Jahrestagung Zement 2016: Auf der Tagesordnung – Zementverfahrenstechnik, Zementanwendung und Betontechnologie.*  
In: Beton. 2016, 66(12), S.523-525

*VDZ-Jahrestagung Zement 2016: Düsseldorf, Deutschland (27.-28.09.2016).*  
In: Cement International. 2016, 14(6), S.20-35

*Fachtagung Zementchemie 2017: Düsseldorf – Verein Deutscher Zementwerke bietet Forum für Präsentation aktueller Forschungsprojekte.*  
In: Beton. 2017, 67(6), S.242-243

*Presentation of the 5<sup>th</sup> Klaus Dyckerhoff Prize: VDZ annual conference – Professor Siegbert Sprung honoured for his life's work.*  
In: Cement International. 2017, 15(1), S.14

*2017 Cement Chemistry Conference of the German Cement Works Association (VDZ).*  
In: Cement International. 2017, 15(4), S.26-37

*Jahrestagung Zement 2017 stand im Zeichen des 140-jährigen VDZ-Jubiläums: Von Beginn an qualitätsbewusst und innovativ – Betontechnologie und Betontechnik im Fokus.*  
In: Beton. 2018, 68(1-2), S.41-42

*VDZ-Jahrestagung Zement 2017: Düsseldorf, Deutschland (19.-20.09.2017).*  
In: Cement International. 2018, 16(1), S.14-27

## Einzelveröffentlichungen

- Treiber, Kevin; Fleiger, Philipp M.: *Optimization of the Powder and Ball Movement Inside a High-Speed Horizontal Attrition Mill for Dry Grinding*. In: Evertsson, Magnus; Hulthen, Erik; Quist, Johannes, Hrsg. Proceedings of the 14th European Symposium on Comminution and Classification, ESCC 2015 (Gothenburg 7.–11.09.2015). Gothenburg, 2015, S.330–335
- Berry, Andrew; Horstmeier, Jan Frederik; Hoppe, Helmut: *Praxisnahe Untersuchungen zur Realisierung eines Adsorptionsverfahrens zur energieeffizienten trockenen CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus Abgasen aus der Zementindustrie: Poster*. In: ProcessNet - eine Initiative von DECHEMA und VDI-GVC, Hrsg.: Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen Adsorption und Gasreinigung: Kurzfassungen; 17. – 18. Februar 2016 Wyndham Hotel Duisburg. – Frankfurt am Main. In: ProcessNet, 2016, 2 S. [Zugriff am: 02.03.2016]. Verfügbar unter: [http://processnet.org/ads\\_gas\\_abstracts.html](http://processnet.org/ads_gas_abstracts.html)
- Oerter, Martin: *Co-incineration in Cement plants*. In: Kühle-Weidemeier, Matthias; Büscher, Katrin, Hrsg. Waste-to-Resources 2017: 7. Internationale Tagung MBA, Sortierung und Recycling; Rohstoffe und Energie aus Abfällen; Tagungsband (Originalsprachenausgabe); 16.–18. Mai 2017 (Hannover 16.–18. Mai 2015). Göttingen: Cuvillier, 2017, S.44–51
- Borchers, Ingmar: *NA-Zemente – Kein Allheilmittel zur Vermeidung von AKR-Schäden an Betonfahrbahndecken: Hinweise zum Einfluss von Gesteinskörnungen und Zementen auf das AKR-Schädigungspotenzial bei einer Alkalizufuhr von außen*. In: Griffig: Aktuelles über Verkehrsflächen aus Beton 2015 (1), S.13–15
- Eickschen, Eberhard; Ehrlich, Norbert: *Schwinden von Fahrbahndeckenbetonen*. In: Griffig: Aktuelles über Verkehrsflächen aus Beton 2015 (1), S.9–12
- Fleiger, Philipp M.; Schneider, Martin; Treiber, Kevin: *Future grinding technologies – ECRA's new research project*. In: Chalmers University of Technology, Ed. 14<sup>th</sup> European Symposium on Comminution and Classification (Göteborg 07.–10.09.2015). Göteborg, 2015
- Fleiger, Philipp M.: *Going through the mill*. In: International Cement Review 2015 (11), S.63–67
- Herrmann, Jens; Rickert, Jörg: *Influences of clay's calcining conditions on rheological properties of cements with calcined clay and on interactions with superplasticizers*. In: China Building Materials Academy, Hrsg.: 14<sup>th</sup> International congress on the chemistry of cement, ICCC (Beijing 13.–16.10.2015). Beijing, 2015
- Herrmann, Jens; Rickert, Jörg: *Influences of fly ash on rheological properties of fresh cement paste and on cement's interactions with superplasticizers*. In: Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg.: Internationale Baustofftagung Tagungsbericht (Weimar 16.–18.09.2015). Weimar, 2015
- Herrmann, Jens; Rickert, Jörg: *Interactions between Cements with Calcined Clay and Superplasticizers*. In: Malhotra, V.M.; Gupta, P.R.; Holland, T.C.: Eleventh International Conference on Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete: Papers: Ottawa, Canada, July 12–15, 2015: American Concrete Institute, ACI, 2015 (ACI Publication SP 302), S.299–314
- Horsch, Johannes; Vollpracht, A.; Spanka, Gerhard; Rickert, Jörg: *Influences of testing conditions on the leaching of trace elements*. In: Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg.: 19. Internationale Baustofftagung Tagungsbericht (Weimar 16.–18.09.2015). Weimar, 2015
- Ilvonen, Outi; Hoffmann, Bernd; Oppl, Reinhard; Spanka, Gerhard; Wiens, Udo; Wurbs, Johanna: *Freisetzung von gefährlichen Stoffen aus Bauprodukten in Boden, Wasser und Innenraumluft*. In: DIN-Mitteilungen 2015, 94(12), S.14–19
- Knöpfelmacher, Aneta; Rickert, Jörg: *Influence of increased alternative fuel use on clinker composition, microstructure and clinker melt viscosity*. In: Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg.: 19. Internationale Baustofftagung Tagungsbericht (Weimar 16.–18.09.2015). Weimar, 2015

- Pierkes, Roland; Schulze, Simone E.; Rickert, Jörg: *Optimization of Cements with Calcined Clays as Supplementary Cementitious Materials*. In: Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg.: *Calcined clays for sustainable concrete: Proceedings of the 1st international conference on calcined clays for sustainable concrete (Lausanne 23.–25.06.2015)*. Heidelberg: Springer, 2015 (RILEM Bookseries 10), S.59–66
- Pierkes, Roland; Rickert, Jörg: *Automated quantitative XRD – a tool for cement quality control*. In: Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg.: *19. Internationale Baustofftagung Tagungsbericht (Weimar 16.–18.09.2015)*. Weimar, 2015
- Reiners, Jochen; Müller, Christoph; Penttilä, Joose; Breitenbücher, Rolf: *Erreichen projektierter Betoneigenschaften im modernen 5-Stoff-System diverser Betonausgangsstoffe*. In: *Beton; Betontechnische Berichte = Concrete Technology Reports 2015/2016*, 65/33(12), S.617–622/S.87–94
- Schäffel, Patrick: *Wirkungsweise schwindreduzierender Zusatzmittel und deren Einfluss auf wesentliche Eigenschaften von Beton*. In: Müller, Harald S.; Nolting, Ulrich; Halst, Michael; Kromer, Marco, Hrsg. *Betonverformungen beherrschen: Grundlagen für schadensfreie Bauwerke; Symposium; 11. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (Karlsruhe 12.03.2015)*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2015, S.105–112
- Schäffel, Patrick; Palm, Sebastian; Schempershofe, Daniel: *Vergussmörtel zur Ringraumverfüllung von Off-Shore Windenergieanlagen: Erkenntnisse aus Zulassungsuntersuchungen*. In: Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg.: *19. Internationale Baustofftagung Tagungsbericht (Weimar 16.–18.09.2015)*. Weimar, 2015
- Schneider, Martin: *Process technology for efficient and sustainable cement production: Keynote papers from 14<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2015)*. In: *Cement and Concrete Research 2015*, 78 A, S.14–23
- Schulze, Simone E.; Rickert, Jörg: *Performance of cements with calcined clays as main constituent*. In: Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg.: *19. Internationale Baustofftagung Tagungsbericht (Weimar 16.–18.09.2015)*. Weimar, 2015
- Schulze, Simone E.; Pierkes, Roland; Rickert, Jörg: *Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementitious materials*. In: China Building Materials Academy, Hrsg.: *14<sup>th</sup> International congress on the chemistry of cement, ICCC (Beijing 13.–16.10.2015)*. Beijing, 2015
- Treiber, Kevin; Fleiger, Philipp M.: *Optimization of the Powder and Ball Movement Inside a High-Speed Horizontal Attrition Mill for Dry Grinding*. In: Evertsson, Magnus; Hulthen, Erik; Quist, Johannes, Hrsg.: *Proceedings of the 14<sup>th</sup> European Symposium on Comminution and Classification (Gothenburg 7.–11.09.2015)*. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2015, S.330–335
- Borchers, Ingmar: *Prevention of damaging ASR on concrete road pavements in Germany*. In: Dálniční stavby Praha; Skanska; EUROVIA CS; Metrostav a.s., Hrsg.: *Concrete Roads 2016: Conference Proceedings; 6<sup>th</sup> International Conference (Prag 22.09.2016)*. Prag: o. Verl., 2016, S.118–224
- Degtyaruk, Y.; Gloeckler, Y.; Volchkova, Y.; Schneider, M.: *Success factors in the implementation of modern technologies for personnel training at the cement industry companies (the results of the „BIRUZEM“ project)*. In: *Zement i ego primenenie 2016 (2)*, S.102–105
- Herrmann, J.; Rickert, J.: *Influences of fly ash on rheological properties of cement paste and on cement interactions with superplasticizers*. In: *ALIT inform 2016 (2-3)*, S.14–25
- Herrmann, J.; Hecker, A.; Rickert, J.; Ludwig, H.-M.: *Interactions between methyl celluloses and blended cements in dry mortar*. In: Gesellschaft Deutscher Chemiker, GDCh, Hrsg. *2<sup>nd</sup> International Conference on the Chemistry of Construction Materials (München 10.–12.10.2016)*. Frankfurt / M., 2016 (GDCh-Monographie 50)

- 150
- Hoening, Volker; Lindemann Lino, Marco: *Optimising energy efficiency*. In: World Cement 2016 (4), S.15–18
- Müller, C.; Palm, S.; Wolter, A.; Bohne, T.: *Hydratationsgrad basierte Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton*. In: Cement International 2016, 14(1), S.80–85
- Müller, Christoph: *Durability requirements for concrete nowadays and in the future – key parameters for performance concepts*. In: Beushausen, H., Hrsg. Performance-based approaches for concrete structures: fib Symposium 2016 (Kapstadt 21.–23.11.2016). Kapstadt, 2016, S.42–51
- Müller, Christoph; Palm, Sebastian; Pierre, Christian; Mosselmans, Gunther; Peyrerl, Martin; Maier, Gerald: *Wiederverwendung von Restwasser in der Herstellung von Luftporen- und hochfesten Betonen: Betontechnische Berichte*. In: Beton 2016, 66(11), S.467–474
- Müller, Christoph; Wiens, Udo: *Betonbau im Wandel: Umsetzung von Performance-Konzepten*. In: Beton; Betontechnische Berichte = Concrete Technology Reports 2013/2015, 66/33 (1-2), S.10–17/S. 95–106
- Müller, Christoph: *Neues Konzept für die Praxis? Betonbauqualität (BBQ)*. In: Concrete Plant and Precast Technology = Betonwerk und Fertigteile-Technik: BFT International 2016, 82(2), S.10–11
- Oerter, Martin: *Aktuelle Entwicklungen und Perspektiven der energetischen Verwertung von Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie*. In: Wiemer, Klaus; Kern, Michael; Raussen, Thomas. Bio- und Sekundärrohstoffverwertung: stofflich, energetisch. 1. Aufl. Witzhausen: Witzhausen-Institut, 2016 (Witzhausen-Institut. Neues aus Forschung und Praxis), S.556–562
- Palm, S.; Müller, Christoph; Lichtmann, M.; Hugot, A.; Pfitzner, J.: *Untersuchungen an flugaschehaltigen Betonen für den Einsatz in Katar*. In: Cement International 2016, 14(4), S.78–86
- Palm, Sebastian; Proske, Tilo; Rezvani, Moien; Hainer, Stefan; Müller, Christoph; Graubner, Carl-Alexander: *Cements with a high limestone content – Mechanical properties, durability and ecological characteristics of the concrete*. In: Construction and Building Materials 2016, 119, S.308–318
- Pfingsten, Johannes; Vollpracht, Anya; Spanka, Gerhard; Rickert, Jörg: *Umweltverträglichkeit von Beton - Einflüsse auf die Freisetzung von Spurenelementen im Auslaugversuch: Ergebnisse eines Forschungsvorhabens*. In: Beton 2016, 66(10), S.398–402
- Reichling, K.; Wiens, U.; Schäffel, P.: *WiTraBau: Neue Werkstoffentwicklungen in die Praxis gebracht*. In: Bauingenieur 2016, S.140–142
- Reichling, Kenji; Schäffel, Patrick: *WiTraBau – Neue Werkstoffentwicklungen und ihr Transfer in die Praxis: Wissenstransfer im Bauwesen – Sieben Verbundpartner aus Forschung, Industrie und Regelwerksetzung*. In: Beton 2016, 66(11), S.464–465
- Reiners, J.; Müller, C.; Penttilä, J.; Breitenbücher, R.: *Erreichen projektierter Betoneigenschaften im modernen 5-Stoff-System diverser Betonausgangsstoffe*. In: Cement International 2016, 14(3), S.64–69
- Schäffel, Patrick; Seidel, Maik: *Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes von vorgefertigten Straßenbauerzeugnissen unter praxisnahen Verhältnissen: Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Laborprüfverfahren*. Concrete Plant and Precast Technology = Betonwerk und Fertigteile-Technik: BFT International. 2016 (2), S.30–31
- Schneider, Martin: *Potentials to improve performance and optimise the cost of cement production*. In: Cement and Building Materials Review 2016 (66), S.30–38
- Schneider, Martin: *Process technology for efficient and sustainable cement production*. In: The 9<sup>th</sup> International Cement Conference: PetroCem (Sankt Petersburg 24.–26.04.2016), 2016, S.10–11

- Böhm, Matthias; Knöpfelmacher, A.; Pierkes, Roland: *Alite Decomposition vs. Alite Corrosion*. In: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL, Hrsg.: 16<sup>th</sup> Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials: EMABM 2017 (Les Diablerets 14.–17.May 2017). Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL, 2017, S.23–26
- Borchers, Ingmar; Müller, Christoph; Seidel, Maik: *Einstufung nach AKR-Richtlinie: ein Hemmnis?; Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. In: Beton 2017, 67(9), S.331–332
- Borchers, Ingmar: *Prevention of damaging ASR on concrete road pavements in Germany*. In: Beton - technologie, konstrukce, sanace 2017 (6), S.36–39
- Dietrich, Natalia; Lipus, K.; Rickert, J.: *Einfluss der Kalksteinzusammensetzung in Zement auf Zement- und Beton-eigenschaften*. In: Cement International 2017, 15(6), S.54–61
- Eickschen, Eberhard: *Luftporenbeton: Zielsichere Herstellung im Transportbetonwerk: Produktion*. In: TB-Info 2017, 18(67), S.30–32
- Hecker, Andreas; Kiesewetter, René; Herrmann, Jens; Rickert, Jörg: *Nachhaltig und hochwertig*. In: Fliesen und Platten 2017 (12), S.22–25
- Herrmann, J.; Rickert, J.: *Influence of fly ash cement on properties of fresh cement paste and on cement's interactions with superplasticizer*. In: Zement i ego primenenie 2017 (5), S.66–70
- Herrmann, J.; Hecker, A.; Rickert, J.; Ludwig, H.-M.: *Interactions between methyl celluloses and blended cements in dry mortar*. In: Leopolder, Ferdinand, Hrsg. Drymix mortar yearbook 2017: idmmc 6 (Nürnberg 3.4.2017). 2017, S.4–9
- Herrmann, J.; Hecker, A.; Rickert, J.; Ludwig, H.-M.: *Interactions between methyl celluloses and blended cements in dry mortar*. In: ALIT inform 2017 (4-5), S.86–90
- Lichtmann, Michael; Hugot, Andreas; Pfitzner, Jochen; Palm, Sebastian; Müller, Christoph: *Untersuchungen an flugaschehaltigen Betonen für den Einsatz in Qatar*. In: BWI Betonwerk International 2017 (1), S.44–50
- Müller, Christoph: *Zement und seine Anwendung*. In: Bergmeister, Konrad; Fingerloos, Frank; Wörner, Johann-Dietrich. Beton-Kalender 2017: Spannbeton, Spezialbetone. – Berlin: Ernst und Sohn, 2017, S.235–293
- Müller, Christoph: *Increasing the robustness of concrete: Clinker-efficient cements: Steigerung der Betonrobustheit: Klinkereffiziente Zemente*. In: Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie, BDB, Hrsg. 61. BetonTage Kongressunterlagen: Concrete Solutions ; Lebensräume gestalten – shaping places for people (Neu-Ulm 14.–16.02.2017). Gütersloh: Bauverl., 2017, S.49
- Müller, Christoph: *Robuste Betone mit klinkereffizienten Zementen*. In: Materialforschungs- und prüfanstalt an der Bauhausuniversität Weimar, MFPA; Informationszentrum Beton, Hrsg. betonbau. aktuell 2017: Apolda, 16. Februar 2017; Fachtagung (Apolda 16.02.2017). Apolda: Materialforschungs- und prüfanstalt an der Bauhausuniversität Weimar, MFPA, 2017, 6 S.
- Neufert, Winfried; Reuken, Ines; Müller, Christoph; Palm, Sebastian; Graubner, Carl-Alexander; Proske, Tilo; Rezvani, Moien: *Leistungsfähigkeit klinkereffizienter Zemente mit Hüttensand und Kalkstein*. In: Beton 2017, 67(3), S.89–97
- Oerter, Martin: *Hochwertige Verwertung von Abfällen: Der Beitrag der Zementindustrie zu einer modernen Kreislaufwirtschaft*. In: Flamme, Sabine; Gellenbeck, Klaus; Rotter, Susanne; Kranert, Martin; Nelles, Michael; Quicker, Peter Georg, Hrsg.: 15. Münsteraner Abfallwirtschaftstage (Münster). Münster: FH Münster, Institut für Wasser, Ressourcen, Umwelt, IWARU, 2017 (Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft: 17), S.109–117
- Orujov, Nijat: *Prerequisites and conditions of alternative fuel utilisation in the cement industry*. In: Cement and Building Materials Review 2017 (70), S.40

- Palm, Sebastian; Müller, Christoph; Wolter, A.: *Predicting concrete durability by the degree of its hydration*. In: Zement i ego primenenie 2017 (4)
- Pierkes, Roland; Schulze, Simone E.; Rickert, Jörg: *Durability of Concretes Made with Calcined Clay Composite Cements*. In: Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg.: *Calcined clays for sustainable concrete: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.–07.12.2017)*. Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16), S.366–371
- Reiners, Jochen; Müller, Christoph: *Einfluss der chemischen und physikalischen Eigenschaften von Zementstein auf das Trocknungsverhalten von Zementestrich und das Abplatzverhalten von Beton im Brandfall*. In: Beton 2017, 67(11/12), S.447–453/S.491–499
- Reiners, Jochen; Müller, Christoph: *The influence of the pore size distribution and the chemical composition of cement paste on the explosive spalling of concrete*. In: Research Institutes of Sweden, RISE, Hrsg.: *Proceedings from the 5<sup>th</sup> International Workshop on Concrete Spalling, Borås, Sweden, 12–13 October 2017*. Borås: Research Institutes of Sweden, RISE, 2017 (SP Report 2017:43), S.153–165
- Schäffel, Patrick; Palm, Sebastian; Breit, Wolfgang: *Verfahren nach VDZ: Chemischer Angriff auf Beton - Prüfverfahren*. In: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, DBV, Hrsg.: *Chemischer Angriff auf Beton – Prüfverfahren zur Bewertung des Säurewiderstands: Fassung Mai 2017*. Berlin. In: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, DBV, 2017-05 (DBV-Heft 41), S.25–27
- Schäffel, Patrick; Müller, Christoph: *Transfer of innovative research results into the German cement industry*. In: Hordijk, D.A.; Lukovic, M., Hrsg.: *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet; Book of Abstracts for 2017 fib Symposium (Maastricht 12.–14.06.2017)*. Lausanne: fib, 2017 [Zugriff am: 23.04.2018] Verfügbar unter: <http://fibsymposium2017.com/interactive-abstracts-overview/>
- Schäffel, Patrick: *Research projects transferred to practice: WiTraBau: Newly developed materials for high-performance concrete: Forschungsvorhaben in die Praxis gebracht: WiTraBau: Neue Werkstoffentwicklungen für Hochleistungsbetone*. In: Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie, BDB, Hrsg.: *61. BetonTage Kongressunterlagen: Concrete Solutions; Lebensräume gestalten – shaping places for people (Neu-Ulm 14.–16.02.2017)*. Gütersloh: Bauverl., 2017, S.9
- Schneider, Martin: *Potentials to improve performance and optimise the cost of cement production*. In: BusinessCem Moscow 2017: *The 28<sup>th</sup> International Conference and Exhibition; The cement Industry & the market; Tandem: cement & construction, 2017*. (Moskau 24.–26.04.2017), S.20–23
- Severins, Katrin; Müller, Christoph: *Brechsand als Hauptbestandteil im Zement*. In: Beton 2017, 67(9), S.323–326
- Thomas, Ludger; Schäfer, Stefan; Schäffel, Patrick; Ogilvie, M.; del Arte, M.; Wolter, A.: *Moderne Formen der Qualifizierung in der Zement-, Kalk- und Betonindustrie*. In: Cement International 2017, 15(3), S.50–59
- Thomas, Ludger; Schäfer, Stefan; Schäffel, Patrick; del Arte, Maria; Ogilvie, Martin; Wolter, Albrecht: *Moderne Formen der Qualifizierung in der Zement-, Kalk- und Betonindustrie: Von den Onlinekursen zum Wissensnetzwerk*. In: Beton 2017, 67(3), S.70–75
- Mahon, Eleanor: *Cement industry launches an industrial-scale carbon capture project*. In: Cement and Building Materials Review 2018 (71), S.20
- Müller, Christoph; Seidel, Maik; Middendorf, Bernhard; Braun, Torsten: *New research findings: Freeze-thaw resistance of concrete products*. In: Concrete Plant and Precast Technology = Betonwerk und Fertigteil-Technik: BFT International 2018, 84(2), S.18
- Palm, Sebastian; Müller, Christoph: *Verlässliche Vorhersage allein durch Zementprüfung? Dauerhaftigkeit von Beton*. In: Concrete Plant and Precast Technology = Betonwerk und Fertigteil-Technik: BFT International 2018, 84(2), S.15

- Palm, Sebastian; Müller, Christoph: *Reliable prediction by cement testing alone? Durability of concrete*. In: Concrete Plant and Precast Technology = Betonwerk und Fertigteil-Technik: BFT International 2018, 84(2), S.15
- Pfingsten, Johannes; Rickert, Jörg; Lipus, Klaus: *Estimation of the content of ground granulated blast furnace slag and different pozzolanas in hardened concrete*. In: Construction and Building Materials 2018 (165), S.931–938
- Proske, Tilo; Rezvani, Moien; Palm, Sebastian; Müller, Christoph; Graubner, Carl-Alexander: *Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone*. In: Cement and Concrete Composites 2018, 89, S.107–119
- Reiners, Jochen: *Das CSC aus Sicht einer Zertifizierungsstelle*. In: Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie, BTB, Hrsg.: Auftakt- und Informationsveranstaltung zum CSC: Am 19. April 2018 in Berlin (Berlin 19.04.2018.) Berlin, 2018. [Zugriff am: 05.06.2019] Verfügbar unter: <https://www.csc-zertifizierung.de/vortraege/>
- Reiners, Jochen: *Re-evaluation of the life cycle assessment of concrete Products? CO<sub>2</sub> absorption of cementitious building materials*. In: Concrete Plant and Precast Technology = Betonwerk und Fertigteil-Technik: BFT International 2018, 84(2), S.10
- Ruppert, Johannes; Treiber, Kevin: *Flexibilitätpotentiale und -perspektiven der Roh- und Zementmahlung*. In: Ausfelder, Florian; Roon, Serafin von; Seitz, Antje, Hrsg.: Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie: Methodik, Potenziale, Hemmnisse. Frankfurt a.M.: Dechema, 2018, S.133–170
- Ruppert, Johannes; Treiber, Kevin: *Statusbericht „Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie“: Ausblick für die Zementindustrie*. In: Schüttgut 2018 (3), S.52–56

### Weitere Veröffentlichungen

- Müller, Christoph; Seidel, Maik; Böhm, Matthias. *Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests: Durchführung und Auswertung*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. N.W., 2015 (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Straßenbau S 87)
- Müller, Christoph; Seidel, Maik; Böhm, Matthias; Stark, Jochen; Ludwig, Horst-Michael; Seyfarth, Katrin. *AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. N.W., 2015 (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Straßenbau S 90)
- Rechberger, Katharina; Bodendiek, Nils. *Katalytische Low-Dust-Entstickung des Abgases an einer Drehofenanlage der Zementindustrie (Reingas – SCR) : Abschlussbericht zum Vorhaben; KfW-Aktenzeichen NKa3 – 001706; Laufzeit des Vorhabens 11/2009 – 12/2014*. Rohrdorf: Südbayerisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH, 2015 (BMU-Umweltinnovationsprogramm Vorhaben-Nr.: 20185) [Zugriff am: 18.08.2015] Verfügbar unter: [http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/abschlussbericht\\_rohrdorf\\_final.pdf](http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/abschlussbericht_rohrdorf_final.pdf)
- Institut Bauen und Umwelt; Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. *Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und ISO 15804: Zement; EPD-VDZ-20170026-IAG1-DE; Ausstellungsdatum 01.03.2017; Gültig bis 28.02.2022*. Königswinter: Institut Bauen und Umwelt, 2017



VDZ e.V.

Tannenstraße 2 ■ 40476 Düsseldorf

VDZ gGmbH

Tannenstraße 2 ■ 40476 Düsseldorf

FIZ GmbH

Tannenstraße 2 ■ 40476 Düsseldorf