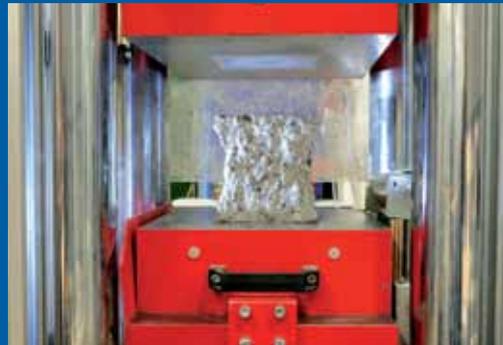




# Jahresmitteilung 2013

Schriftenreihe Baustoffe



**cbm - Centrum Baustoffe und Materialprüfung**





# Jahresmitteilung 2013

**Schriftenreihe Baustoffe**



# Inhalt

<b>1. Vorwort</b>	<b>6</b>
<b>2. Personelle Veränderungen</b>	<b>9</b>
<b>3. Organigramm</b>	<b>10</b>
<b>4. Aus dem Lehrbetrieb</b>	<b>13</b>
4.1. Neue Ausrichtung zum WS 2013/2014	13
4.2. Diplom- und Masterarbeiten	14
4.3. Dissertationen	29
4.4. Große Bauingenieurexkursion zu Baustoffherstellenden Industrien	41
<b>5. Veranstaltungen</b>	<b>55</b>
5.1. 11. Münchener Baustoffseminar	55
5.2. 14. Deutsche Betonkanu-Regatta	57
5.3. Summer University und Trainee-Programm	57
5.4. Betriebsausflug 2013	58
5.5. Weiterbildendes Studium	60
<b>6. Ehrungen</b>	<b>62</b>
6.1. Doce et Delecta	62
6.2. Ernst Otto Fischer-Lehrpreis	62
6.3. Fellowship für Innovation in der Hochschullehre	63
<b>7. Berichte aus den Arbeitsgruppen</b>	<b>64</b>
7.1. Arbeitsgruppenschwerpunkte	64
7.2. Abgeschlossene Forschungsvorhaben	73
7.3. Laufende Forschungsvorhaben	86
7.4. Neue Forschungsvorhaben	88
7.5. Wissenschaftliche Materialprüfung	96
7.6. Das cbm in den Medien	98
<b>8. Mitarbeit in Ausschüssen, Arbeitskreisen, Gremien und Fachkommssionen</b>	<b>100</b>
<b>9. Liste aller Veröffentlichungen 2013</b>	<b>104</b>
<b>10. Ausgewählte Veröffentlichungen</b>	<b>110</b>
10.1. Effect of carbonation, chloride and external sulfates on the leaching behaviour of major and trace elements from concrete	110
10.2. Deaeration and segregation tendencies of highly flowable concrete owing to vibration	123
10.3. Epoxidharzbeschichtete Bewehrung – Neue Erkenntnisse nach zwei Jahrzehnten Praxiserfahrung	132
10.4. Acid Attack on Concrete – Structure of the Corroded Surface Layer	148
10.5. Entwicklung und Prüfung von Betonen mit Selbstheilungscharakter	151
<b>11. Impressum</b>	<b>156</b>

Liebe Freunde und Partner des cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung

Wie wird uns das Jahr 2013 in Erinnerung bleiben?

Vielleicht als das Jahr, in dem der deutsche Papst Benedikt zurücktrat und von Papst Franziskus abgelöst wurde – der erste, der sich auf den Heiligen der Armut und der Armen bezieht? Oder als das Jahr, in dem Angela Merkel ihre dritte Amtszeit mit der „GROKO“ antrat und damit in der Zahl der Kanzlerschaften nur von Konrad Adenauer und Helmut Kohl übertroffen wird ... bisher? Für manchen vielleicht aber auch als das Jahr, in dem der FC Bayern alle Titel einsammelte, die zu vergeben waren?

Ganz so spektakulär war das Jahr 2013 für das cbm - Centrum Baustoffe und Materialprüfung nun nicht. Wir dürfen aber auch dieses Jahr wieder unbescheiden feststellen, dass wir uns in einem ehrgeizigen Umfeld an der TUM und darüber hinaus gut behauptet haben und das Jahr recht erfolgreich abschließen - wir können es also durchaus in guter Erinnerung behalten!

Da ist zum Einen unsere Fakultät, die jetzt BGU - Ingenieur fakultät Bau-Geo-Umwelt - heißt und durch zahlreiche Neuberufungen und auch Einrichtung neuer Professuren ihr Profil verändert. Besonders die Themenbereiche Umwelt und Nachhaltiges Bauen werden gestärkt und man geht damit auf aktuelle Entwicklungen in Gesellschaft und Wirtschaft ein. Dass der eingeschlagene Weg richtig ist und anerkannt wird, zeigt nicht nur das positive Votum internationaler Kollegen im Rahmen der Evaluierung im vorangegangenen Jahr und in Folge gewachsener Anerkennung durch die Hochschulleitung der TU, sondern vor allem auch eine anhaltend hohe Nachfrage von Studierenden nach den inzwischen zahlreichen Studiengängen, die die Fakultät anbietet: mehr als 3000 Studierende sind derzeit eingeschrieben!

Was bedeutet das für das cbm?

Bedingt durch die drei Professuren am cbm bieten wir Lehrveranstaltungen in immerhin 9 Bachelor- und Master-Studiengängen an. Dabei sind wir auch Dienstleister in

anderen Fakultäten wie dem Maschinenwesen, der Wirtschaftsfakultät und der Lehrerbildung. Mit einem derart umfangreichen und komplexen Angebot sind zahlreiche Aufgaben verknüpft - neben der eigentlichen Lehre vor allem Organisation und Ausarbeitung und Korrektur von Klausuren – hier sind es insbesondere im Sommersemester mehrere hundert, die zu bearbeiten sind. Das sind Aufgaben, die neben den Verpflichtungen in Forschung und Materialprüfung laufen und zu einem in den vergangenen Jahren deutlich erhöhten Arbeitsaufwand für die beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeiter geführt haben.

Im Bereich der Masterprogramme haben wir eine neue Struktur der baustoff-bezogenen Vertiefungsfächer eingeführt, die durch die Aufhebung des leider nur gering nachgefragten Masterprogramms „Baustoffe, Bauchemie und Instandsetzung“ erforderlich wurde. Nach dem ersten Eindruck scheinen die beiden neu eingeführten Vertiefungsrichtungen im Studiengang Bauingenieurwesen – „Werkstoffe“ und „Bauwerkserhaltung“ – von den Studierenden gut angenommen zu werden. Schöne Anerkennung für besonderes Engagement in dem Bereich der Lehre drückt sich durch die Verleihung von gut dotierten Preisen aus, vergeben für die Entwicklung des video-gestützten Grundpraktikums zu den Baustoffen, das sich derzeit in der Einführungsphase befindet.

Gute Lehre braucht eine Basis in aktueller Forschung – auch in diesem Bereich sind erhöhte Anstrengungen erforderlich, um den gewohnt hohen Projektstand halten zu können. In unseren Kernthemen zu den verschiedenen Aspekten des Stahlbetons, des Asphalts und der zerstörungsfreien Prüfung laufen zahlreiche öffentlich geförderte oder durch Industrie finanzierte Vorhaben und es mangelt auch nicht an Folgeanträgen und Initiativen. Wir müssen allerdings feststellen, dass die Zeiten, die vergehen, bis es nach einer Antragstellung zu einer Bewilligung kommt, eher länger werden und der bürokratische Aufwand weiter wächst.

Erfolge in Lehre und Forschung drücken sich auch in der Zahl der abgeschlossenen Promotionen aus und da dürfen wir in diesem Jahr auf die wahrhaft stattliche Zahl von 6 Promotionen verweisen. Immerhin drei der frisch gebackenen Doktoren bleiben dem cbm als Mitarbeiter erhalten! Ein schönes Zeichen auch dafür, dass das cbm weiterhin ein attraktives Arbeitsumfeld bieten kann.

Die vielfältigen Aufgaben in der Materialprüfung, zum Asphalt und seinen Ausgangsstoffen, zum Stahl und auch zum Beton, gestellt durch die zahlreichen, oft langjährigen Kunden, bildeten auch in diesem Jahr eine solide Basis für unsere Aktivitäten. Dabei wurden die Rahmenbedingungen nicht nur einfacher: neben den gewachsenen Anforderungen zur Erfüllung formaler Notwendigkeiten zum Arbeitsschutz und zur Gestaltung der Arbeitsplätze – bei unserer drangvollen Enge nicht immer leicht zu erfüllen – war für einige Arbeitsbereiche der AG 5 auch noch eine Akkreditierung, als formale Bestätigung sachgerechter Arbeitsabläufe durch unabhängige Dritte, zu schultern. Ein Extrapäckchen Arbeit, das aber fristgerecht erledigt werden konnte und die Arbeitsfähigkeit in diesen Bereichen für die nächsten Jahre sicherstellt.

Apropos drangvolle Enge – die Fundamente für unsere Bürocontainer, die Entlastung im Bereich der Büroarbeitsplätze bringen werden, wurden fertiggestellt. Die Hochschulleitung hat Wort gehalten und uns auf unser Wehklagen hin hier am Standort Pasing unterstützt. Inzwischen sind die neuen Büros bezugsfertig.

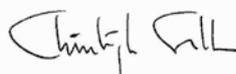
Auch in diesem Jahr haben wir uns mit hohem Engagement und daraus erwachsendem Erfolg als cbm der Hochschul- und Fachöffentlichkeit präsentiert: auf zahlreichen nationalen und internationalen Vortragsveranstaltungen oder die Kollegen aus dem Bereich Beton und der Zerstörungsfreien Prüfung auch in fachbezogenen Fernsehbeiträgen. Hier sind wir weiter auf einem guten Weg, die notwendige Aufmerksamkeit auf unsere Arbeit und unsere Möglichkeiten zu lenken.

Das spiegelt sich auch in dem guten Besuch des 11. Münchener Baustoffseminars zum Thema „Bewehrungen im Betonbau“ wieder, das im April erfolgreich gehalten wurde.

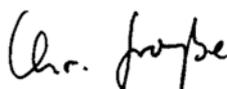
So blicken wir wieder auf ein ereignisreiches und auch ertragreiches Berichtsjahr zurück und möchten uns bei ihnen für die Zusammenarbeit und ihr Interesse bedanken. Wir freuen uns auf weitere, gemeinsam zu lösende Aufgaben.

Ihre

Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen



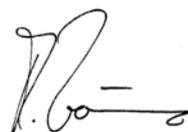
Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Geophys. Christian Große



Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz



Prof. Dr.-Ing. Thomas Wörner



Ausgebildet zum Baustoffprüfer im Uhrzeigersinn: Alexander Gabor, Markus Ullmann, Julian Hörbrand



## 2. Personelle Veränderungen

### Wissenschaftliche Mitarbeiter, die ihre Forschung im cbm aufgenommen haben:

Herr Fabian Malm, M.Sc.	(01.09.2013)
Frau Linda Irbe, M.Sc.	(01.09.2013)
Herr Florian Hiemer, M.Sc.	(25.11.2013)

### Nicht wissenschaftliche Mitarbeiter, die uns nun unterstützen

Frau Nina Lillich	(01.01.2013)
Frau Varinia Erhardt	(15.03.2013)
Herr Martin Baumann	(01.05.2013)
Herr Daniel Elner, B.Sc.	(01.09.2013)
Herr Christoph Müller, Dipl.-Ing. (FH)	(01.09.2013)
Frau Csilla Bognar	(15.09.2013)
Frau Marina Nahm	(15.09.2013)
Frau Bianca Freibuchner	(28.09.2013)

### Baustoffprüfer, die ihre Ausbildung abgeschlossen haben und von uns übernommen wurden

Herr Alexander Gabor	(01.10.2013)
Herr Julian Hörbrand	(01.10.2013)
Herr Markus Ullmann	(01.10.2013)

### neue Auszubildende

Frau Laura Bötl	(01.09.2013)
Frau Tatjana Frey	(01.09.2013)
Frau Alexandra Lindl	(01.09.2013)

### ausgeschiedene Mitarbeiter

Herr Mehmet Öztürk	(14.07.2013)
Frau Stefanie von Greve-Dierfeld, Dipl.-Ing.	(30.04.2013)
Herr Matthias Scholz, B.Sc.	(31.08.2013)
Frau Victoria Leno, Dipl.-Min.	(14.09.2013)
Herr Thomas Hackenbuchner, Dipl.-Ing. (FH)	(30.09.2013)
Herr Manuel Göbel, Dipl.-Ing.	(30.09.2013)
Frau Dorothee Moser, Dipl.-Geophys.	(31.10.2013)
Herr Florian Stark, Dr.-Geophys.	(31.12.2013)

### in den Ruhestand verabschiedet haben wir

Frau Karin Knaus	(31.03.2013)
Herrn Edmund Winkler	(31.03.2013)
Herrn Andreas Volkwein, Dr.-Ing.	(31.05.2013)
Herrn Horst Gawlik	(31.08.2013)

### wir trauern um unseren Mitarbeiter

Herrn Volker Balthes	(†24.06.2013)
----------------------	---------------

## 3. Organigramm

### Institutsleitung

**Lehrstuhl für Werkstoffe und  
Werkstoffprüfung im Bauwesen**

**Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen**

Sekretariat Institutsleitung: Fr. Uhl, Fr. Freibuchner

### Betriebsleitung

**Ltd. Akad. Dir. Dr.-Ing. Thomas Wörner**

**Dr.-Ing. Liudvikas Urbonas**

### Verwaltung

**Assistenz d. Geschäftsleitung**

Fr. Uhl

**Buchhaltung**

Hr. Hart

Fr. Scholz

**Lehrebeauftragte Fr. Dr.-Ing. Spengler**

### AG 1 BINDEMittel UND ZUSATZSTOFFE

**Hr. Dr.-Ing. Urbonas**

**Hr. Beddoe, B.Sc. Ph.D.**

Fr. Dipl.-Ing. Dressler

Hr. Fischer, M.Sc.

Fr. Irbe, M.Sc.

Fr. Wang, M.Sc.

#### Mörtellabor

**Hr. Kriegel**

Hr. Gottmann

Hr. Blendowsky

#### Physiklabor

Fr. Hartlieb-Pfüller

### AG 2 BETONTECHNOLOGIE

**Hr. Dr.-Ing. Lowke**

**Hr. Dipl.-Ing. Skarabis**

Hr. Ing. Durán

Hr. Dipl.-Ing. Kränkel

Fr. Illguth M.Sc.

Fr. Dipl.-Ing. Thiel

Fr. Dr.-Ing. Spengler

#### Assistenz:

Fr. Berceanu-Gefrörer

#### Betonlabor

**Hr. Linz**

Hr. Hobusch

Hr. Höhn

Hr. Omozokpia

### AG 3 STAHL UND KORROSION

**Hr. Dipl.-Ing. Meyer**

**Fr. Dipl.-Ing. Keßler**

Hr. Elner, B.Sc

Hr. Dipl.-Ing. Giebitz

Hr. Hiemer, M.Sc.

Hr. Dipl.-Ing. Huber

Hr. Dipl.-Ing. Müller

Hr. Dipl.-Ing. Osterminski

Hr. Dipl.-Ing. Rahimi

Hr. Dipl.-Ing. Schmid

Hr. Dipl.-Ing. Zashev

Hr. Dipl.-Ing. Zintel

#### Assistenz/Techn. Sachbearbeitung:

Fr. Bognar

Fr. Kohler

Fr. Röttinger

#### Stahllabor

**Hr. Biehler**

Hr. Azie

Hr. Hörber

Hr. Mehnert

Hr. Rughöft

#### Korrosionslabor

Fr. Lillich

**Ausbilderin**

**Auszubildende Baustoffprüfer**

**Auszubildende Chemielaboranten**

Fr. Fritz

Fr. Böltl

Fr. Burkhardt

Fr. Frey

Fr. Lindel

**Fachgebiet Gesteinshüttenkunde**

Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz  
Sekretariat Fr. Deuring

**Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung**

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Geophys. Christian Große  
Sekretariat Fr. Liedtke

**EDV**

Hr. Laureana

**Bibliothek**

Fr. Kassel

**Projektgruppe Modellierung** Hr. Beddoe, B.Sc. Ph.D.

**Projektgruppe Bewehrung** Hr. Dipl.-Ing. Osterminski

**AG 4 CHEMIE**

**Hr. Dr. rer. nat. Hilbig**  
Hr. Gutberlet, M.Sc.

**Chemielabor**

**Hr. Gmell**  
Fr. Erhardt  
Hr. Halegua

**AG 5 BITUMENHALTIGE  
BAUSTOFFE UND GESTEINE**

**Hr. Dr.-Ing. Wörner**  
Fr. Kazakova, M.Sc.

**Sekretariat:**

Fr. Finke  
Fr. Knaup-Windisch

**FG Asphalt**

**Hr. Dr.-Ing. Wörner**  
Hr. Dipl.-Ing. Patzak

**Asphaltlabor**

Hr. Asenov  
Hr. Baumann  
Hr. Gabor  
Hr. Kandler  
Hr. Mittermayr  
Hr. Strzelczyk

**FG Bitumen und  
Abdichtungen**

**Hr. Dr.-Ing. Wallner**  
Fr. Dipl.-Chem. Ing.  
Franke

**Bitumen- und  
Abdichtungslabor**

**Hr. Hofmann**  
**Hr. Schwingenschlögl**  
Hr. Bollmann  
Hr. v. Neuhoff v. d. Ley  
Hr. Ullmann

**FG Gesteine**

**Hr. Dr. rer. nat. Westiner**  
Fr. Dr. rer. nat. Neidinger  
Hr. Dipl.-Ing. Graw

**Gesteinslabor**

**Hr. Kreft**  
Hr. Hell  
Hr. Dexheimer  
Hr. Grieser  
Hr. Hörbrand  
Hr. Mohammed Nur  
Hr. Zeuner  
Hr. Zöge

**Sandlabor**

**Hr. Reier**  
Hr. Janeselli  
Fr. Fritz

**Mechanische Werkstatt**

Hr. Strehle

**AG 6 ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG**

**Hr. Dr. Dipl.-Geophys.  
Stark**

Hr. Dipl.-Geophys. Gro-  
schup  
Hr. Malm, M.Sc.  
Hr. Dipl.-Ing. Richter

**ZfP Labor**

Fr. Gemander, M.Sc.  
Fr. Nahm

**Elektronische Werkstatt**

Hr. Münchmeyer



## 4. Aus dem Lehrbetrieb

### 4.1 Neue Ausrichtung zum WS 2013/2014

#### 4.1.1. E-Learning: Umgestaltung des Moduls „Werkstoffe im Bauwesen“

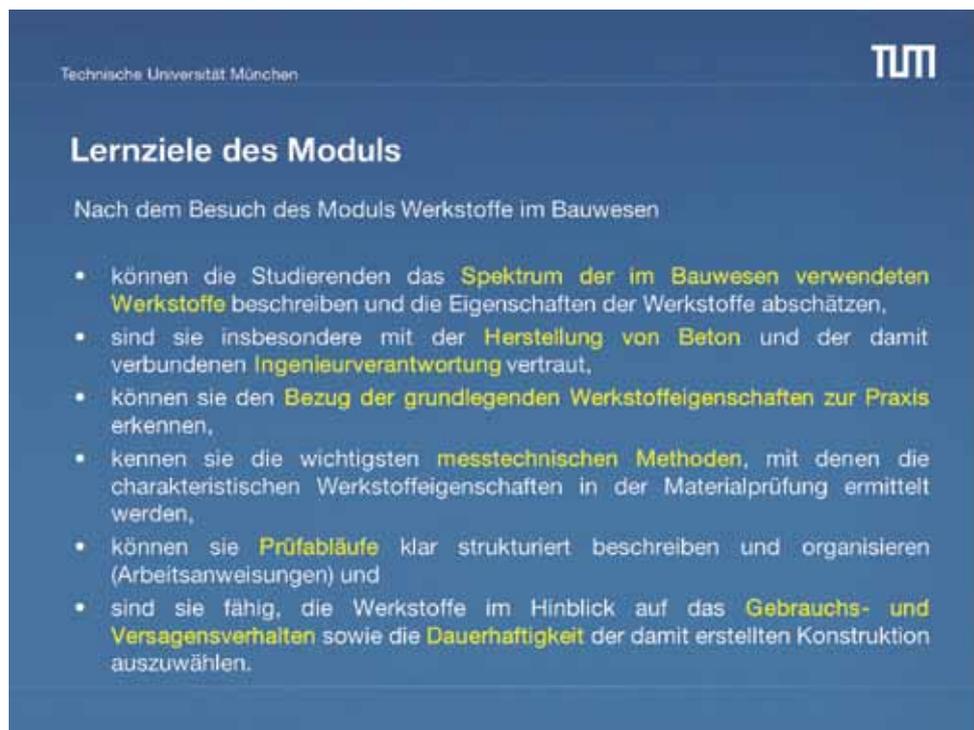
Text von: <http://www.lehren.tum.de/themen/lehrpreise/preistraeger/christoph-gehlen/>

„Rund 300 Studierende durchlaufen zu Beginn des Bachelorstudiums Bauingenieurwesen an der TUM das Pflichtfach „Werkstoffkunde im Bauwesen“, das klassisch aus den Lehrformaten Vorlesung, Übung und Praktikum besteht. In den Praktika kann bei Gruppengrößen von zehn Studierenden allerdings nicht gewährleistet werden, dass alle ausreichend Gelegenheit haben, sich aktiv in die Versuche einzubringen.

Um trotz hoher Studierendenzahlen eigenverantwortliches Lernen zu fördern, wurden die Lehrformate jetzt neu konzipiert und systematisch mit eLearning-Elementen verzahnt. Entstanden ist dabei unter anderem ein Online-Praktikum, in dem Selbsttests, elektronische Sprechstunden und Laborversuche in Videoclips angeboten werden. Dadurch schafft Prof. Gehlen Raum für ein Live-Praktikum, in dem die Studierenden in Kleingruppen selbständig Fallstudien durchführen können. Das Erlernen von Faktenwissen tritt dabei in den Hintergrund - stattdessen geht es darum, Diskurs-, Handlungs- und Interaktionskompetenzen aufzubauen.

Ob die Lernziele auch erreicht werden, beurteilt Prof. Gehlen über ein neues Prüfungsformat. In der „Parcoursprüfung“ wird festgestellt, ob die Studierenden in der Lage sind, selbständig Materialkennwerte zu bestimmen, sie auszuwerten und deren Bezug zur Praxis zu beurteilen. Dabei durchlaufen die Prüflinge wie in einem Zirkeltraining verschiedene Stationen, an denen sie praktische Versuche selbständig ausführen oder erklären müssen.“

Lernziele des Moduls



Technische Universität München TUM

### Lernziele des Moduls

Nach dem Besuch des Moduls Werkstoffe im Bauwesen

- können die Studierenden das **Spektrum der im Bauwesen verwendeten Werkstoffe** beschreiben und die Eigenschaften der Werkstoffe abschätzen,
- sind sie insbesondere mit der **Herstellung von Beton** und der damit verbundenen **Ingenieurverantwortung** vertraut,
- können sie den **Bezug der grundlegenden Werkstoffeigenschaften zur Praxis** erkennen,
- kennen sie die wichtigsten **messtechnischen Methoden**, mit denen die charakteristischen Werkstoffeigenschaften in der Materialprüfung ermittelt werden,
- können sie **Prüfabläufe** klar strukturiert beschreiben und organisieren (Arbeitsanweisungen) und
- sind sie fähig, die Werkstoffe im Hinblick auf das **Gebrauchs- und Versagensverhalten** sowie die **Dauerhaftigkeit** der damit erstellten Konstruktion auszuwählen.

### 4.1.2. Zerstörungsfreie Prüfung in 3 Fakultäten

Der Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung betreute im Sommersemester 2013 die Vorlesung Materialwissenschaften II für das 4. Semester des Bachelorstudiengangs „Ingenieurwissenschaften“ an der Munich School of Engineering (MSE). Der Vorlesungsbetrieb ist dreigeteilt und wird von Dozenten der Fakultäten für Physik, Chemie und Maschinenwesen gehalten. Prof. Große übernahm dabei im 4. Semester den Ingenieurteil. Im Rahmen des Bachelorstudienganges werden zudem Forschungspraktika angeboten, um den Studierenden Einblick in die aktuelle Arbeit zu geben. Mehrere Praktikanten werden vom Lehrstuhl ZfP betreut. Die MSE (<http://www.engineering.mse.tum.de/>) bietet den Studiengang seit dem Wintersemester 2010/2011 als interfakultative Lehrveranstaltung an, an der die Physik, Chemie, Elektrotechnik, Informatik, Mathematik sowie das Maschinen- und Bauingenieurwesen beteiligt sind.

Weitere Lehrveranstaltungen sind „Zerstörungsfreie im Bauwesen“ und „Zerstörungsfreie Prüfung im Maschinenwesen“, welche seit dem Wintersemester 2013/14 für Studierende der Fakultäten Maschinenwesen, BGU und der MSE angeboten werden. Außerdem findet im wöchentlichen Rhythmus das „ZfP-Seminar“ mit ausgewählten Themen statt. Darüber hinaus leistet der Lehrstuhl einen Beitrag zum Praktikum „Konstruktionswerkstoffe“ für Studierende des Bauingenieurwesens sowie zur Lehrveranstaltung „Faser-Matrix-Verbundwerkstoffe“ für Studierende des Maschinenbaus.

## 4.2. Diplom- und Masterarbeiten

### AG Bindemittel und Zusatzstoffe

#### 4.2.1. Einfluss der Carbonatisierung unter erhöhtem Druck und im überkritischen Bereich auf die Materialeigenschaften von erdfeuchten, offenporigen und matrixporigen Mörtelproben unmittelbar nach der Herstellung

Masterarbeit von Marina Lyalyuk

Betreuer: Dipl.-Min. Viktoria Leno

Durch gezielte Carbonatisierung können die Eigenschaften von geeignet zusammengesetzten, zementgebundenen Baustoffen signifikant verbessert werden. Eine der möglichen praktischen Anwendungen der schnellen Carbonatisierung ist die Behandlung von Fertigteilen aus haufwerksporigem Beton oder porosiertem Leichtmörtel. In der Arbeit wurde der Einfluss der Behandlung mit  $\text{CO}_2$  unter erhöhtem Druck oder im überkritischen Zustand auf die Eigenschaften von Leichtmörteln ermittelt.

Für die Untersuchungen wurden verschiedene Leichtmörtel mit Blähglaszuschlag hergestellt und nach 24 h Feuchtlagerung bei  $20\text{ }^\circ\text{C}$  mit  $\text{CO}_2$  behandelt. Die Behandlung wurde mit überkritischem  $\text{CO}_2$  bei 100 bar und  $50\text{ }^\circ\text{C}$  ( $\text{scCO}_2$ ), bzw. mit gasförmigem  $\text{CO}_2$  bei 5 bar und  $20\text{ }^\circ\text{C}$  durchgeführt. Die Druckfestigkeit der Leichtmörtelproben stieg nach der Behandlung mit  $\text{scCO}_2$  um ca. 150 % im Vergleich zu den nicht behandelten Proben. Die Biegezugfestigkeit der Proben nahm dagegen nur leicht zu. Auch die 24-stündige Behandlung mit  $\text{CO}_2$  bei 5 bar führte zu einer deutlichen Erhöhung der Druckfestigkeiten. Die Untersuchungen mit dem Quecksilberdruckporosimeter und dem Rasterelektronenmikroskop zeigten die infolge der Carbonatisierung entstandene Verdichtung des Zementsteingefüges. Auch die Kontaktzone zwischen der Gesteinskörnung und der Zementsteinmatrix war durch neugebildetes Calciumcarbonat verdichtet.

Die gezielte Carbonatisierung zementgebundener Werkstoffe kann neben der Beschleunigung der Erhärtung und der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften auch, wegen des CO<sub>2</sub>-Verbrauchs, der Umwelt zu Gute kommen.

## AG Betontechnologie

### 4.2.2. Anwendung der Mikroindentation zur Beurteilung der Gefügedichtigkeit von Betonen

Masterarbeit von Johannes Hauck

Betreuer: Dipl.-Ing. Jens Skarabis

Fahrbahnoberflächen aus Beton sind aufgrund der Gleitschalungsfertigung unmittelbar nach dem Einbau Umwelteinflüssen wie widrigen klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Verliert der junge Beton zu viel Anmachwasser infolge von Verdunstung, wird die Hydratation im oberflächennahen Bereich gestört. Die Folgen sind eine erhöhte Kapillarporosität und - damit verbunden - schlechtere Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften. Bisher fehlen fundierte Kenntnisse zur Quantifizierung der Gefügedichtigkeit über die Tiefe in Abhängigkeit der Nachbehandlung sowie der Betonzusammensetzung (insbesondere der Zementart). Ziel dieser Masterarbeit war es, mittels Bestimmung der Vickershärte durch Mikroindentation den Einfluss der Austrocknung auf die Gefügedichtigkeit von Betonen zu untersuchen. Dabei wurden die Nachbehandlung und die Betonzusammensetzung variiert. Die so ermittelten Härten geben indirekt Aufschluss über die Dichtigkeit des Gefüges, da die Kapillarporosität als Haupteinflussgröße auf die Dichtigkeit auch die Härte entscheidend beeinflusst. Folgende Feststellungen konnten durch die Ergebnisse der Mikroindentation getroffen werden:

- Unabhängig von der Nachbehandlung hatte die Zementart nur einen geringen Einfluss auf die Härte des Gefüges.
- Die Carbonatisierung des Betons führt zu höheren Härten im unmittelbaren Randbereich der Betone.
- Der Einfluss der Nachbehandlung war entscheidend für die Härte des Gefüges. Der Einfluss der Nachbehandlung konnte bis in eine Tiefe von 20 mm festgestellt werden.

Um einen Bezug zur Praxis herzustellen, konnten die gemessenen Härten aus der Mikroindentation über Kalibrierwerte in Druckfestigkeiten umgerechnet werden, da zwischen diesen Größen ein linearer Zusammenhang besteht. So ließ sich überprüfen, bis in welche Tiefe in Abhängigkeit der klimatischen Lagerung eine Unterschreitung der für den Straßenbau geforderten Druckfestigkeitsklasse C30/37 vorlag.

Anhand der Mittelwerte der Betone wurde für die jeweilige Lagerung/Nachbehandlung gezeigt, dass – wie erwartet – bei schlechter Nachbehandlung im Randbereich der Druckfestigkeitssollwert ( $f_{ck,cube}=37+4=41$ ) unterschritten wird (Abb. 1).

Die Untersuchungen zeigen, dass die Mikroindentation geeignet ist, tiefenabhängig die Gefügedichtigkeit von Betonen zu beurteilen, um z. B. die Nachbehandlung zu bewerten.

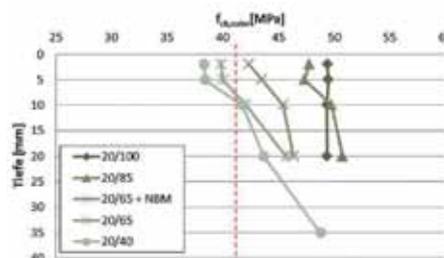


Abb. 1: Aus der Vickershärte berechnete Druckfestigkeit (Mittelwerte der Betone für die jeweilige Lagerung/Nachbehandlung)

### 4.2.3. Untersuchungen von Gefrierprozessen in der Betonrandzone mittels NMR-Relaxometrie

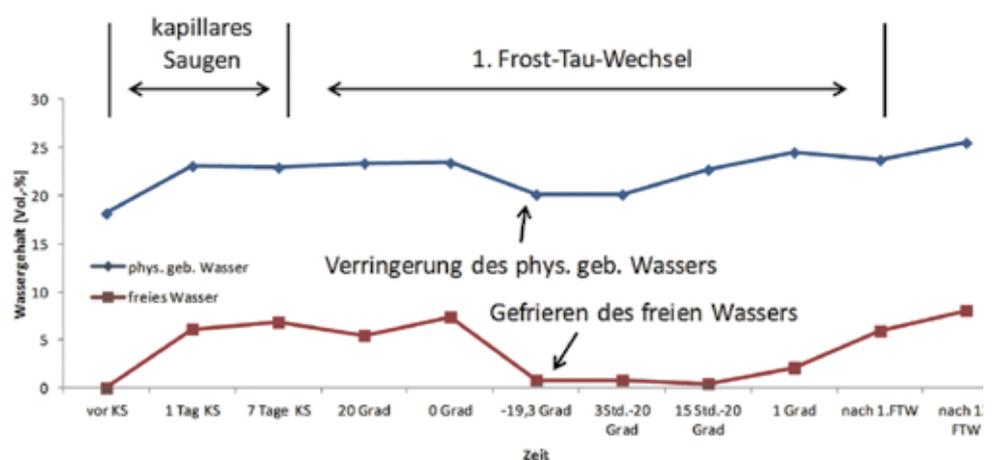
Masterarbeit von Manuel Schraml

Betreuer: Dipl.-Ing. C. Thiel (geb. Milachowski)

NMR (Nuclear Magnetic Resonance) ist ein etabliertes Verfahren, das in der Medizin als diagnostisches Verfahren sowie zur Strukturanalyse in der Chemie eingesetzt wird. Durch die Weiterentwicklung der Technologie hin zu kleinen, offenen Systemen ergeben sich neue Möglichkeiten zur zerstörungsfreien Charakterisierung poröser Baustoffe. So kann mit der NMR-MOUSE (Mobile Universal Surface Explorer) Wasser tiefengestaffelt gemessen werden. Beim Phasenübergang von Wasser zu Eis verändert sich die Struktur des Wassers, wodurch sich das NMR-Signal ändert. Hierdurch ist es möglich, die Eisbildung im oberflächennahen Beton zerstörungsfrei zu messen und damit die in der Literatur beschriebenen Vorgänge beim Frost-Tausalz-Angriff auf Betonen zu überprüfen, was exemplarisch in Abbildung 1 dargestellt ist:

Das Gefrierereignis wird hierbei durch einen Abfall im gemessenen NMR-Signal bestimmt, womit der umgerechnete Wassergehalt abnimmt. Während des Absinkens der Temperatur gefriert bei ausreichend geringen Temperaturen das freie Wasser im Probekörper und es bildet sich makroskopisches Eis. Zusätzlich zum Gefrieren des freien Wassers lässt sich auch ein Rückgang des physikalisch gebundenen Wassers feststellen. Dies lässt vermuten, dass - wie in der Literatur beschrieben - das gefrierende Wasser hydraulische Drücke aufbaut, die dadurch abgebaut werden, dass das ungefrorene Wasser aus der gefrierenden Pore herausgedrückt wird und dieses sofort am bereits gebildeten makroskopischen Eis gefriert. Es findet folglich eine Wasserumverteilung statt. Anhand der parallel bestimmten relativen Längenänderung während des ersten Frost-Tau-Wechsels kann demzufolge auch eindeutig eine Kontraktion des Probekörpers beobachtet werden. Zudem lässt sich nach den durchlaufenen Frost-Tau-Wechsels ein stärkerer Zuwachs an freiem und physikalisch gebundenem Wasser erkennen.

Abbildung 1: Zementstein mit 20% Kalksteinmehl und einem w/z-Wert von 0,55 sowie künstlichen Luftporen vor, nach und während des ersten Frost-Tau-Wechsels in einer Tiefe von 2,5 mm



Durch die Untersuchungen kann folglich das Mikroislinsenmodell von Setzer eindeutig bestätigt werden. So zeigen die NMR-Messungen an Zementsteinen mit einem w/z-Wert von 0,55 eine deutliche zusätzliche Wasseraufnahme durch Frostsaugen, welche auch

durch die Messung der Feuchteaufnahme durch Wägung bestätigt wurde. Ein Vergleich der Feuchteaufnahme des Probekörpers mit einem Probekörper, welcher während den gesamten Hauptuntersuchungen im kapillaren Saugen verblieb, bestätigt die zusätzliche Wasseraufnahme.

Mit dem gewählten Messaufbau lassen sich eindeutig Feuchteaufnahmen und Frostergebnisse erfassen. Allerdings handelt es sich bei der NMR-Technologie um ein indirektes Feuchtemessverfahren. Das bedeutet, dass bei der Auswertung bzw. Interpretation der Ergebnisse darauf geachtet werden muss, dass diese eventuell mit einem Vergleich mit einem anderen Feuchtemessverfahren (z.B. gravimetrisches Verfahren) auf ihre Gültigkeit verifiziert bzw. kalibriert werden müssen, da die angewandte NMR-Technologie von vielen Parametern abhängig ist und es dadurch leicht zu Verfälschungen der Messergebnisse bzw. zu Ungenauigkeiten kommen kann. Bei zwei aufeinander folgenden Messungen konnte im Rahmen der Vorversuche ein maximaler Variationskoeffizient von 0,04 bestimmt werden. Durch Verwendung eines Messrahmens könnte dieser sicherlich verringert werden, um dadurch unnötige Streuungen in den Ergebnissen zu vermeiden.

Weiterhin wäre es interessant, die chemische Veränderung der Zementsteinstruktur bei einer Frost-Tausalz-Schädigung zu untersuchen, da aufgrund des Frostsaugens eine größere Menge an Natriumchlorid innerhalb der Zementsteinstruktur gelangen kann, was sicherlich auch kritisch für chloridinduzierte Korrosionsprozesse ist.

#### **4.2.4. Untersuchungen zum Einfluss rheologischer Eigenschaften auf die Gradierung von Stahlfasern mithilfe von Carbopol®-Gelen**

Masterarbeit von Daniel Weger, B.Sc.  
Betreuer: Sandy Illguth, M.Sc.

Die Gestaltung von Betonkonstruktionen beschränkte sich in den vergangenen Jahren aufgrund der stofflichen Limitierung des Baustoffs Beton auf Tragwerke mit ebenen und plattenartigen Bauteilabmessungen. Es entsteht ein schweres und gedrungenes Erscheinungsbild. Mit innovativen Baustoffen wie ultrahochfestem Beton können leichtere und filigranere Tragkonstruktionen erstellt werden. Zu den neuartigen Konstruktionsmöglichkeiten zählen Schalenträgerwerke aus Stahlfaserbeton. Es wird davon ausgegangen, dass an den Schalenträgerwerken ein größerer Fasergehalt benötigt wird, um die auftretenden Zugkräfte im durch Fugen geschwächten Querschnitt aufnehmen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Rotation als mögliche Technik für die Gradierung von Stahlfasern in dünnwandigen Fertigteilen untersucht. Um eindeutige Aussagen über die Faserverteilung während und nach der Rotation treffen zu können, wurden alle Untersuchungen mit transparenten Carbopol® Gelen durchgeführt. Carbopol® weist ähnliche rheologische Eigenschaften wie Beton auf. Zur Gradierung wurde eine geeignete Rotationsmaschine entwickelt und gebaut. Es wurden Carbopol® Gele mit drei verschiedenen Fließgrenzen hergestellt. Der Fasergehalt betrug 0,5 Vol.-% Mikrostahtfasern (0,19 mm • 6 mm).

Die stahlfaserhaltigen Gele wurden in eine transparente Prismenschalung gefüllt und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten rotiert. Alle 10 Sekunden wurden Aufnahmen des Gradierungsfortschritts gemacht und die Umdrehungsgeschwindigkeit der Maschine erhöht. Um eine photogrammetrische Auswertung der Bilder durchzuführen, wurden die zuvor bearbeiteten und zugeschnittenen Dateien in ein binäres Format umgewandelt. Im nächsten Schritt wurden die Bilder in Matlab eingelesen. Der entwickelte Matlab Algorithmus analysiert das Bild über seine Breite und berechnet Grauwertkurven, die Aussagen über die Faserverteilung in der Schalung ermöglichen. Mit diesen Kurven konnte ein oberer

und ein unterer dynamischer Radius bestimmt werden, der wiederum in ein oberes und unteres dynamisches Stabilitätskriterium umgerechnet werden kann. Mit diesen Kriterien kann abhängig von der Viskosität der Matrix berechnet werden, ab welchem Abstand vom Rotationsmittelpunkt Faserbewegungen stattfinden und ab welchem Abstand fast keine Fasern mehr in der Matrix vorhanden sind.

Die Betrachtung der Faserbewegungen zeigte, dass sich schrägliegende Fasern vermutlich während der Bewegung parallel zur Zentrifugalkraft drehen und sich in dieser Position bewegen. Um diesen Sachverhalt abschließend zu klären, könnten photogrammetrische Untersuchungen während der Rotation und nicht nur in den Rotationspausen vorgenommen oder Versuche mit weniger, aber dafür längeren Fasern in verschiedenen, definierten Ausgangspositionen durchgeführt werden. Bei den Probekörpern in dieser Arbeit nahm der Fasergehalt von der Rotationsachse aus nach außen hin ab. Ebenso konnte beobachtet werden, dass im Rotationszentrum ein ungradierter Bereich bestehen bleibt, der von der Umdrehungsgeschwindigkeit und der Fließgrenze abhängig ist. Die obere dynamische Grenze ist wahrscheinlich von der unteren dynamischen Grenze in einem festen Verhältnis abhängig.

Somit ist durch Rotation eine gleichmäßige Gradierung mit dem geringsten Fasergehalt im Rotationszentrum und dem höchsten Fasergehalt an den Außenrändern bei vierseitig, zentrisch gradierten Platten mit nur einer Faserart in einem Bauteil vermutlich nicht erreichbar. Mit der Rotationsgradierung könnten jedoch alternative Bauteile erzeugt werden. Zum einen ist es denkbar, balkenartige Bauteile mit einseitiger Gradierung mit einer, in der Rotationsachse getrennten, Schalung herzustellen. Um eine gleichmäßige Gradierung über das ganze Bauteil ohne einen ungradierten Bereich zu erhalten, könnten zwei identische Schalungen rotationssymmetrisch um die Rotationsachse angebracht werden. Die Entfernung der beiden Schalungen von der Rotationsachse muss in diesem Fall dem unteren dynamischen Radius entsprechen, also dem Abstand, ab dem eine Faserbewegung auftritt. Eine zweite Anwendungsmöglichkeit wären Bauteile für Punktlasten in Platten- oder Balkenmitte. Bei zentrischer Rotation bleibt in Bauteilmitte ein ungradierter Bereich zurück, also der Bereich mit dem höchsten, flächigen Fasergehalt im Bauteil. Dort wird durch die mittige Lasteinleitung auch der größte Fasergehalt benötigt. Würde man zwei unterschiedliche Faserarten in einem Bauteil verwenden, die sich stark genug in Abmessungen und Masse unterscheiden, wäre es im Fall der vierseitig, zentrisch gradierten Platten denkbar, eine Faseransammlung der größeren und schwereren Fasern an den Rändern des Bauteils

zu erreichen, während die kleineren Fasern keine Gradierung erfahren. Dieser Gradierungszustand mit zwei unterschiedlichen Faserarten in einem Bauteil könnte ebenfalls zu einer höheren Lastübertragungsfähigkeit zwischen den einzelnen Platten in Schalenträgerwerken führen.

Bild  
(bei 500 U/min rotiertes Gel,  
Ansicht von oben auf die Prismenschalung)



## AG Stahl und Korrosion

### 4.2.5. Quantitative Bestimmung der Wasseraufnahme epoxidharzbeschichteter Edelstahlplatten mittels Single-sided NMR

Masterarbeit von Boyuan Wang, M.Sc  
Betreuer: Dipl.- Ing. Marc Zintel

Zur Erzielung einer verbesserten Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen werden, bisher vornehmlich nur in Nordamerika, beachtliche Mengen epoxidharzbeschichteter Bewehrungsstähe eingesetzt. Ein Hauptfaktor für die Korrosionsschutzwirkung ist die etwaige Dichtigkeit der Beschichtung gegen einen anliegenden Elektrolyten (z.B. chloridhaltige Porenlösung). Eine Möglichkeit zur zerstörungsfreien Bestimmung der zeit- und tiefenabhängigen Wasseraufnahme einer Beschichtung auf metallischem Substrat ist der Einsatz der Single-sided NMR (engl. Nuclear Magnetic Resonance).

Ziel der Arbeit war die quantitative Ermittlung von Feuchtegradienten mittels einer NMR-Mouse® unter verschiedenen Lagerungsbedingungen. Hierzu wurden speziell hergestellte einseitig beschichtete Edelstahlplatten in Wasser, künstlicher Porenlösung und in verschiedenen Betonen (CEM I und CEM III mit unterschiedlichen w/z-Werten) eingelagert. Der Feuchtegehalt bzw. -zustand der organischen Beschichtung wurde neben NMR-Messungen auch mittels Gravimetrie erfasst. In einem ersten Ansatz konnten durch eine Ergebniskombination die qualitativen NMR-Ergebnisse in quantitative Feuchteprofile überführt werden.

### 4.2.6. Numerische Untersuchung zur Aussagegenauigkeit von Potentialfeldmessung

Masterarbeit von Di Zhang, M.Sc  
Betreuer: Dipl.- Ing. Sylvia Keßler

Aufgrund großer wirtschaftlicher Verluste durch korrosionsbedingte Schäden und damit anfallender Instandsetzungskosten bei Stahlbetonbauwerken besteht Forschungsbedarf zur Vermeidung und Detektion von Korrosion und zur Optimierung der Instandhaltung. Bei der Instandhaltung ist den Bauherren und Ingenieuren wichtig, die sichere Dauerhaftigkeit der Bauwerke mit Zuverlässigkeit vorherzusagen. Das zerstörungsfreie Messverfahren der Potentialfeldmessung dient der Detektion des Korrosionszustands der Bewehrung in Stahlbetonbauwerken. Mit Hilfe der gewonnenen Messdaten können die aktiv korrodierenden Bereiche eingegrenzt werden. Dies ermöglicht die Einschätzung evtl. nötiger Instandsetzungskosten.

Für eine umfassende Lebensdaueranalyse wäre es wünschenswert die Daten aus der Potentialfeldmessung mit der Lebensdauerberechnung kombinieren zu können. Der limitierende Faktor, weshalb dies noch nicht möglich ist, ist das fehlende Wissen über die Aussagegenauigkeit der Potentialfeldmessung. Die Potentialfeldmessung ist eine qualitative Messmethode. Für die Validierung von qualitativen Messverfahren muss der wahre Zustand mit den Ergebnissen aus der Inspektion verglichen werden. Dieser Vergleich ist bei der Potentialfeldmessung nur möglich, wenn die Betondeckung abgetragen wird und die Bewehrung visuell auf Korrosion untersucht werden kann. Dieser Vorgang ist sehr zeit- und kostenintensiv. Zudem wird kein Bauwerksbetreiber die komplette Bewehrung freilegen lassen, nur um die Aussagegenauigkeit eines Messverfahren zu analysieren. Daher wurde in dieser Masterarbeit ein numerischer Ansatz mit Hilfe der Boundary Element Methods gewählt.

Für die Bestimmung der Aussagegenauigkeit der Potentialfeldmessung wurden zunächst zwei wichtige chloridexponierte Bauteile herausgesucht. Zum einen wurde die Potentialfeldmessung an einer Platte, entsprechend einem befahrenen Parkdeck und einem Stützenfuß simuliert. Verschiedene Faktoren beeinflussen die Potentialfeldmessung und somit auch deren Aussagegenauigkeit. Daher wurden die folgenden Faktoren variiert: die Anodengröße, der Elektrolytwiderstand des Betons, die Betondeckung, das Messraster und die Messrasterkombinationen. Unter einer Messrasterkombination wird verstanden, ob sich eine Anode direkt unterhalb der Radelektrode befindet oder im ungünstigsten Fall direkt in der Mitte von zwei Messstreifen.

Die Auswertung der Aussagegenauigkeit der Potentialfeldmessung hat ergeben, dass das Messraster und die Messrasterkombination den größten Einfluss besitzen. Der Einfluss des Elektrolytwiderstandes ist für hohe Elektrolytwiderstände vernachlässigbar. Bei niedrigen Elektrolytwiderständen sinkt die Aussagegenauigkeit. Die Betondeckung hat nur einen Einfluss in Kombination mit geringen Elektrolytwiderständen. Die numerische Analyse hat ergeben, dass ein Messraster von 10 x 10 cm<sup>2</sup> auch geringe Anodengrößen bei niedrigen Elektrolytwiderständen zuverlässig detektieren kann. Für höhere Elektrolytwiderstände wird ein Messraster von 15 x 15 cm<sup>2</sup> empfohlen.

#### **4.2.7. Untersuchungen zur Korrosionsinitiierung im gerissenen Stahlbeton**

Masterarbeit von Florian Hiemer, M.Sc

Betreuer: Dipl.- Ing. Sylvia Keßler

Das Forschungsvorhaben „Korrosionsverhalten von Stahl in Beton bei Anwendung des Instandsetzungsprinzips W-CI bei gerissenem chloridbelasteten Beton“ dient zur Klärung der Fragestellung, ob bei nachträglicher Abdichtung gerissener, befahrener Betonoberflächen nach dem DBV-Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ standsicherheitsrelevante Korrosion im Rissbereich auftreten kann, bzw. inwiefern ein bereits initiiertes Korrosionsprozess durch eine Beschichtung zum Erliegen kommt. Mit der vorliegenden Arbeit wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Vorversuche an gerissenen chloridbelasteten Stahlbetonprobekörpern durchgeführt.

Dazu wurden drei verschiedene Varianten von Stahlbetonprobekörpern entwickelt und hergestellt, deren Bewehrungsanordnung zunächst dahingehend optimiert wurde, unter Einhaltung baupraktisch relevanter Randbedingungen, einen definierten Biegeriss in Probekörpermitte einzuleiten. Die verschiedenen Bewehrungselemente wurden so angeordnet, dass bei der anschließenden Beaufschlagung der Probekörper mit Chloridlösung, entsprechend Expositionsklasse XD3 nach DIN1045-2, nur ein bestimmter Stahlbereich im Riss depassiviert, sodass ein Makrokorrosionselement gebildet wird. An den Makroelementprobekörpern wurden während der Beaufschlagung die elektrochemischen Kenngrößen der Bewehrungskorrosion erfasst, um Aussagen zu auftretenden Korrosionserscheinungen treffen zu können. Die Auswertung der elektrochemischen Daten bestätigte bei der ersten Probekörperserie die fehlerhafte Risseinleitung, die zur ungewünschten Depassivierung weiterer Stahlbereiche geführt hatte. Bei der zweiten Probekörperserie konnte durch die Chloridexposition keine dauerhafte Korrosionsinitiierung erreicht werden, was neben dem erhöhtem anodischem Polarisationswiderstand, infolge der Vergrößerung der Betondeckung auf 40 mm, auf eine beschleunigte Austrocknung der Betonprobekörper im gewählten Umgebungsklima, und der damit verbundenen Unterbindung des elektrolytischen Ladungstransports, zurückzuführen war.

Eine Korrosionsinitiierung konnte daher durch die kurzzeitige Chloridexposition der gerissenen Stahlbetonproben nicht erreicht werden, jedoch wiesen die entnommenen Chloridprofile auch in größerer Tiefenlage Chloridgehalte auf, bei denen von einer Depassivierung des Stahles ausgegangen werden muss. Aufgrund des ungünstig gewählten Umgebungs-klimas der zweiten Serie, das einen maßgeblichen Einflussfaktor für die exakte Abbildung der zu untersuchenden Situation darstellte, konnte somit keine abgesicherte Aussage zur Unbedenklichkeit der Vorgehensweise nach dem DBV-Merkblatt ausgesprochen werden, wodurch weitergehende Untersuchungen nötig sind.

#### **4.2.8. Charakterisierung der Diffusionseigenschaften als Qualitätsmerkmal epoxidharzbeschichteter Bewehrung**

Masterarbeit von Jeanine Olejnik, M.Sc  
Betreuer: Dipl.- Ing. Marc Zintel

Bereits seit Anfang der siebziger Jahre werden zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen, vor allem in Nordamerika, epoxidharzbeschichtete Bewehrungsstähle eingesetzt. Diese sollen eine anodische Eisenauflösung behindern und somit zum Korrosionsschutz der Bewehrung beitragen. Kern der Korrosionsschutzwirkung ist die Barrierewirkung der intakten Beschichtung gegen den anliegenden Elektrolyten (Beton) sowie der Eindringwiderstand gegen angreifende Chloride (z.B. aus Tausalzen). Obwohl es seit dem Ende der achtziger Jahre auch in der Schweiz und Deutschland Richtlinien zu den Qualitätsanforderungen für epoxidharzbeschichtete Bewehrungsstähle (ECR: engl. epoxy-coated reinforcement) gibt, ist der Einsatz von ECR in Europa noch sehr beschränkt. Trotz der stetigen Verbesserung der Beschichtungstechnologie (u.a. Verbesserung der Harzsysteme und Verfahrenstechnik der Applikation), konnten die durch Schäden in den USA aufgekommenen Fragen zur effektiven Korrosionsschutzwirksamkeit von ECR bisher nicht zufriedenstellend beantwortet werden. Das Ziel der Arbeit ist der Nachweis und die Charakterisierung von Diffusionsvorgängen sowie die quantitative Bestimmung von Ionentransporten mittels Diffusionsversuchen im Labormaßstab. Die in der Arbeit untersuchten Parameter betreffen die Wasseraufnahme, den zugehörigen Widerstand der Beschichtung sowie einen möglichen Ionentransport.

Die u.a. mit Hilfe der Laserablation (LA-ICP-MS) erzielten Versuchsergebnisse lassen darauf schließen, dass Diffusionsvorgänge, wenn überhaupt, in sehr geringen Mengen stattfinden. Das bedeutet auch, dass wenige bis keine Ionen (insbesondere Chlorid) an die Stahlbewehrung gelangen, sofern die Beschichtung unbeschadet ist. Selbst in Lösungsversuchen konnte eine sehr hohe Barrierewirkung (praktisch: eine elektrische Isolationswirkung) des Epoxidharzes nachgewiesen werden. Durch diese Eigenschaften wird die Korrosionsinitiierung bzw. der Korrosionsprozess herausgezögert und die Lebensdauer der Bauwerke erhöht. Dies kann wirtschaftlich von großem Vorteil sein, da Instandsetzungskosten (z.B. für Infrastrukturbauwerke wie Brücken) seltener aufgebracht werden müssen.

#### **4.2.9. Zur Auswertung der Ergebnisse von Dauerschwingversuchen an Betonstahl**

Masterarbeit von Johannes Pfaehler, M.Sc.  
Betreuer: Dipl.-Ing. Kai Osterminski

Betonstähle sind neben statischen Belastungen auch veränderlichen Belastungen ausgesetzt. Hierfür müssen Betonstähle einen Betriebsfestigkeitsnachweis bestehen. Zur Bestimmung der Betriebsfestigkeit oder auch Dauerschwingfestigkeit von Betonstählen und

Betonstahlprodukten werden Dauerschwingversuche durchgeführt. Dabei werden z.B. Betonstähle bis zu einer Oberspannung  $\sigma_o$  mit einer Schwingweite von  $\Delta\sigma$  zyklischen, zumeist Zugschwellbeanspruchungen, ausgesetzt. Das Ergebnis ist die erreichte Anzahl von Lastwechseln  $N$ . Werden die untersuchten Schwingweiten den erreichten Lastwechseln in einem Diagramm gegenübergestellt, erhält man die sogenannte Wöhlerlinie. Um mit einer ausreichenden Sicherheit ein Versagen des Betonstahls infolge Dauerschwingbelastungen ausschließen zu können, werden die Messergebnisse gemäß Norm statistisch ausgewertet.

Diese Ermittlung der Wöhlerlinie für einen Betonstahl gemäß Norm entspricht aber nicht mehr dem heutigen Wissensstand. Daher war es das Ziel dieser Arbeit, ein Auswerteverfahren zu entwickeln, das es erlaubt, die Ergebnisse von Dauerschwingversuchen nach heutigem Wissensstand auszuwerten. Hierzu war es von zentraler Bedeutung die Ergebnisse von Brüchen ( $N < 2 \cdot 10^6$ ) und Durchläufern ( $N = 2 \cdot 10^6$ ) in einem möglichst simplen Auswerteverfahren gleichsam zu berücksichtigen. Als Datenbasis standen Ergebnisse zahlreicher Dauerschwingversuche, die am Centrum Baustoffe und Materialprüfung im Rahmen von Fremdüberwachungen, Zulassungen und Forschungsarbeiten durchgeführt wurden, zur Verfügung.

Wo Brüche sich im Rahmen der statistischen Auswertung leicht berücksichtigen lassen, gestaltet sich die Berücksichtigung der „Teilaussage“ eines Durchläufers als schwieriger. Durchläufer sind Proben die beim Dauerschwingversuch, eine ausreichende Performance gezeigt haben und deren weitere Beprobung aus wirtschaftlichen Gründen nicht fortgesetzt

wird. Die Teilaussage einer solchen Probe kann am besten mit „Die Probe versagt nicht unter 2 Mio Lastwechseln“ bezeichnet werden. Die Aussage dieser Proben wird in der Statistik (z.B. bei der Berechnung der Summenhäufigkeit) in der Anzahl der durchgeführten Untersuchungen berücksichtigt. Eine statistische Verteilung (z.B. logarithmische Normalverteilung) konnte mittels Regression an die Brüche angepasst werden, Abb 1.

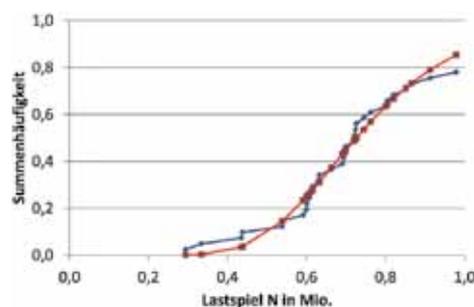


Abb1: Vergleich von Ergebnissen (Brüchen) der Dauerschwingversuche (blauer Datensatz) mit einer durch Regression adaptierten Kurve einer logarithmischen Normalverteilung (roter Datensatz); Betonstahl Durchmesser 14 mm, Schwingweite von 215 N/mm<sup>2</sup>

Nach Entwicklung des Auswerteverfahrens konnten unterschiedliche Einflüsse auf das Dauerschwingverhalten quantifiziert werden. Dazu gehörten:

- Der Einfluss des untersuchten Durchmessers,
- der Einfluss der Schwingweiten (→Auswertung in Bezug auf die Wöhlerlinie),
- die Untersuchung eines „Trainiereffekts“ (Verbesserung des Dauerschwingverhaltens bei Erhöhung der Schwingweite bei Durchlauf einer Probe) und
- der Einfluss der Prüffrequenz.

#### **4.2.10. Berechnung der Oberflächenchloridkonzentration zur Modellierung des Chloridtransports in Meerwasserbauwerken**

Diplomarbeit von Dipl.-Ing. Rihai Huang

Betreuer: Dipl.-Ing. Amir Rahimi

Der Zeitpunkt der Initiierung von Bewehrungskorrosion in Stahlbetonkonstruktionen hängt von verschiedenen Materialkennwerten und Umweltbedingungen ab. Ein bedeutender Parameter bei der Modellierung des Chloridtransports im Beton stellt der Chloridgehalt an der Bauteiloberfläche dar, der sowohl material- als auch umweltabhängig ist. Die Chlorid-Sorptionsisothermen und -bindekazapazität des Betons einerseits, die Chloridkonzentration des Meerwassers sowie die Exposition des Bauteils andererseits beeinflussen die Oberflächenchloridkonzentration des Betons. Trotz des entscheidenden Einflusses dieses Parameters besteht noch kein bewährter und einheitlicher Ansatz für seine Berechnung und Berücksichtigung im Modell.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden die vorhandenen Ansätze zur Berechnung der Oberflächen-chlorid-konzentration des Betons gegenübergestellt und durch den Vergleich mit den Daten aus Bauwerks- und Laboruntersuchungen bewertet. Die chemo-physikalischen Modelle auf Basis der Chlorid-Sorptionsisothermen des Betons (z. B. nach Tang) sind zum einen in ihrer Anwendung beschränkt, da für jeden Beton oder zumindest für jede Bindemittelkombination die Sorptionsisothermen ermittelt werden müssen. Zum anderen geben diese Modelle zum Teil die Praxisverhältnisse nicht wieder. Beispielsweise wird für Hochofenzementbetone aufgrund ihrer hohen Chloridbindekazapazität niedrigere Oberflächenchloridkonzentrationen gerechnet als für Portland-zementbetone, was jedoch den Betrachtungen aus den Bauwerks- und Laboruntersuchungen widerspricht. Pragmatische, auf Erfahrung beruhende Modelle (z. B. nach LNEC E 465) eignen sich hierfür besser, die jedoch weiterhin modifiziert und kalibriert werden müssen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Literaturlauswertung sowie Bauwerks- und Laboruntersuchungen einen deutlichen Einfluss der Expositions-kategorie und sonstigen örtlichen Gegebenheiten (z. B. Geometrie und Orientierung) auf die Oberflächenchloridkonzentration. Einflüsse aus der Betonzusammensetzung (Bindemittelart, Porosität etc.) und der Chloridquelle (Salzgehalt) konnten nicht eindeutig ermittelt werden.

## AG Chemie

### 4.2.11. Vergleichende Untersuchungen von Aschen aus Flugstromvergasungsprozessen

Masterarbeit von Caroline Jeannette von Lavergne-Peguilhen  
Betreuer: Dipl.-Ing. Mario Nakonz (Lehrstuhl für Energiesysteme),  
Dr. Harald Hilbig

IGCC-Kraftwerke (Integrated Gas Combined Cycle) zur kombinierten Vergasung von Kohle mit anschließender Zuführung in eine GuD-Anlage (Gas- und Dampfdruckturbine) werden im Hinblick auf zunehmenden Druck durch die Energie- und Klimapolitik in naher Zukunft verstärkt eingesetzt werden. Derzeit besteht noch Forschungsbedarf aufgrund der hohen Temperaturen während des Vergasungsprozesses. Dabei werden Schadstoffe in Form von Alkalien freigesetzt. Dies führt zur Korrosion und Verschlackung der Anlagenteile und somit zur Verminderung der Wirkungsgrade. Folglich ist es wichtig, umfassendes Wissen über das Verhalten der Alkalien während der Prozesskette zu erlangen. Hierfür müssen die Brennstoffe hinsichtlich ihrer Elementzusammensetzung analysiert werden. Mit Hilfe der vorliegenden Arbeit soll eine Erweiterung und Validierung des heutigen Kenntnisstandes über die Kohlenbrennstoffanalyse erfolgen.

Zur Durchführung wurden fünf Kohlebrennstoffarten (je zwei Braun- und Steinkohlen, ein Anthrazit) mittels der fünf Messmethoden CHNS-Elementaranalyse, Atomabsorptionsspektrometrie (AAS), Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), Emissionsspektrometrie mit induktiv-gekoppeltem Plasma (ICP-OES) sowie Laserablations-Massenspektrometrie mit induktiv-gekoppeltem Plasma (LA-ICP-MS) analysiert. Zur Herstellung der Proben wurden die Brennstoffe bei mehreren Temperaturen und Verweilzeiten verascht. Im Digitalmikroskop wurden Aufnahmen der Ascheproben erstellt und beispielhaft durch Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen ergänzt wurden.

Ein Ziel der Arbeit bestand in der Beurteilung der Messmethoden auf ihre Eignung zur Analyse einer großen Anzahl von Brennstoffaschen. Die Messungen mittels CHNS-Elementaranalyse ergaben eine generelle Abnahme des Kohlenstoff- und Schwefelgehaltes mit steigender Veraschungstemperatur. Sie kann künftig zur Ermittlung der Rest-C-Konzentration schnell und sicher eingesetzt werden.

Das etablierte Messverfahren der AAS lieferte ausgewählte Kalium- und Natriumwerte. Aufgrund des hohen Aufwands bei der Probenvorbereitung wurde es trotz genauester Ergebnisse als ungeeignet eingestuft.

Die Messergebnisse mittels ICP-OES ausgewählter Proben dienten in erster Linie als Referenzwerte für die nachfolgende LA-ICP-MS.

Zur Bewertung der Analyseverfahren wurden v.a. RFA und LA-ICP-MS verglichen. Letztere erwies sich aufgrund des höheren Messaufwandes und konstruktionsbedingter Streuung der Messwerte als weniger geeignet. Dies konnte durch die Analyse anderer, bereits vorliegender Aschen aus einem Versuchs-Druckflugstromreaktor (PiTER) bestätigt werden. Nach der Messdurchführung gaben Aufnahmen mit dem 3D-Scanning-Mikroskop ergänzend Aufschluss über die Qualität der Probenvorbereitung und des Laserablationsvorgang. Abschließend wird die Messung mittels RFA empfohlen.

Das zweite Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung der Veraschungstemperaturen und -zeiten. Die Ascheherstellung sollte so geschehen, dass die flüchtigen Elemente (Na, K, S, P) zur Messung erhalten bleiben. Der Einfluss des Veraschungsgrades wurde auf Basis der RFA-Messwerte ermittelt. Im Ergebnis zeigten sich keine weiteren Veränderungen ab zwei Stunden Veraschungszeit. Die Wahl der Temperatur unterscheidet sich in Abhängigkeit vom Brennstoff und liegt bei 550 oder 650 °C.

Das letzte Ziel bestand in einer Machbarkeitsstudie zur Messung bereits vorhandener Proben aus einem Niedertemperatur-Drahtnetzdruckreaktor mittels LA-ICP-MS. Diese zeichnen sich durch geringe Materialmengen im Mikrogramm-Bereich aus. Nach heutigem Wissensstand ist die Messung mittels LA-ICP-MS die beste Lösung zur Untersuchung derartiger Proben. Die Machbarkeit konnte, trotz derzeit hohem Aufwand, als gegeben bewertet werden.

## **AG Zerstörungsfreie Prüfung**

### **4.2.12 Schallemissionsanalyse bei Pulloutexperimenten an Verbunddübeln**

Masterarbeit von Manuel Raith (Studiengang Baustoffe, Bauchemie, Instandsetzung)

Betreuer: Dipl.-Ing. Ronald Richter und Dipl.-Ing. Thomas Kränkel

Verbunddübel werden zur nachträglichen Befestigung großer Lasten an massiven Bauteilen eingesetzt. Es handelt sich dabei um ein Mehrkomponentensystem, bestehend aus einer Ankerstange und Verbundmörtel. Als Verbundmörtel können sowohl anorganische Bindemittel wie etwa Zement, als auch Reaktionsharze verwendet werden. Die Masterarbeit befasste sich dabei mit Verbunddübeln, deren Mörtel auf der Basis von Reaktionsharzen hergestellt werden. Zur Ausbruchssicherung im Berg- und Tunnelbau fanden Verbunddübel bereits in den 50er-Jahren Verwendung. In den 60er-Jahren begann die Entwicklung und Produktion von Verbunddübeln, die zur Befestigung großer Lasten an massiven Bauteilen verwendet werden. Seit 1975 die ersten Zulassungen für in Reaktionsharz gesetzte Verbunddübel erteilt wurden, ist deren Tragverhalten systematisch untersucht worden. In den vergangenen Jahren führte das Versagen von Verbunddübeln aufgrund von Materialermüdung zu dramatischen Unfällen. So hatte der Teileinsturz des Fort Point Channel Tunnels in Boston einen Todesfall und Schäden von etwa 80 Millionen US\$ zur Folge. Um ein besseres Verständnis bezüglich des Langzeitverhaltens von Verbunddübeln zu erreichen, wurden Pullout- und Dauerstandversuche an Verbunddübeln durchgeführt. Nachdem die Schädigungsentwicklung des Verbundmörtels und des Ankergrundes bei Pullout-Experimenten nicht direkt beobachtet werden kann, besteht der Wunsch nach einer indirekten Beobachtungsmöglichkeit. Mit der Schallemissionsanalyse (SEA) und insbesondere der Lokalisierung der Schallemissionen konnte der Schädigungsverlauf analysiert werden. Dies ermöglichte zunächst die zeitliche und räumliche Zuordnung von Schallemissionen zur jeweiligen Belastungsstufe. Der Pullout von Verbunddübeln aus Beton wurde bisher noch nicht mit Hilfe der SEA untersucht. Ziel der Arbeit war daher, die notwendigen Verfahren und Randbedingungen zu ermitteln, die für die Analyse der Schädigungsentwicklung von Verbunddübeln unter steigender Last, mit Hilfe der Schallemissionsanalyse in diesem Anwendungsfall notwendig sind. Ein weiteres Ziel der Arbeit war die Implementierung eines Systems zur Auswertung von Schallemissionsdaten. Die beschriebenen Anwendungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie für die Schallemissionsanalyse besonders gut geeignet sind. Mit den im Rahmen der Arbeit entwickelten Programmen kann eine zeitnahe Auswertung von SEA-Daten gewährleistet werden, so dass einzelne Experimente schnell miteinander verglichen werden können.

#### **4.2.13. Terahertz measurements for the detection of material defects in GRP and GRP composites**

Masterarbeit von Verena Schlamp (Studiengang Energie- und Prozesstechnik)  
Betreuer: Dr. Florian Stark

In the last two decades the terahertz technology has recorded an enormous progress. One specific field of research currently is in the area of non-destructive material testing. This thesis deals with terahertz measurements for the detection of material defects in GRP and GRP composites. Before taking measurements some theoretical background with regard to terahertz radiation and the generation of terahertz radiation is required. There are different opportunities to generate terahertz radiation, for example, purely optically, electronically or optoelectronically. All terahertz measurements described in this Master thesis are made with an all-electronic system. In the beginning basic material defects are explained. Appropriate specimens with defined material defects are manufactured for the realization of terahertz measurements. These GRP and GRP composite specimens and additional real samples (two GRP and GRP composite structures, tensile specimen, two sections of a wind rotor blade and two wind rotor blades of 3 m span) are described concerning the structure and material defects. The main part of this work concentrates on the description of the test setup for terahertz measurements as well as the analysis of the measurement data including error estimation. Besides the terahertz measurements further lock-in thermography measurements are taken at the same components and the results are analysed. Another measurement method which is considered is ultrasound especially the ultrasonic Pitch-Catch-Swept method. Selected specimens are measured and the measured data are interpreted. Finally, different measurement methods (Terahertz method, Lock-in thermography, Ultrasonic Pitch-Catch-Swept method, Ultrasound and X-ray-CT) are compared to each other within an evaluation matrix.

#### **4.2.14. Analyse von Schwingungen und Dehnungen modularer Fahrbahnübergänge**

Masterarbeit von Senta Pessel (Studiengang Bauingenieurwesen)  
Betreuer: Dipl. Geophys. Robin Groschup

Modulare Fahrbahnübergänge gleichen als Verbindungselemente zwischen Widerlager und Brücke Relativbewegungen aus, die durch externe Kräfte und Temperaturänderungen entstehen. In dieser Arbeit wurden Daten verschiedener Messungen an Fahrbahnübergängen analysiert. Neben der Beschreibung konstruktiver Grundlagen wurden Messverfahren basierend auf Dehnungs- und Erschütterungsmessungen dargestellt, um Belastungen der Fahrbahnübergänge quantitativ zu erfassen.

Bei der Auswertung von Dehnungsmessungen, die während kontrollierter Fahrzeugüberfahrten durchgeführt wurden, wurde auf dynamische Besonderheiten, wie z.B. Verstärkungsfaktoren, eingegangen. Darüber hinaus wurde ein Messkonzept vorgestellt und überprüft, inwiefern Erschütterungsmessungen zur Zustandsdiagnose an Fahrbahnübergängen eingesetzt werden können. Da es bei dem großen Dynamikumfang der real auftretenden Messgrößen unvermeidbar war, dass Sensorsignale übersteuert waren, wurde eine Methodik erarbeitet, relevante Signale zu identifizieren und effektiv zur Zustandsbeurteilung einzusetzen.

#### **4.2.15. Impakt-Echo Methode zur Prüfung der Güte von Hinterfüllungen von Tübbing im Tunnelbau**

Masterarbeit von Marius Gell (Studiengang Bauingenieurwesen)  
Betreuer: Dipl. Geophys. Robin Groschup

Im maschinellen Tunnelvortrieb werden nach dem Ausbruch des Gebirges häufig sogenannte Tunneltübbinge eingebaut. Dabei handelt es sich um Fertigbetonteile, die durch eine Mörtelhinterfüllung formschlüssig mit dem umgebenden Gebirge verbunden werden müssen. Eine Qualitätskontrolle dieser Hinterfüllung mit volumetrischen Methoden ist schwierig und ungenau, da das Volumen des ausgebrochenen Hohlraums nur schwer kontrolliert werden kann. Herkömmliche Methoden zur Qualitätssicherung, wie Kernbohrungen, haben gravierende Nachteile, da sie z. B. eingebrachte Dichtmaterialien zerstören. Als Alternative bietet sich eine zerstörungsfreie Methode, basierend auf dem Impakt-Echo-Verfahren an. Dabei wird eine Oberfläche durch mechanische Impakts angeregt und die dadurch entstehenden elastischen Wellen mit geeigneter Sensorik aufgezeichnet. Aus dem Dämpfungsverhalten der angeregten Schwingungen können Rückschlüsse auf das Medium gezogen werden, das sich hinter dem per Hammerschlag angeregten Material befindet.

Dieses Messverfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit sowohl an einem Laborprobekörper als auch an einem echten Tunneltübbing mit verschiedenen Hinterfüllungsmedien evaluiert. Es konnte gezeigt werden, dass das Messprinzip sehr gut zwischen den Hinterfüllungsmedien Luft (d. h. der Tübbing ist unzureichend hinterfüllt) und Mörtel (d.h. der Tübbing ist ausreichend hinterfüllt) unterscheiden kann. Weiterer Forschungsbedarf besteht durch Schwierigkeiten bei der Unterscheidung von frischem bzw. weniger steifem Mörtel und Wasser.

#### **4.2.16. Zerstörungsfreie Messungen im Museum: Licht und UV-Strahlung**

Masterarbeit von Lorenz Nolden (Studiengang Maschinenwesen)  
Betreuer: Dipl. Geophys. Robin Groschup

Licht, UV- und IR-Strahlung haben das Potential, in Museen ausgestellte Exponate durch photochemische und thermodynamische Prozesse zu verändern und ihnen dadurch zu schaden. Da diese Schädigungen irreversibel sind, sollten sie verhindert oder auf ein annehmbares Maß begrenzt werden. Jedoch ist für den Menschen beim Besuch einer Ausstellung eine adäquate Beleuchtung erforderlich, die unter anderem mit dem zunehmenden Alter des Besuchers und dem abnehmenden Kontrast des Exponats zunehmen muss. Die Aufgabe des Museums besteht also darin einen Kompromiss zwischen Kunstgenuss und Kunstschutz zu finden. Mit dem Wissen über Strahlung und dessen Schädigungsvermögen in Museen wurde zur Untersuchung an Musikinstrumenten im Deutschen Museum München im Rahmen dieser Arbeit ein geeignetes Spektrometer ausgewählt. Bei den durchgeführten Messungen wurde festgestellt, dass die Bestrahlung während der Öffnungszeiten angemessen ist und die UV-Strahlung immer unterhalb des relativen Anteils am Lichtstrom von  $75 \mu\text{W} / \text{lm}$  liegt. Während des Sonnenauf- und -untergangs ist die Beleuchtungsstärke aufgrund direkter Einstrahlung jedoch mit mehreren  $1000 \text{ lx}$  deutlich zu hoch. Hierzu wurden in der Arbeit Empfehlungen und mögliche Abhilfemaßnahmen vorgeschlagen.

#### **4.2.17. Einseitige Inspektion von CFK-Waben-Strukturen mittels Ultraschall-Impuls-Echo-Prüfung**

Diplomarbeit von Dipl.-Ing. Tobias Karl (Studiengang Fahrzeug- und Motorentechnik)  
Betreuer: Dr. Florian Stark und Dipl.-Ing. (FH) Martin Hauf, MBA;  
durchgeführt bei der Firma Eurocopter

Der Anteil von sicherheitskritischen Faserverbundstrukturen in modernen Hubschraubern ist innerhalb der letzten Jahre stetig gestiegen, jedoch konnte bisher kein einseitiges zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Untersuchung von CFK-Wabenstrukturen mit Nomex-Honigwabenkern erfolgreich entwickelt werden. Somit muss für eine zerstörungsfreie Prüfung von Bauteilen in Sandwichbauweise ein enormer zeitlicher sowie finanzieller Aufwand betrieben werden, um diese Strukturen beidseitig zu prüfen. Bei der Wartung müssten die Komponenten ausgebaut und eine beidseitige Zugänglichkeit gewährleistet werden, während bei der Qualitätssicherung im Fertigungsprozess auf teure komplexe Maschinen zurückgegriffen werden muss. Auch beim Design der Komponenten müssen Geometrien auf die Prüfbarkeit hin optimiert werden, wodurch der konsequente Leichtbau gegebenenfalls eingeschränkt wird. Diese Arbeit beschäftigte sich mit dem grundlegenden Potential der Ultraschall-Impuls-Echo-Prüfung zur einseitigen Wabenprüfung, um die oben beschriebene Problematik zu untersuchen und Lösungsansätze zu liefern, um eine einseitige Wabenprüfung mit diesem robusten, etablierten, flexiblen und mobilen Verfahren zu ermöglichen. Hierfür werden drei Optimierungsmöglichkeiten identifiziert mit denen eine einseitige Wabenprüfung ermöglicht werden kann: Optimierung des Prüfgeräts, Optimierung der Wabenstruktur, Optimierung der Messsignalinterpretation.

Für alle drei Optimierungsmöglichkeiten wurden die relevanten Grundlagen erarbeitet, um anschließend mit dem gewonnenen Wissen die jeweiligen Prüfparameter so anzupassen, dass eine einseitige Untersuchung möglich wird. Experimentell wurden Proben, die mit den verschiedenen bei der Firma Eurocopter als relevant definierten Fehlern präpariert worden sind, untersucht, um die theoretischen Annahmen zu validieren. Durch eine Anpassung der oben genannten Prüfparameter kann so eine Leistungsfähigkeit der einseitigen Prüfung erreicht werden, die zuvor nur mit einem zweiseitigen Prüfverfahren möglich gewesen war. Mit Hilfe der Messsignalinterpretation konnten erste Unterscheidungskriterien zur Fehlertiefenortung identifiziert werden. In einem weiteren Schritt wurde die Schallfortpflanzung in Wabenstrukturen untersucht. Auf Grund der Auswertung dieser Messungen wurde deutlich, dass trotz der guten Ergebnisse in dieser Arbeit die Anregung bisher suboptimal erfolgt ist und somit ein größeres Potential zur Detektion von rückseitigen Fehlern vorhanden ist.

#### **4.2.18. Zerstörungsfreie Prüfung von Niet- und Befestigungsbohrungen in CFK-Strukturen mit dem Ultraschall-Impuls-Echo-Verfahren**

Diplomarbeit von Dipl.-Ing. Fabian Can Kunisch (Studiengang Luft- und Raumfahrt)  
Betreuer: Dr. Florian Stark und Dipl.-Ing. (FH) Manuel Holzheimer;  
durchgeführt bei der Firma Eurocopter

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden die Möglichkeiten der zerstörungsfreien Prüfung von Niet- und Befestigungsbohrungen in monolithischen CFK-Strukturen mit Hilfe des Ultraschall-Impuls-Echo-Verfahrens untersucht. Hintergrund der Untersuchungen sind Bauteildefekte, die durch den Bohr- und Nietvorgang induziert werden. Typischerweise handelt es sich bei diesen Defekten um Delaminationen im Bereich der Bohrungen. Bisher standen keine stabilen zerstörungsfreien Serienprüfmethoden zur reproduzierbaren Erkennung die-

ser Defekte zur Verfügung. Das Impuls-Echo-Ultraschall-Verfahren zählt zu den klassischen Ultraschallprüfverfahren und bietet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Es wurde daher für diese Prüfaufgabe herangezogen.

Defektfreies Bohren stellt für CFK-Bauteile im Allgemeinen eine große Herausforderung an die Fertigungstechnologie dar. Zunächst ist daher ein grundsätzliches Verständnis für den Bohrvorgang in monolithischen kohlenstofffaserverstärkten Verbundstrukturen geschaffen worden. Daran anknüpfend wurden die zur Prüfung relevanten Materialien und ihre Kombinationen in gefügtem Zustand identifiziert. Davon wurden Prüfscenarien abgeleitet, um festzustellen, zu welchem Zeitpunkt der Produktion oder Montage eine Prüfung der Luftfahrtbauteile nötig sein kann.

Mit diesen gewonnenen Informationen wurden in Anlehnung an die Prüfvorschrift AITM6-4022:3 Konzepte für Prüfkörper mit künstlichen Defekten (repräsentativ für die Delaminationen) abgeleitet, mit denen eine systematische Untersuchung, unter Erprobung verschiedener Ultraschallprüftechniken, möglich war. Die entwickelten und gefertigten Prüfkörper repräsentierten das entsprechende Bauteil der Luftfahrtstruktur in Material, strukturellem Aufbau (Lagenorientierung, Gewebeart), Oberfläche und Bohrungsgrößen sowie Art der Defekte. So entstanden Prüfkörper als Einzelbauteile und Bauteilverbunde. Anhand der erfolgreichen Untersuchungen an diesen Prüfkörpern und der Erprobung verschiedener Ultraschallprüftechnologien mittels Einzelschwinger- und Array-Prüfköpfen wurden Vorschläge für serientaugliche Prüfmethoden abgeleitet. Sie ermöglichen eine robuste und reproduzierbare Prüfung von Bohrungen mit und ohne gesetztes Verbindungselement an Einzelbauteilen sowie im Bauteilverbund. Bei der Prüfung am Bauteilverbund wird sich die spaltüberbrückende Eigenschaft einer Dicht- sowie einer Ausgleichsmasse zwischen den Bauteilen zu Nutze gemacht. Somit wurde die Möglichkeit nachgewiesen, gefügte Bauteile, ohne Änderung des Montageablaufs, zerstörungsfrei zu inspizieren. Zur offiziellen Qualifizierung eines der Verfahren wurde eine POD-Analyse (Probability of Detection) erfolgreich durchgeführt. Daran anschließend wurde auf die Integrierbarkeit der qualifizierten Prüfmethode in den aktuellen Serienprüf- und Montageprozess eingegangen. Basierend auf den gemachten Erfahrungen bezüglich der Handhabung der verwendeten Prüfköpfe, wird abschließend ein Ausblick auf deren Optimierungspotential gegeben.

### 4.3. Dissertationen

#### 4.3.1. Einfluss von Tausalz und puzzolanischen, aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton

Name	Anne Dressler
E-Mail	anne.dressler@tum.de
Beginn	12/2008
Ende	10/2013
Vorsitzender	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Prüfer	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig (Bauhaus Universität Weimar)

Der betonschädigende Mechanismus der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR), bei dem die alkalische Betonporenlösung mit reaktiven Bestandteilen der Gesteinskörnung ( $\text{SiO}_2$ ) ein quellfähiges Gel bildet, wird durch zwei Faktoren maßgeblich beeinflusst: Erstens verschärft der Eintrag von Alkalien aus Tausalz (NaCl) in den Beton die Schädigungen infolge AKR. Zweitens verringert bzw. vermeidet der Einsatz von puzzolanischen Betonzusatzstoffen

fen die AKR. Inwiefern externe Alkalien die AKR-verniedemde Wirkung puzzolanischer, aluminiumhaltiger Betonzusatzstoffe beeinflussen, wurde bisher wenig untersucht.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Mechanismen des Alkalieintrags in Betone mit alkaliempfindlicher Gesteinskörnung zu analysieren und dabei die schadensmindernde Wirkung puzzolanischer, aluminiumhaltiger Zusatzstoffe differenziert zu betrachten.

Zu diesem Zweck wurden Betonproben untersucht, bei denen ein stufenweiser Zementaustausch durch puzzolanische Betonzusatzstoffe mit unterschiedlichen Alkali- und Aluminiumgehalten (Flugasche, Metakaolin) erfolgte. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern des Betons, wurden Bindemittelzusammensetzung, reaktive Gesteinskörnung/Alkali-Kieselsäure-Gele, Porenlösung und Porosität getrennt voneinander betrachtet.

Es ist dabei festzustellen, dass für die Verstärkung der AKR durch einen Eintrag von NaCl nicht ein einzelner Mechanismus maßgebend ist. Es finden vielmehr unterschiedliche, sich gegenseitig beeinflussende und zum Teil gegenläufige Veränderungen im Betongefüge statt.

Die Kapillarporosität bestimmt die Transportvorgänge im Beton. Änderungen der Kapillarporosität wirken sich deshalb auf die Menge und Zusammensetzung der Alkali-Kieselsäure-Gele sowie die Zusammensetzung der Betonporenlösung und der Zementsteinphasen aus.

Die im Falle eines NaCl-Eintrags gebildeten, natriumhaltigen Gele verursachen vermutlich einen höheren Quelldruck, als kaliumhaltige Gele, wie sie in von NaCl unbeeinflussten Betonen zu finden sind.

In der Porenlösung sinkt die OH<sup>-</sup>-Konzentration infolge des NaCl-Eintrags deutlich ab. Dies liegt einerseits an der starken Auslaugung salzbeaufschlagter Betone, andererseits an der Umwandlung von Ettringit zu Friedel'schem Salz. Obwohl die Löslichkeit von Silicium aus der reaktiven Gesteinskörnung mit sinkender OH<sup>-</sup>-Konzentration abnehmen sollte, findet eine Verschärfung des AKR-Schadens statt. Die Untersuchungen ergeben, dass Interaktionen zwischen den Protonen aus der Hydrathülle der Natriumionen mit der SiO<sub>2</sub>-Oberfläche die OH<sup>-</sup>-Konzentration örtlich erhöhen können. Eine Bindung der Chloridionen und eine damit steigende OH<sup>-</sup>-Konzentration als Ladungsausgleich der Natriumionen ist daher nicht nötig. Zusätzlich kann sich im Beisein von NaCl ein NaHSiO<sub>3</sub>-Komplex bilden. Beide Effekte erhöhen die Löslichkeit von Silicium. Dies führt zu einer verstärkten Gelbildung und folglich zu einer Verschärfung der AKR.

Puzzolanische, aluminiumhaltige Betonzusatzstoffe verringern die Auswirkungen des Alkaliangriffes auf Beton insbesondere durch ihren Beitrag zur Gefügeverdichtung. Transportvorgänge laufen durch die somit verminderte Kapillarporosität langsamer ab. Des Weiteren verändern diese Zusatzstoffe auch den Phasenbestand:

In Alkali-Kieselsäure-Gelelen und C-(A)-S-H-Phasen wird vermehrt Aluminium nachgewiesen. Im Falle der Alkali-Kieselsäure-Gele wird dadurch die Quellfähigkeit verringert und bei den C-(A)-S-H-Phasen die Alkalibindfähigkeit erhöht.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass unter Einwirkung von NaCl das in den C-(A)-S-H-Phasen gebundene Aluminium zu Gunsten der Bildung von Friedel'schem Salz gelöst wird. Die Alkalibindfähigkeit der C-(A)-S-H-Phasen sinkt und bereits gebundene Alkalien können

wieder freigesetzt werden. Werden puzolanhaltige Bindemittel verwendet und somit der Aluminiumgehalt in den C-(A)-S-H-Phasen erhöht, bleibt eine gesteigerte Alkalibindfähigkeit längerfristig erhalten. Die Zusammensetzung der C-(A)-S-H-Phasen und das Maß der Alkalibindung wird dabei hauptsächlich von der Zusammensetzung und der Löslichkeit der jeweiligen amorphen Phase des eingesetzten Betonzusatzstoffes beeinflusst.



Foto: Nach dem Rigorosum am 31.10.13: Dr. Dressler, M. Göbel, e.m. Prof. Springenschmid

#### 4.3.2. Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone. Optimierung auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen

Name Dirk Lowke  
 E-Mail lowke@tum.de  
 Beginn 07/2005  
 Ende 06/2013  
 Vorsitzender Prof. Dr.-Ing. D. Heinz (TU München)  
 Prüfer Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl (i.R.)  
 Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann (TU Braunschweig)  
 Prof. Dr.-Ing. Ch. Gehlen (TU München)

##### Kurzfassung

Ungeachtet seiner zahlreichen betontechnologischen Vorteile hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Ausführungsqualität ist es den Selbstverdichtenden Betonen (SVB) in Europa bisher nicht gelungen, in großem Umfang zur Anwendung zu kommen. Die geringe Akzeptanz des Baustoffs ist vor allem den Schwierigkeiten geschuldet, die designierten Frischbetoneigenschaften unter baupraktischen Bedingungen reproduzierbar herzustellen. Bislang offenbaren Selbstverdichtende Betone oft eine geringe Robustheit gegenüber Schwankungen der Mischungszusammensetzung, was wiederum eine ungenügende Sedimentationsbeständigkeit nach sich ziehen kann (vgl. Bild 1).

Im Fokus der Arbeit stand daher die Erhöhung der Sedimentationsbeständigkeit und Robustheit Selbstverdichtender Betone bei variierendem Wassergehalt durch eine Optimierung der Leimphase des Betons. Die Optimierung erfolgte auf der Basis einer Mehrskalenbetrachtung unter besonderer Berücksichtigung der instationären rheologischen Eigenschaften sowie der interpartikulären Wechselwirkungen. Im Sinne der Mehrskalenbetrachtung wird das Sedimentationsverhalten der groben Gesteinskörnung durch die rheologischen Eigenschaften der das Grobkorn umge-

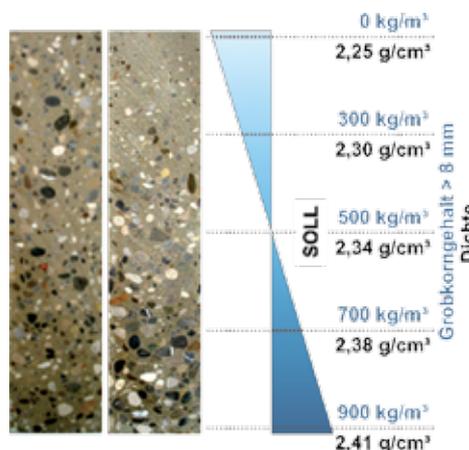
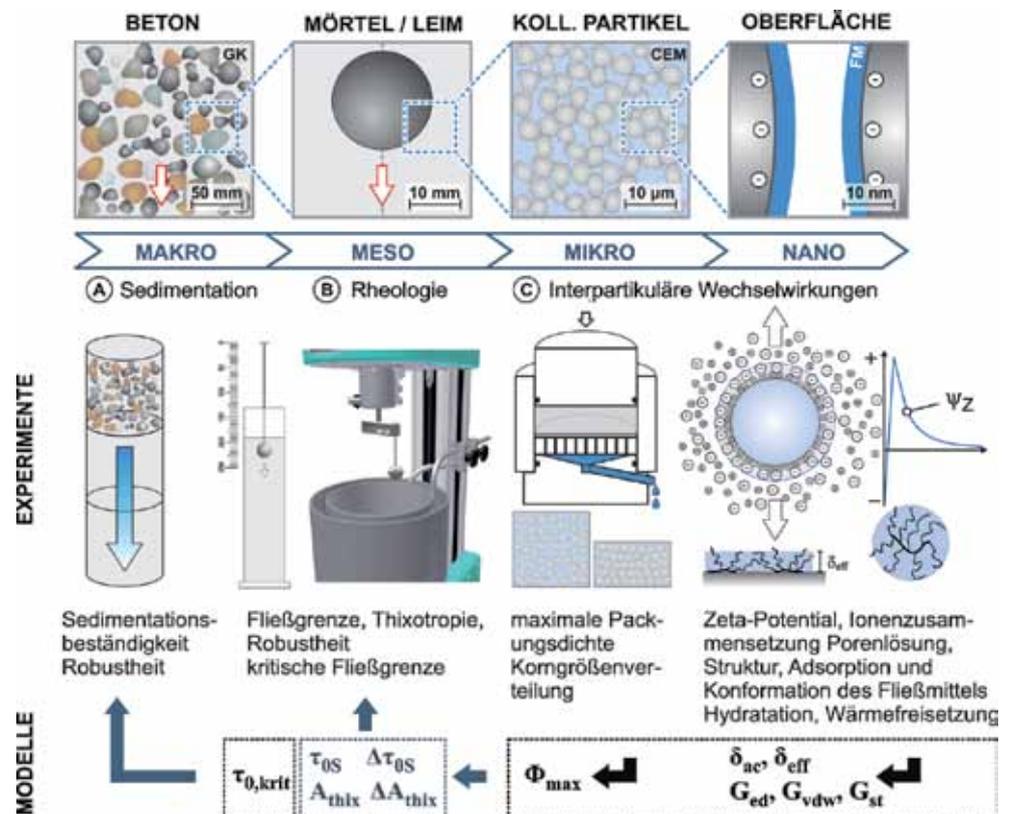


Bild 1: Sedimentation bei einer Wasserüberdosierung von +10l/m³, links: robuster SVB, rechts: wenig robuster SVB

benden Leim- bzw. Mörtelmatrix gesteuert, welche ihrerseits durch die Wechselwirkungen der kolloidalen Partikel des Bindemittelleims bestimmt werden, vgl. Bild 2 oben. Neben der ingenieurwissenschaftlichen Zielstellung der Optimierung der Leimphase verfolgte diese Arbeit gleichberechtigt das Ziel, die maßgebenden interpartikulären Wechselwirkungen unter Berücksichtigung der besonderen Randbedingungen zementbasierter Suspensionen qualitativ und quantitativ zu beschreiben und im Hinblick auf ihre rheologische Relevanz zu klassifizieren.

Dem Optimierungsansatz entsprechend wurden auch die experimentellen Untersuchungen in verschiedenen Größenskalen durchgeführt, ausgehend vom makroskopischen Phänomen der Sedimentation im Beton selbst, über die rheologischen Eigenschaften der Mörtelphase auf der Mesoebene, bis hin zu Untersuchungen zur Charakterisierung der interpartikulären Wechselwirkungen zwischen den Partikeln auf der Mikro- und Nanoebene (vgl. Bild 2 Mitte).

Bild 2: Mehrskaligenbetrachtung der Sedimentation der groben GK in SVB, Konzept der Untersuchungen



In der Arbeit wurde gezeigt, dass im Hinblick auf eine praxisrelevante Bewertung der Sedimentationsbeständigkeit eines SVB neben der Robustheit insbesondere die Thixotropie eine maßgebende Rolle spielt. Beide rheologischen Kenngrößen konnten sowohl qualitativ als auch quantitativ durch ein strukturkinetisches Thixotropiemodell in Kombination mit einem Modell zur Beschreibung der Robustheit mit den interpartikulären Wechselwirkungen in der Leimphase verknüpft werden. Auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen sowie der rheologischen Untersuchungen der Mörtelphase wurden das Wasser/Feststoff-Verhältnis, die maximale Packungsdichte sowie die Fließmitteladsorption als Haupteinflussgrößen auf Thixotropie und Robustheit und somit auf die Sedimentationsbeständigkeit identifiziert.

Diese Erkenntnisse konnten durch Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten am Beton durchgängig verifiziert werden und entsprechende baupraktische Empfehlungen zur Erhöhung der Sedimentationsbeständigkeit und Robustheit Selbstverdichtender Betone abgeleitet werden. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass Selbstverdichtende Betone bei optimierter Zusammensetzung des Bindemittelleims auch bei praxisüblichen Schwankungen des Wassergehalts von bis zu  $+20 \text{ l/m}^3$  eine hohe Sedimentationsbeständigkeit aufweisen können. Durch die betontechnologische Optimierung des Bindemittelleims kann die Robustheit Selbstverdichtender Betone gegenüber Schwankungen des Wassergehalts somit auf das Niveau eines Rüttelbetons mit plastischer Konsistenz erhöht werden.



Foto: Am Tag der Fakultät, 06.07.13: Dr. Lowke mit Dekan Prof. Müller (TUM, Bau Geo Umwelt)

#### 4.3.3. Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikulärer Wechselwirkungen

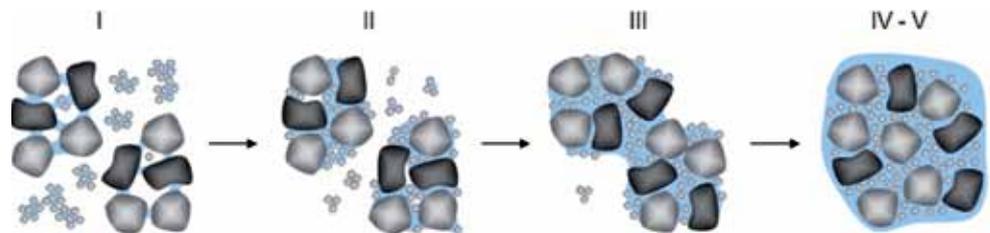
Name	Oliver Mazanec
E-Mail	oliver.mazanec@basf.com
Betreuer	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl, i.R.
Beginn	09/2005
Ende	04/2013
Vorsitzender	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Prüfer	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Johann Plank Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Dietmar Stephan (Technische Universität Berlin)

Ultrahochfester Beton (UHPC) weist aufgrund eines sehr niedrigen Wasserzementwertes ( $w/z$ -Werts) und durch eine optimierte Packungsdichte der Feinststoffe gegenüber Normalbeton ein extrem dichtes, nahezu kapillarporenfreies Gefüge auf. Er ist bis zu 10-mal fester als üblicher Beton und erreicht eine hohe Druckfestigkeit von bis zu  $250 \text{ N/mm}^2$  und mit Stahlfasern eine Biegezugfestigkeit bis zu  $40 \text{ N/mm}^2$ . Dadurch lassen sich Konstruktionen mit UHPC bei gleicher Tragfähigkeit leichter und filigraner gestalten, wodurch auch neue Konstruktionsweisen erschlossen werden. Das dichte Gefüge macht UHPC zudem außerordentlich dauerhaft, was weitere neue Einsatzgebiete ermöglicht. Allerdings führt der aus rheologischer Sicht ungünstige, extrem niedrige  $w/z$ -Wert und der daraus resultierende sehr hohe erforderliche Fließmittelbedarf dazu, dass sich der Beton nur unter erschwerten Bedingungen herstellen, verarbeiten und entlüften lässt. So sind bei den bisher realisierten Bauwerken Mischzeiten von über 12 min keine Seltenheit. Entsprechend war das Ziel der Arbeit die zugrunde liegenden Mechanismen im Hinblick auf die Mischzeit, die rheologischen Eigenschaften und die Verarbeitungszeit von UHPC zu klären.

Im Rahmen der Arbeit wurden herstelltechnische und betontechnologische Einflüsse auf die Mischzeit und die rheologischen Eigenschaften (plastische Viskosität und zeitliche Entwicklung der Fließgrenze bzw. Thixotropie) von UHPC untersucht. Um die erforderliche Mischzeit der einzelnen Betone miteinander objektiv vergleichen zu können, wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem sich eine sogenannte Stabilisationszeit  $t_s$  anhand der aufgezeichneten Leistungskurve des Mischwerkzeugs (Mischleistung) berechnen lässt. Die Stabilisationszeit ist als die Mischzeit definiert, bei der zum frühest möglichen Zeitpunkt optimale Betoneigenschaften erreicht werden.

Der Mischprozess von UHPC lässt sich anhand der Mischleistungskurve in fünf Mischphasen einteilen, die die verschiedenen Stadien der Flüssigkeitsverteilung im Partikelgemisch während des Mischens beschreiben (Bild 1). Die Dauer der jeweiligen Mischphase ist wiederum von herstelltechnischen und betontechnologischen Parametern abhängig. Im Wesentlichen sind das die Mischgeschwindigkeit und das Verhältnis zwischen dem zur Verfügung stehenden Wasser und dem zu füllenden Hohlraum im Partikelgemisch oder mit anderen Worten: Des interpartikulären Abstands zwischen den Partikeln. Der Zusammenhang lässt sich über das Verhältnis der volumetrischen Feststoffkonzentration eines Betons  $\emptyset$  zur maximal möglichen Feststoffkonzentration bei maximaler Packung des Feststoffgemisches  $\emptyset_{max}$  darstellen. Mit zunehmendem Verhältnis von  $\emptyset/\emptyset_{max}$  steigen plastische Viskosität und Stabilisationszeit überproportional an. Hochleistungsbetone besitzen gegenüber Normalbetonen deutlich höhere relative Feststoffkonzentrationen, was der wesentliche Grund für die zähere Konsistenz und die längere Mischzeit ist.

Bild 1: Mischphasen von UHPC (I: Entstehung von Flüssigkeitsbrücken zwischen den Partikeln, II: Agglomeratwachstum und Agglomeratverdichtung, III: Agglomeratzusammenschluss und Verflüssigung, IV: Agglomeratauflösung und Dispersion)



Die Stabilisationszeit ist zudem eine Funktion der Adsorptionsgeschwindigkeit des eingesetzten Fließmittelpolymers. Um dies zu quantifizieren wurde nach verschiedenen Mischzeiten die Fließmitteladsorption mit der TOC-Methode erfasst. Das Adsorptionsverhalten während des Mischens wird von dem Transportprozess des Polymers und der Kinetik des Anlagerungsprozesses auf den Partikeloberflächen kontrolliert. Für die Stabilisationszeit ist vorwiegend der Transportprozess von Bedeutung. Dieser ist von der Molekül- und Lösungsstruktur des Polymers in der Porenlösung abhängig. Mit steigender anionischen Ladung der Hauptkette und/oder abnehmender Seitenkettenlänge nimmt dessen Adsorptionsgeschwindigkeit zu, was kürzere Mischzeiten zur Folge hat. Weiterhin wird der Transport des Polymers zu den Partikeloberflächen mit zunehmender Geschwindigkeit des Mischwerkzeugs und abnehmendem volumetrischem Feststoffgehalt beschleunigt. Auch wird die Geschwindigkeit der Adsorption von der Feinheit der Zement- und Zusatzstoffpartikel kontrolliert. Je kleiner die Partikelgröße ist, desto schneller adsorbieren die Polymere. So ist bei Stoffen mit gleicher Partikelgrößenverteilung auch etwa die Adsorptionsgeschwindigkeit gleich. Mit abnehmender Partikelgröße nimmt die maximal mögliche Feststoffkonzentration des Partikelgemisches zu. Die Partikel werden durch das Überschusswasser beweglicher, was zu einer schnelleren Verteilung von Wasser und Fließmittelpolymer und daraus resultierend zu einer schnelleren Adsorption und kürzeren Mischzeiten führt.

Die gewonnen Erkenntnisse bilden die Grundlage für ein Modell, mit dem sich die Mischzeit von Hochleistungsbetonen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Mischwerkzeugs, der Betonzusammensetzung und der Molekülstruktur des eingesetzten Fließmittelpolymers prognostiziert lässt. Eine Verkürzung der Mischzeit von Hochleistungsbetonen ist danach durch folgende Maßnahmen möglich:

- Erhöhung der Geschwindigkeit des Mischwerkzeugs (verkürzt vorwiegend die ersten beiden Mischphasen)
- Verringerung des volumetrischen Feststoffgehalts

- Steigerung der maximal möglichen Feststoffkonzentration durch Optimierung der Partikelgrößenverteilung (z. B. Austausch von Zement durch feineres Gesteinsmehl oder Silicastaub)
- Verwendung niedermolekularer Fließmittelpolymere mit hoher anionischer Ladungsmenge und kurzen Seitenketten.

Allerdings verlieren Fließmittelpolymere mit hoher Adsorptionsgeschwindigkeit bei UHPC schnell ihre Wirkung, wenn sie sofort mit dem Anmachwasser zugegeben werden. Grund ist, dass ein Großteil der rasch adsorbierten Fließmittelpolymere bereits während des Mischens durch die erste chemische Reaktion des Zements überwachsen oder in frisch gebildete Calciumaluminathydratschichten chemisch eingebaut werden können [1]. Wird eine lange Verarbeitungszeit angestrebt, dann ist zudem der Einsatz von Fließmittelpolymeren mit geringer Adsorptionsgeschwindigkeit empfehlenswert.

#### Literatur

[1] Plank, J.; Hirsch, C. (2007): Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption. *Cement and Concrete Research* 37, S. 537-542

#### Weiterführende Literatur:

- Mazanec, O.; Schießl, P.(2008): Mixing Time Optimisation for UHPC. *Ultra High Performance Concrete (UHPC). Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, March 05-07, 2008*, pp. 401-408, ISBN: 978-3-89958-376-2
- Mazanec, O.; Gehlen, C. (2009): Auswirkung der Fließmitteladsorption auf die Mischzeit und das Ansteifen von UHPC. In: *Proceedings of 50. Forschungskolloquium des DAfStb an der Technischen Universität München*, S. 121-130
- Mazanec, O.; Lowke, D.; Schießl, P. (2010): Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time. *Materials and Structures*, Volume 43, Issue 3, S. 357-365, ISSN: 1359-5997.
- Mazanec, O.; Lowke, D.; Gehlen, C. (2011): Adsorption Behaviour of PCE Superplastcizer and UHPC Rheology. In: *Proceedings of 9th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, August 9th - 11th, 2011, Rotorua, New Zealand*
- Mazanec, O. (2013): Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikulärer Wechselwirkungen. *Dissertation Technische Universität München*



Foto: Nach dem Rigorosum am 02.04.2013, v.l.n.r.: Prof. Stephan (TU Berlin), Prof. Schießl, Dr. Mazanec, Prof. Plank

#### 4.3.4. Mechanismen des Sulfatangriffs auf Beton – Phasenneubildungen und Expansionsdrücke in Mörteln unter $\text{Na}_2\text{SO}_4$ Belastung

Name	Wolfram Müllauer
E-Mail	wolf_m@gmx.at
Beginn	01/2008
Ende	12/2012
Vorsitzender	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Prüfer	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Wolter Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Johann Peter Plank

Die Mechanismen des Sulfatangriffs auf Beton sind bis heute nicht vollständig geklärt. Vor allem die grundlegenden Mechanismen der Dehnung bei einem treibenden Angriff sind nach wie vor unklar. Aufbauend auf den chemischen Mechanismen wurden die Dehnungsmechanismen für unterschiedliche Bindemittelzusammensetzungen und Lagerungsbedingungen untersucht. Durch die Kombination von Röntgendiffraktometrie und  $^{27}\text{Al}$ - und  $^{29}\text{Si}$ -NMR-Spektroskopie war es möglich, neben Änderungen in den kristallinen Phasen auch Änderungen in den C-S-H-Phasen durch einen Sulfatangriff quantitativ zu erfassen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei einer Sulfatlagerung Ettringit aus vor allem AFm-Phasen bildet. Anders als bisher angenommen konnte erstmals nachgewiesen werden, dass Aluminium, das strukturell in Brückentetraeder-Positionen in C-S-H-Phasen gebunden ist, bei einem Sulfatangriff mobilisiert werden und zu einer Ettringitbildung beitragen kann. Das wirkt sich vor allem auf die Interpretation des Sulfatwiderstandes aluminiumreicher Bindemittelmischungen, wie z.B. beim Einsatz von Steinkohlenflugasche, aus. Die Sulfatkonzentration der Lagerungslösung und die Lagerungstemperatur beeinflussen den Sulfatwiderstand maßgeblich. Mit steigender Sulfatkonzentration nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung durch Sulfatangriff zu. Bei in Laborprüfverfahren üblichen hohen Sulfatkonzentrationen kommt es auch bei Zementen mit einem hohen Sulfatwiderstand durch die Bildung von eisenhaltigen Ettringit zu Schädigungen, weil sehr hohe Übersättigungen der Porenlösung erreicht werden. Zudem tritt eine überproportionale Gipsbildung auf, wodurch verstärkt

Calcium aus den C-(A)-S-H-Phasen auslaugt wird. Eine niedrigere Umgebungstemperatur führt zu einer langsameren Diffusion der Sulfationen aber es stellen sich größere Kristallisationsdrücke ein, weil die Löslichkeit von Ettringit mit abnehmender Temperatur sinkt. Es gibt unterschiedliche Theorien in der Literatur für die Entstehung der Dehnungen, jedoch fehlen eindeutige Beweise für eine dieser Theorien. Zur Simulation großer Bauwerke, wo es zu keiner homogenen Dehnung kommt, wurde ein spezieller Versuchsaufbau entwickelt, mit dem es möglich war, die durch Kristallisationsdruck entstehenden Spannungen zu messen. Phasenänderungen und die Porengrößenverteilung wurden mit Röntgendiffraktometrie und Quecksilberdruckporosimetrie untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ursache der Dehnungen

Foto: Dr. Müllauer nach dem Rigorosum am 28.10.2013, rechts: Prof. Heinz



in der Entstehung von Kristallisationsdrücken durch die Bildung von Ettringit in kleinen Poren (ca. 10-100 nm, abhängig von der Mischungszusammensetzung) liegt. Übersteigen die durch den Kristallisationsdruck hervorgerufenen Spannungen die Zugfestigkeit der Bindemittelmatrix, dann kommt es zu einer ausgeprägten Dehnung, Rissbildung und durchgehenden Gefügeschädigung.

Die treibende Kraft der Kristallisation ist die Übersättigung der Porenlösung. Die Bildung von Ettringit in großen Poren führt zu keinen Schäden, weil hier keine ausreichend großen Kristallisationsdrücke erzeugt werden. Das erklärt auch die Tatsache warum es keine Korrelation zwischen der Bildung von Ettringit und der Dehnung gibt. Die Bildung von Gips bei hohen Sulfatkonzentrationen führt zu keinen Spannungen, die freie Dehnung von bereits geschädigten Proben wird aber durch die Gipsbildung in gebildeten Rissen verstärkt.

#### 4.3.5. Zur voll-probabilistischen Modellierung der Korrosion von Stahl in Beton - Ein Beitrag zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen

Name	Kai Osterminski
E-Mail	kai.osterminski@tum.de
Beginn	07/2007
Ende	10/2013
Vorsitzender	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil Christian Große
Prüfer	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl (i.R.) Prof. Dr. ir. Joost C. Walraven (TU Delft, Niederlande) Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

Die Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen gegen Bewehrungskorrosion kann neben empirischen Regeln auch nach leistungsbezogenen Nachweisverfahren erfolgen. Diese Arbeit, welche im Rahmen der DFG-Forschergruppe 537 entstand, zeigt, wie auf Basis eines physikalisch korrekt definierten Schädigungsmodells für den Korrosionsfortschritt auf Basis umfangreicher experimenteller und numerischer Untersuchungen ein anwendungsfreundliches Ingenieurmodell hergeleitet wurde. Abbildung 1 veranschaulicht, welche Arbeitsschritte im Rahmen der Dissertation durchgeführt wurden.

Um die Streuungen, die mit der Bewehrungskorrosion und folglich auch bei den Eingangsparametern des Modells einhergehen, berücksichtigen zu können, wurden alle relevanten Eingangsparameter statistisch quantifiziert und detailliert dargestellt.

Maßgebende Eingangsparameter für das erarbeitete Modell sind der spezifische Elektrolytwiderstand von Beton, der Eigenkorrosionsfaktor und die Anodenfläche. Der spezifische Elektrolytwiderstand von Beton beschreibt die Fähigkeit des Betons, elektrische Ladungen leiten zu können. Mit anderen Worten kann er als Kehrwert der Leitfähigkeit des Betons verstanden werden. Er wird bekanntermaßen von beton-technologischen Parametern (zum Beispiel

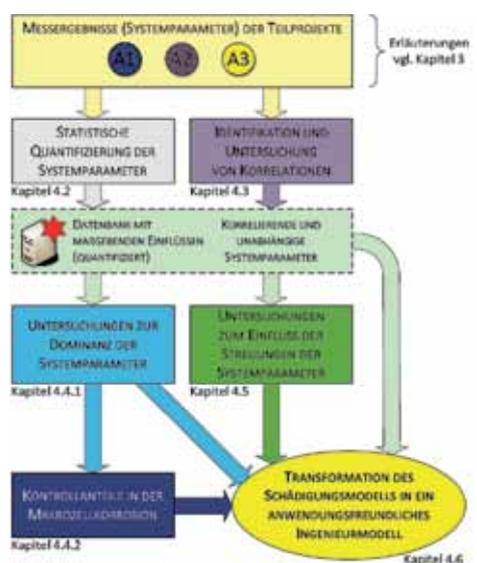


Abb.1: Ablauf der Untersuchungen am Schädigungsmodell für seine Transformation in ein anwendungsfreundliches Ingenieurmodell

Bindemittelart) von Expositionsbedingungen (z.B. Temperatur und Feuchtigkeit) und von der Alterung des Betons beeinflusst.

Der Eigenkorrosionsfaktor ist ein Eingangsparameter, welcher berücksichtigt, dass neben der Korrosion unter Aktivierung von großflächigen Kathodenflächen (Makrozellkorrosion) auch ein Großteil des Korrosionsstroms völlig ohne Sauerstoffreduktion ablaufen können (Mikrozellkorrosion). Im Rahmen von Teilprojekten der DFG-Forschergruppe 537 wurden die Mechanismen dieser Mikrozellkorrosion eingehend studiert und in dieser Arbeit weiter ausgewertet. Maßgebende Erkenntnis war, dass die Mikrozellkorrosion sich in Abhängigkeit der Makrozellkorrosion (Korrosion mit großflächigen Kathoden) entwickelt und somit vereinfacht mit einem Faktor im Modell berücksichtigt werden kann. Der Eigenkorrosionsfaktor wird maßgeblich von der Umgebungsbedingung beeinflusst, Abb.2.

Abb.2: Ergebnisse der gravimetrischen und coulometrischen Masseverluste aus den Teilprojekten A1 und A2 der DFG-Forschergruppe 537

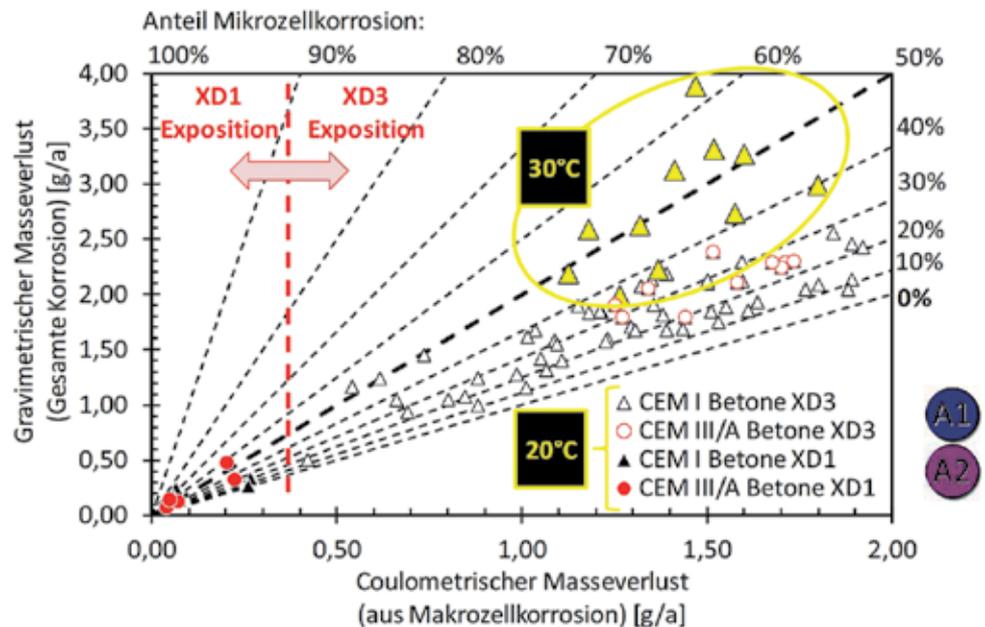


Abb.3: Nach dem Rigorosum am 10.10.2013 (v.l.n.r. Prof. Walraven, Dr. Osterminski, Prof. Schießl, Prof. Gehlen, Prof. Große)



Die Anodenfläche beschreibt die Größe der Stahloberfläche, auf der die Bewehrungskorrosion abläuft. Sie ist ein Parameter des Geometrie-Konzepts, welches in der Arbeit entwickelt wurde. Dies definiert einen „Hotspot“ im Bauteil, in dem erfahrungsgemäß oder auf Basis von Detektionsmessungen die Bewehrungskorrosion abläuft. Die Zunahme bzw. das Wachstum der Anodenfläche kann daraufhin modelliert werden, wobei Betondeckung, Betonstahldurchmesser sowie Zementart berücksichtigt werden.

Das hier nur kurz umrissene Ingenieurmodell setzt dort an, wo existierende Modelle der Einleitungsphase aufhören und stellt somit einen Lückenschluss für die Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen gegen eine Bewehrungskorrosion unter Verwendung von leistungsbezogenen Nachweisverfahren

#### 4.3.6. Verbundverhalten und mechanische Leistungsfähigkeit von Stahlfasern in ultrahochfestem Beton

Name	Thorsten Stengel
E-Mail	stengel@mytum.de
Beginn	09/2005
Ende	12/2013
Vorsitzender	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz
Prüfer	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl (i.R.) Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen Prof. Dr. ir. Joost C. Walraven (TU Delft, Niederlande)

##### Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Bereitstellung eines Konzepts, welches die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Stahlfasern in UHPC unter mechanischen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten zulässt. Dazu wurde eine mehrskalige Herangehensweise gewählt, welche Betrachtungen auf der Mikro-, Meso- und Makroebene umfasst. Die drei Ebenen wurden so miteinander verknüpft, dass schließlich eine Faserleistungskennzahl für die Faserwirkung im Werkstoff auf Basis des Kraftübertragungsverhaltens einer einzelnen Faser angegeben werden kann.



Foto: Dr. Stengel nach dem Rigorosum am 06.12.2013

##### Mikroebene: Zur Ausbildung des Gefüges in der Grenzfläche Faser/UHPC-Matrix

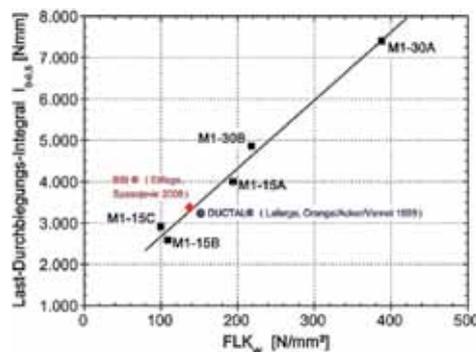
Das Gefüge in der Grenzfläche unterscheidet sich optisch nicht von der ungestörten Matrix, ein Duplexfilm konnte nicht festgestellt werden. Im Rahmen von EDX-Analysen der Grenzfläche konnte jedoch gezeigt werden, dass sich je nach Betonzusammensetzung offensichtlich ein bzgl. der chemischen Zusammensetzung unterschiedliches Gefüge im Vergleich zur ungestörten Matrix ausbildet. Die Ergebnisse belegen, dass sich bei Anwesenheit von ausreichend feinen Partikeln je nach Packungsdichte des Korngemisches die feinen Partikel an der Grenzfläche anreichern. Dadurch kommt es zu einer Erhöhung der Packungsdichte an der Grenzfläche und zu einer Erhöhung der Anzahl an Kontaktstellen zwischen Faser und Matrix. Dies hat – wie später gezeigt wird – direkten Einfluss auf die Kraftübertragung beim geraden Faserauszug.

### Mesoebene: Mechanismen der Kraftübertragung

Die Ergebnisse von FEM-Berechnungen ergaben, dass die schwindbedingten Radialdruckspannungen an der Faseroberfläche zwischen rd.  $-2,7 \text{ N/mm}^2$  und rd.  $-4,4 \text{ N/mm}^2$  liegen. Bei einem üblichen querdruckabhängigen Reibungskoeffizient von 0,15 ist somit der Anteil der Reibung an der gesamten Kraftübertragung zwischen Faser und Matrix unter 5%. Der Anteil der Mikroverzahnung (Füllung von „Mikroriefen“ in der Faseroberfläche) beträgt hingegen rd. 50% bis 90%. Der verbleibende Kraftanteil ist der Adhäsion zwischen Faser und Matrix zuzuschreiben. Zwischen den Adhäsionskräften und der Packungsdichte, d.h. in diesem Fall dem Grad der Anreicherung feiner Partikel, wurde ein tendenzieller Zusammenhang festgestellt. Mit geringerer Packungsdichte, d.h. stärkerer Anreicherung feiner Partikel an der Grenzfläche, nimmt die Verbundkraft infolge Adhäsion zu. Werden Fasern unter einem Winkel aus der Matrix herausgezogen, so spielen zwei weitere Mechanismen eine zentrale Rolle. Bis zu einem Winkel von etwa  $45^\circ$  können die übertragbaren Faserzugkräfte mit Hilfe eines Modells zur Faserverformung an der Umlenkstelle beschrieben werden. Ab einem Winkel von  $30^\circ$  entstehen beim gewinkelten Faserauszug Ausbruchkegel in der Matrix; die zugehörigen Zugkräfte können mit Hilfe rechnerischer Ansätze aus der Befestigungstechnik angegeben werden.

### Makroebene: Beurteilung der Fasereffektivität im Werkstoff – Faserleistungskennzahl FLKW

Abb 2.: Grafik Makroebene



Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse ist eine Aussage zur Wirkung der Fasern im Werkstoff noch nicht möglich. Dies liegt u.a. an der zufälligen Orientierung der Fasern und der zufälligen effektiven Verbundlänge mit Bezug auf z.B. eine Rissebene begründet. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit Effektivitätsbeiwerte zur Berücksichtigung der Faserorientierung und effektiven Verbundlänge definiert. Um Fasern unterschiedlichen Durchmessers vergleichend zu bewerten, wurde dar-

auf aufbauend eine Faserleistungskennzahl formuliert, welche die Anzahl der Fasern im Werkstoff berücksichtigt. Anhand von Biegezugversuchen an faserbewehrten UHPCs mit unterschiedlichen Fasergemischen wurde die Aussagekraft der auf den Werkstoff bezogenen Faserleistungskennzahlen FLKW überprüft. Zwischen dem Biegetragverhalten (Last-Durchbiegungs-Integral) und der Faserleistungskennzahl besteht ein linearer Zusammenhang. Die auf den Werkstoff bezogene Faserleistungskennzahl kann somit zur Beurteilung der Effektivität der Fasern im Werkstoff herangezogen werden. Damit wurde das eingangs genannte Ziel, ein Konzept zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Stahlfasern in UHPC zu erarbeiten, erreicht. Mit Hilfe dieses Konzepts ist es auch möglich, eine Optimierung faserbewehrter UHPCs im Hinblick auf die Fasermenge und/oder den Fasertyp durchzuführen. Die im Rahmen der Arbeit außerdem durchgeführten Studien erlauben auch eine Beurteilung faserbewehrter UHPCs hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Aspekte.

## 4.4. Große Bauingenieurexkursion zu Baustoffherstellenden Industrien

Der Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung im Bauwesen hat wie jedes Jahr auch im Sommer 2013 eine Exkursion organisiert. Die jährliche 4-tägige Exkursion findet im Rahmen des Wahlfaches „Baustoffherstellende Industrie – Exkursionen“ für Studierenden im Masterstudium statt. Diesmal wurde die Exkursion jedoch mit der „Großen Bauingenieurexkursion“ für Studierenden im 6. Semester des Bachelorstudiums kombiniert und erweitert. Somit wurde die Exkursion in der Pfingstwoche mit Beteiligung von 11 Master- und 34 Bachelorstudenten unter Betreuung von Dipl.-Ing. Amir Rahimi durchgeführt.

Die große Exkursion startete am 21. Mai, endete am 24. Mai und führte die Teilnehmer zuerst in die Niederlande nach Amsterdam und Utrecht. Von dort ging es weiter nach Luxemburg und schließlich über Baden-Württemberg zurück nach Bayern. Die Reise wurde vollständig mittels eines Reisebuses durchgeführt. Der Zeitplan der Exkursion war wie folgt:

Tag 1: Dienstag, 21. Mai 2013

- Fahrt nach Amsterdam

Tag 2: Mittwoch, 22. Mai 2013

- Besichtigung der U-Bahnbaustellen in Amsterdam
- Firma FiberCore in Utrecht mit Besichtigung von zwei Brücken

Tag 3: Donnerstag, 23. Mai 2013

- Firma ArcelorMittal in Esch/Alzette (Luxemburg)
- Besichtigung des Glaswerkes von Guardian in Dudelange (Luxemburg)

Tag 4: Freitag, 24. Mai 2013

- Besichtigung des Asphaltmischwerkes A. Wagershauser Straßenbau in Kirchheim
- Besichtigung des Zementwerkes von HeidelbergCement in Schelklingen
- Rückfahrt nach München

An dieser Stelle bedanken wir uns bei allen Firmen, die bei einer so großen Exkursionsgruppe sich die Zeit nahmen, die Vorführungen und Vorträge zu organisieren und so zu einer sehr gelungenen Exkursion beigetragen haben.

Die einzelnen Stationen werden durch die Berichte von Studenten dargestellt.

### 4.4.1. U-Bahnbaustelle in Amsterdam

Bericht von Gholam Mahboob Mahmoodi

#### Kurze Vorstellung

Ursprünglich wurde die Amsterdamer Infrastruktur für ca. 500.000 Einwohner ausgelegt, aber angesichts der sehr vielen Touristen pro Jahr, reicht das bestehende Verkehrssystem nicht aus.

Obwohl es schon mehrere U-Bahnlinien in Amsterdam gibt, verbinden diese überwiegend die Außenbezirke und noch kaum die Innenstadt. Um eine Verbindung unter dem Stadtzentrum zu bekommen, wurde die Nord-Süd-Linie geplant. Diese Linie soll vor allem die Verkehrsprobleme beseitigen und den Bewohnern und Touristen die Möglichkeit geben, dass sie die Stadt von Norden nach Süden mit einer U-Bahnlinie durchqueren zu können. Daher

beschloss die Stadt Amsterdam im Jahr 2002 mit dem Bau eines U-Bahntunnels und den dazugehörigen Bahnhöfen zu beginnen.

### **Vorhandenes Tunnelsystem**

Das vorhandene Tunnelsystem im Amsterdam verläuft von Norden nach Süden, allerdings nicht direkt unter der Stadtmitte hindurch. Da die Amsterdamer Innenstadt auf lehmigem Grund gebaut wurde und das Grundwasser nur bei einem Meter unter GOK liegt, wurden die Häuser der Stadt auf Holzpfähle gebaut. Die Holzpfähle stehen seit über hundert Jahren im Wasser, d.h. dass die üblichen Bauvorgänge wie sie bei Baugruben und Wasserabsenkungen üblich sind, angesichts dieser Holzpfähle nicht benutzt werden konnten. Sollten die Holzpfähle austrocknen, würden sie nicht mehr stabil genug sein, um die Häuser tragen zu können. Daher müssen die bestehenden Holzgründungen künftig auch weiterhin im Wasser verbleiben, was zu einer speziellen Wasserversorgung und den dazu entsprechenden Zu- und Abflüssen des Wassers führte. Der Tunnel für die Nord-Süd-Linie musste unterhalb dieser Pfosten gebaut werden und zusätzlich musste der Fluss IJ untertunnelt werden.

### **Geplante Stationen**

Die Firma Max Bögl bekam den Auftrag für den Bau von drei U-Bahnhöfen in der Innenstadt von Amsterdam. Diese Stationen sind: Station Rokin, Station Vijzelgracht und Station Ceintuurbaan. Diese Stationen konnten von der sehr großen Studentengruppe dank einer sehr gut ausgedachten Organisation der Firma Max Bögl besichtigt werden. Der Baubeginn war für die U-Bahnhöfe 2002 bzw. 2003 und startete zeitgleich an allen drei Standorten in der Amsterdamer Innenstadt.

Bild 1, li.: Station Ceintuurbaan  
Bild 2, re.: Station Vijzelgracht



Damit der Verkehr in der Zeit des Stationsbaus auch weiterhin reibungslos ablaufen kann, werden die Stationen in der Deckelbauweise gebaut. Es wurde zuerst von der Geländeoberkante aus Schlitzwände und Gründungspfähle hergestellt, auf die dann der vorbetonierte Deckel gesetzt wurde. Diese Bauweise hat den Vorteil, dass der Verkehr an der Geländeoberkante sehr schnell wieder aufgenommen werden kann und der Aushub unter dem Deckel weitergehen kann. Jedoch ist bei so einer Bauweise die Arbeit sehr eingeschränkt und so kann der gesamte Baubetrieb nur durch drei Öffnungen in die Baustelle des U-Bahnhofs erfolgen. Die unteren Bereiche des Bahnhofes werden unter Überdruck gesetzt, damit das Grundwasser nicht eindringen kann. Dadurch konnte der Bau in diesem Bereich bis zur Betonage sowie der Aushärtung der Gründung ermöglicht werden. Ab diesem Zeitpunkt konnte die Tunnelbohrmaschine durch die Station fahren und den Tunnelschacht weiterbohren.

Durch viele Probleme bei dem Bau des Tunnels (z.B. Setzungen der Stadthäuser) wurden von der Stadt auch bei den U-Bahnhöfen kostspielige und arbeitsintensive Bauausführungen verlangt. Dadurch wurde der Bau insgesamt wesentlich teurer als geplant und verzö-

gert sich immer weiter nach hinten. Die geplante Eröffnung ist frühestens 2017, könnte sich jedoch auch noch etwas weiter nach hinten verschieben.



Bild 3: Tunnelbau mit Tübbings in der Station Vijzelgracht

#### 4.4.2. FiberCore Europe

Bericht von Eliana Hernandez Meza

Die Firma FiberCore Europe mit ihrem Hauptsitz in dem berühmten Hafen Rotterdam ist ein holländischer Hersteller von Tragwerken aus Verbundwerkstoffen. Zum Einsatz kommen hier die glasfaserverstärkten oder kohlenstoffverstärkten Kunststoffe.

##### Material

Glasfaserverstärkter Kunststoff oder kurz GFK ist ein Verbundwerkstoff von Fasern aus Glas und Kunststoffen. Die meist verwendeten Kunststoffe sind entweder duroplastische (z. B. Epoxidharz und Polyesterharz) oder thermoplastische (z. B. Polyamid). Da die Fasern viel steifer sind als der Kunststoff, werden die Tragekräfte von den Fasern weitergeleitet. Um das zu erreichen, wird es empfohlen, die Fasern in Richtung der Kraft anzuordnen.

Das Harz hat die wesentliche Eigenschaft Schubkräfte zu übertragen und beugt das Knicken bei einer Druckbeanspruchung vor. Beide Brücken die später noch näher beschrieben werden, bestehen aus einer InfraCore Fahrbahnplatte, die aus dem Sandwich-System der Firma FiberCore Europe besteht.

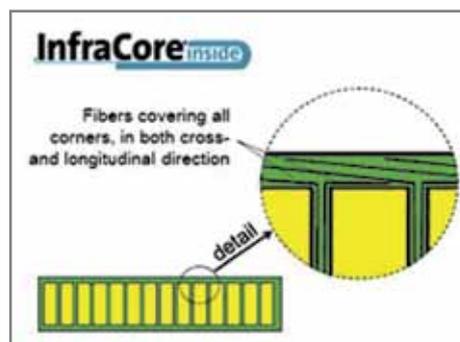


Bild 4: InfraCore Sandwich-System

Die InfraCore Technologie wurde speziell für Tragwerke aus Verbundwerkstoffen entwickelt, die vor allem durch den Schwerverkehr beansprucht werden. Dieses System kann für mehrere Anwendungen benutzt werden wie zum Beispiel Verbundbrücken, Verbund-Straßenbrücken (60 Tonnen Verkehr) und Verbund-Schleusentore. In den letzten Jahren hat der Werkstoff immer mehr an Bedeutung gewonnen und wurde allein in Rotterdam bei über 34 Brücken eingesetzt.

Der Verbundwerkstoff hat sich als ein wichtiges Material für das Bauwesen erwiesen. Im Vergleich zu Beton und Stahl ist das InfraCore-System leichter, nachhaltiger und benötigt keine Instandhaltung. Aus diesem Grund eignet es sich perfekt als Baustoff, da immer mehr Akzente auf das Thema Umwelt und Nachhaltigkeit gesetzt werden. Auch in der wirtschaftlichen Hinsicht hat sich der neue Baustoff als sehr kompetent neben Stahl und Beton erwiesen.

### **Besichtigte Brücken in Utrecht**

Im Rahmen der Exkursion haben wir die Gelegenheit gehabt von zwei Spezialisten der Firma FiberCore in Utrecht empfangen zu werden, Dr. Martijn Veltkamp und Jan Peeters. Nach einer kleinen Präsentation über das Unternehmen haben wir konkret zwei Verkehrsbrücken angeschaut und als ein kleiner Bonus wurde auch eine Fußgängerbrücke vorgestellt.

Die erste Brücke die wir besuchten, war Maarsenseweg, eine Verkehrsbrücke in Utrecht. Fertiggestellt wurde sie im Jahr 2011 für die Gemeinde Utrecht. FiberCore Europe hat neben der Herstellung auch das Design und die Ingenieurleistungen geführt.

Technische Daten:

Material: Glasfaserverstärkter Kunststoff  
Maße: 6,8 x 9,0 m  
Stützweite: 6,8 m  
Vehrklass/ Brückenklasse: VK 60  
(60 Tonnen Verkehr)  
Tragschicht: Kies im Epoxidharz  
Fertigstellung: Stahlgeländer  
Gewicht: ca. 10 Tonnen

Bild 5: Verkehrsbrücke Maarsenseweg



Mit einer Gesamtlänge von 142 m und eine Breite von 6,4 m aus einer InfraCore Fahrbahnplatte, zählt die Straßenbrücke über A27 als längste Brücke mit dem neuen Verbundwerkstoff.

Als Zweifelddurchlaufträger überspannt die Brücke eine Autobahn (A27) in der Nähe von der holländischen Stadt Utrecht.

Der Überbau besteht aus einem Stahlfachwerkträger, der die Vertikallasten zu den Auflagern weitergibt. Der wesentliche und entscheidende Punkt, wieso die Verbundbauweise mit glasfaserverstärktem Kunststoff ausgewählt worden ist, ist der ungünstig vorhandene Untergrund. Mit einer Platte aus Beton oder Stahl hätte man eine viel größere Beanspruchung durch das Eigengewicht der Platte. Diese Belastung hätte in den Untergrund geleitet werden, für sie sehr große Fundamente notwendig gewesen wären. Im Vergleich mit einer

Betonplatte, die ein Eigengewicht von  $220 \text{ kg/m}^2$  hat, wurde die Brücke mit einer Decke von  $140 \text{ kg/m}^2$  aus InfraCore versehen. Somit hat man letztendlich eine wesentlich leichtere Decke.

Die InfraCore Platte dient als Aussteifungselement und trägt die Horizontalkräfte durch die Dübel und danach ins Auflager. Als Grundlage für die Bemessung wurde der zukünftige Eurocode EN 1991-2 in Betracht genommen mit einer vorhandenen aufnehmbaren Last von 60 Tonnen, wobei die Platte nach einer holländischen Regelwerk bemessen worden ist (CUR 96). Eine weitere Innovation dieses Tragwerks war die starre Verbindung zwischen der Platte und der untere Gurt des Fachwerks. Im unteren Bereich ist ersichtlich dass die Platte das einzige Element zwischen den zwei Fachwerken ist und dient als Stabilitätsteil gegen das seitliche Versagen.



Bild 6: Straßenbrücke über A27 in Utrecht

Zuletzt besuchten wir eine kleine Fußgänger- und Fahrradbrücke in Lunetten, in der Nähe der Autobahn A27, die einen kleinen Fluss überquert. Als wir alle auf der Brücke waren, konnten wir feststellen, wie viel Schwingung erzeugt wurde, wenn eine oder mehrere Personen auf der Brücke gesprungen sind. Das ist eine Charakteristik von diesem Material: kleine Lasten verursachen große Schwingungen.



Bild 7: Fußgängerbrücke in Lunetten

### 4.4.3. ArcelorMittal

Bericht von Philipp Tamm

ArcelorMittal ist der weltweit führende Stahlhersteller mit einer Präsenz in mehr als 60 Ländern und Produktionsstätten in mehr als 20 Ländern. Das Unternehmen entstand im Jahr 2006 aus der Bündelung der niederländischen Mittal Steel Company und dem luxemburgischen Konzern Arcelor. Die Firma Mittal Steel Company wurde 1976 von Herrn Lakshmi Mittal gegründet und wurde Ende der 80er Jahre zu einem sehr großen Stahlhersteller. Der luxemburgische Konzern Arcelor entstand aus den Stahlherstellern Arbed, Aceralia und Usinor, die sich 2002 zusammenlegten.

Als Marktführer in allen wichtigen Stahlmärkten, vom Automobil- über den Bausektor als auch Haushaltsgeräte und Verpackungen beschäftigt die Gruppe 262.000 Mitarbeiter. Der offizielle Unternehmenssitz ist zwar in Luxemburg, aber tatsächlich wird ArcelorMittal aus London geleitet. Wir wurden auf dem Werksgelände von dem Mitarbeiter Marc May empfangen. Ursprünglich sollte der Besuch in der Niederlassung in Luxemburg aus einem Vortrag und einer anschließenden Werksbesichtigung des Trägerwalzwerkes bestehen. Da unsere Studentengruppe jedoch zu groß war, durften wir das Walzwerk aus Sicherheitsgründen leider nicht besichtigen.

Der Vortrag von Marc May war in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil ging es über die moderne Stahl-Langproduktion. So produziert ArcelorMittal alle europäischen Profilstahlreihen und auch internationale Profilstahlreihen. Insbesondere ist das Unternehmen Marktführer bei der Herstellung von Breitflanschträgern (z.B. HEA-Reihe). In den Elektroöfen der Firma können in einer Stunde 150 Tonnen Stahl verarbeitet werden. Dabei erfolgt allerdings keine Produktion auf Lager, sondern es wird immer direkt auf Anfrage für den Kunden produziert.

Die Einteilung der Stahlsorten erfolgt bei ArcelorMittal gemäß EN 10025 Teil 1-6. Herr Marc May erwähnte bei seinem Vortrag hierzu, dass die Herstellung und Verbauung von Stahl mit der Güte S235 „Materialverschwendung“ sei, da dieser als geringfest eingestuft wird. Die Herstellungsverfahren haben sich so stark verbessert, dass die Produktion von Mindeststahlgüten von S355 deutlich wirtschaftlicher sei. Ein Stahl S355 wird so als normalfest eingestuft und sollte seiner Meinung nach zum Standard werden. Bezüglich der Herstellungsverfahren von Stahlträgern, versucht die Firma ArcelorMittal ständig diese zu optimieren. So eine Innovation des Unternehmens ist zum Beispiel der so genannte „HISTAR“-Stahl. Dabei handelt es sich um einen sehr wirtschaftlich hergestellten hochfesten Stahl (Mindeststreckgrenzen von 355 oder 460 MPa). Träger aus diesem besonderen Stahl besitzen eine hohe Streckgrenze, eine ausgezeichnete Zähigkeit bei niedrigen Temperaturen und sie lassen sich darüber hinaus gut schweißen. Eine Kombination dieser verschiedenen Materialeigenschaften wurde bisher noch mit keinem anderen Produkt erreicht. Dieser Stahl wurde zusammen mit dem Forschungszentrum Centre de Recherches Métallurgiques in Lüttich entwickelt und basiert auf einer innovativen Inline-Wärmebehandlung. Diese Wärmebehandlung - genannt QST-Verfahren (Quenching an Self-Tempering) - beruht auf einem Abschrecken und Selbstanlassen des Materials. Dieser Stahl erfüllt die Anforderungen der europäischen und teilweise der nationalen Baustahlnormen und besitzt eine europäische technische Zulassung (ETA-10/0156). Im zweiten Teil des Vortrags von Herrn Marc May ging es unter anderem um VFT-Träger und verschiedene Lochstegträgertypen. Die Bauweise mit VFT-Trägern ist eine spezielle Art der Stahlverbundbauweise. Also eine Bauweise bei der die hohe Zugfestigkeit der Stahlträger mit der guten Druckfestigkeit des Stahlbetons kombiniert wird. Diese Bauweise findet hauptsächlich im Brückenbau Anwendung. Eine

Weiterentwicklung dieser Konstruktion ist die VFT-WIB-Bauweise. Dabei wird der Steg eines Stahlträgers mit I-Profil in der Mitte durch einen profilierten Schnitt geteilt. Es wird dann nur die eine Hälfte des Trägers als Untergurt verbaut. Somit fällt der stählerne Obergurt weg und es wird sozusagen nur ein T-Profil verbaut. Dabei handelt es sich um eine wirtschaftliche bzw. materialsparende Bauweise. Durch die optimierte Schnittlinie im Steg werden die Verbunddübel erzeugt, die den Verbund zwischen dem Stahlträger und dem Stahlbeton sicherstellen. Somit müssen keine Kopfbolzen verwendet werden. Üblicherweise erfolgt die Betonage des unteren Teils des Trägers in einem Fertigteilwerk. Diese Fertigteile werden dann auf die Baustelle geliefert und dort wird dann zusätzlich eine Ortbetonergänzung betoniert. Bei der Herstellung der Träger im Stahlwerk muss der Schnitt durch den Steg sehr präzise ausgeführt und nachbearbeitet werden da der Dübelanschnitt später sehr hoch belastet wird (Übertragung der Längsschubkraft). Dieser Anschnitt muss später ausgeschliffen und die Walzhaut mittels Sandstrahlen entfernt werden. Die präzise Schnittführung wird dabei über eine hohe Prozesssicherheit gewährleistet. Die Ausführung der Schnittlinien in den Stegen wird in Zusammenarbeit mit verschiedenen Universitäten laufend optimiert.

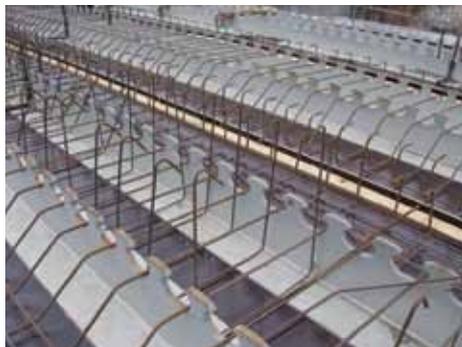


Bild 8: VFT-WIB-Träger vor der Betonage

Obwohl unser Aufenthalt bei der Weltmarke ArcelorMittal deutlich kürzer ausgefallen ist als ursprünglich geplant, war es trotzdem sehr informativ. Alleine der Weg vom Bus zum Verwaltungsgebäude zwischen den riesigen Produktionshallen hindurch ließ erkennen welche Massen an Metall hier verarbeitet werden.

#### 4.4.4. Guardian Industries Corporation

Bericht von Mihai-Dan Pop



Bild 9: Guardian Industries in Luxemburg

Guardian Industries Corporation wurde im Jahre 1932 in Auburn Hills, Michigan gegründet und hat durch die Herstellung von Fensterscheiben für die Automobilindustrie als Unternehmen angefangen. Heutzutage ist Guardian eines der führenden Unternehmen in den Bereichen Flachglasherstellung, Glasfaserisolierungen oder Produkte für die Baustoffindustrie und verfügt über 13 Herstellungsanlagen auf der ganzen Welt. Mittlerweile beschäftigt Guardian ungefähr 18000 Mitarbeiter in 25 Ländern über 5 Kontinente und hat einen Jahresumsatz von 4.9 Milliarden US\$ (2011). Die Exkursionsgruppe wurde in der Floatglasherstellungsanlage des Unternehmens in Luxemburg vorgeführt.

Bild 10: Floatglasherstellungsanlage von Guardian Industries in Luxemburg



Bei dem Floatglasverfahren, welcher ein kontinuierlicher Prozess ist, wird geschmolzenes Glas vom Schmelzofen über ein flüssiges Metallbad geleitet und in einen Kühllofen abgekühlt. Die Rohstoffe werden sorgfältig gemischt und kontrolliert. Zusätzlich wird auch gebrochenes Glas, das von Kunden zurückgebracht wurde und Glas, welches die Qualitätskontrolle nicht bestanden hat, sehr fein zertrümmert und zusammen mit den Rohstoffen in den Schmelzofen gegeben. Das geschmolzene Glas wird weiter über einen Lippenstein aus hochwertigem, feuerbeständigem Material auf ein flüssiges Zinnbad geleitet, auf dessen Oberfläche dieses sich ausbreitet. Die Temperatur in dem Zinnbad beträgt 1000 °C. Zinn wird deswegen verwendet, weil es eine höhere Dichte als Glas aufweist und somit Glas auf der Zinnoberfläche schwimmt. Der Schmelzpunkt von Zinn befindet sich bei 600 °C und reagiert

bei 1000 °C nicht mit dem geschmolzenen Glas. An der Ausgangsstelle aus dem Zinnbad beträgt die Temperatur des Glases 600 °C. Das heiße aber trotzdem erstarrte Material wird aus der Floatkammer herausgezogen und im Kühllofen langsam und spannungsfrei abgekühlt.

Die Weiterleitung des Glases wird über Rollen gemacht. Durch die Drehgeschwindigkeit der Rollen wird die Dicke des Glases eingestellt. Beim Ausgang aus dem Kühllofen wird das Glas auf Fehlstellen überprüft. Eine weitere, visuelle Fehlstellenuntersuchung wird zu einem späteren Zeitpunkt nochmal gemacht. Die entstandene Glasplatte wird dann mechanisch geschnitten und gestapelt.

#### 4.4.5. A. Wagershauser Strassenbau

Bericht von Kathrin Flohr

##### Einleitung

Gegründet wurde das Werk 1927 von Anton Wagershauser und erstreckt sich mittlerweile auf über 100.000 m<sup>2</sup>. Der Mischturm als Zentrum des Werks wiegt über 650.000 kg und wird von einem 4 m tiefen und sehr langen Plattenfundament getragen. Die Werksbesichtigung wurde von dem Geschäftsführer Herr Stefan Magasus geleitet. Wagershauser Stra-

ßenbau ist neben der Asphaltherstellung ebenso spezialisiert in der Baustoffwiederverwertung, um Altbeton und Schutt in den Lebenskreislauf wieder mit einzubringen.

### Leistungsspektrum

Das Leistungsspektrum des Baubetriebes reicht von Straßenbau und Hofbefestigungen aller Größen, Erdbau, Tiefbau, Kanalbau, Pflasterbau, Ingenieurbau bis hin zum Deponiebau und der Umwelttechnik. Seit Mitte der 90er Jahre ist das Werk mit geschultem Personal im Deponiebau tätig. Zu den Baumaßnahmen gehören unter anderem Abdichtungsarbeiten auf der Deponie Ramsklinge, Deponieerweiterung mit mineralischer Dichtung und Herstellen von Klärbecken für Sickerwasser mit Kunststoffauskleidungen. Seit 1998 nimmt das Werk uneingeschränkt teerhaltig belastetes Material an, um es nach einem Aufbereitungsprozess wieder in den Wirtschaftskreislauf zurückführen zu können. Die Annahmebedingungen für das belastete Material sind vom Grad der teerhaltigen Kontamination abhängig.



Bild 11: A. Wagershauser  
Strassenbau – Ansicht vom  
Mischturn

### Asphaltmischwerk

Teere und Teerderivate werden im modernen Straßenbau aus Gründen des Umweltschutzes und der Arbeitshygiene nicht mehr verwendet. Teer wurde durch Bitumen ersetzt. Für die Asphaltherstellung ist Bitumen der wichtigste Bestandteil. Bitumen ist ein Destillationsprodukt aus der Zubereitung von Rohöl. Die Raffinerieindustrien werden in der Technik immer besser, so dass das eigentliche „Abfallprodukt“ Bitumen mit dem Fortschritt immer besser wird. Es findet heute in zahlreichen Bauprodukten Anwendung, wie zum Beispiel als Abdichtungsmaterial, durch seine wärmeisolierende Wirkung und aufgrund seiner Widerstandsfähigkeit gegenüber Luft, Wasser und Chemikalien. Auf der Basis von Bitumen erhält Asphalt seine thermoplastische, feste und belastbare Eigenschaft. Die Asphaltböden sind in drei Schichten zu unterteilen. Die Tragschicht mit der größten Gesteinskörnung ist die erste Schicht von 5 bis 10 cm und verleiht der Asphaltkonstruktion eine tragende, stabilisierende Wirkung und ergibt somit eine standfeste und gleichmäßige Unterlage für die zwei weiteren Schichten. Die Binderschicht in der mittleren Lage des Asphaltoberbaus erfährt je nach Beanspruchung große Scherspannungen und muss dementsprechend stabil aufgebaut werden. Die letzte und somit oberste Schicht ist die Deckschicht mit der feinsten Körnung, sie besteht entweder aus Walzasphalt oder Gussasphalt. Zusammen ergeben die drei Schichten eine ideale, tragende und thermoplastische Bodenschicht.

Funktionsweise: Durch einen thermischen Vermischungsprozess von Mineralgesteinen, Bindemittel, meist Bitumen und ggfs. Additiven wird Asphaltmischgut hergestellt. Das Mineral wird in verschiedenen Korngrößen beigegeben. Hier findet man Füller (0,6 mm), Sande (2 mm) und Splitte. Der Wagershauser Straßenbaubetrieb verwendet hierbei Edelsplitte aus der Voralpenmoräne, um so eine höhere Festigkeit des Mischgutes zu erzielen und eine effiziente Produktion, durch die Vermeidung von unnötigen Transportkosten zu gewährleisten. Die Bezeichnung Edelsplitte, definiert doppelt gebrochene Steine. Die Funktionsweise eines Asphaltmischwerkes kann in zwei Hauptpunkte untergliedert werden. Zum einen die Trocknung und Lagerung und zum anderen das Mischen des Mischguts.

Lagerung und Trocknung: Mineralstoffe werden im Wagershauser Straßenbau größtenteils überdacht in Boxen mit Dachkonstruktionen gelagert. Eine Dachkonstruktion über den Boxen ist zwar teurer und aufwendiger, jedoch bringen überdachte Boxen den Vorteil mit sich,

Bild 12: Lagerboxen der Mineralstoffe



dass die Mineralstoffe vor Niederschlägen und auch vor Wind geschützt sind. Die Lagerung erfolgt aber auch ohne Überdachung in Haufen, jedoch Haufenweise so weit voneinander entfernt, dass eine Vermischung ausgeschlossen wird. Vor allem die zur Baustoffwiederverwendung dienenden Materialien, wie Bauschutt werden offen gelagert. Um dem Feuchtigkeitsanfall und dem Masseverlust durch Wind vorzubeugen werden Füller ausschließlich in Silos gelagert.

Im hinteren Bereich der Speicher befinden sich Stahltrichter durch die das Mischgut hinein rutscht, zur Vordosierung der Mineralstoffe. Es besteht für Menschen, die das Haufwerk betreten, die Gefahr einzubrechen und durch die Massen erdrückt und verschüttet zu werden. Hier herrscht somit höchste Lebensgefahr.

Vordosierung der Mineralstoffe: Die Zusammensetzung der Mineralstofffraktionen kann durch die Dosiergeräte volumetrisch oder gewichtsmäßig gesteuert werden. A. Waggerhauser Straßenbau verfügt über beide Varianten. Hier kann die volumetrische Dosierung mit Abzugsbändern, als auch die gravimetrische Dosierung mit Bandwaage erfolgen. Die Förderstärke reicht bis zu 8 Tonnen pro Stunde.

Durch spezifische Eich- oder Vergleichskurven lassen sich volumetrische Doseure steuern. Die Geschwindigkeit des Abzugsbandes und die Auslauföffnung sind die variablen Parameter der Eich- oder Vergleichskurven. Notwendig sind auch die Materialeinflüsse des Mineralstoffes, so dass spezielle Eichkurven für Mineralstoffe verschiedener Herkunft aufgestellt werden müssen. Die Funktionsweise der Bandwaage beruht auf der Erfassung der pro Zeiteinheit durchlaufenden Menge an Mineralstoffe. Das vordosierte Mischgut wird auf einem stetig arbeitenden Förderer zum Mischurm und seiner Anlage transportiert. Somit ist eine gleichbleibende Zufuhr der Mineralstoffe sichergestellt. Trocknung der Mineralstoffe Je nach Mischgutrezeptur werden die Mineralstoffe der Trockentrommel zugeführt um dem genauen Trockengewicht der Rezepturen zu entsprechen. Drehrohröfen werden zur Trocknung verwendet. Diese sind speziell zur Wasserverdampfung und Mineralstofftrocknung konstruiert. Bei der Trocknung durchlaufen die Mineralstoffe ein zylindrisches Stahlrohr. An der höheren Seite des geneigten Rohrs werden die Mineralstoffe eingetragen. Der Brenner ist an der entgegengesetzten Seite angeordnet, wo auch die getrockneten Mineralstoffe den Zylinder verlassen.

Entstaubung: Der Staubgehalt im Rohgas der Trockentrommel ist von dem eingesetzten Mineralstoff, vom Füllergehalt und von den spezifischen Kenndaten der Trockentrommel abhängig. Zuerst wird eine Grobreinigung durchgeführt und dann in der zweiten Stufe wird der Abgasstrom mit Hilfe von Filtern gereinigt.

Heißabsiebung und Silierung: Vom Ausgang der Tockentrommel werden die getrockneten und heißen Mineralstoffe mit einem Heißelevator zur Heißabsiebung transportiert. Ein Senkrechtelevator in geschlossener, staubdichter Ausführung kommt hier zum Einsatz. Zum Ausgleich der mit dem Heißelevator tatsächlich geförderten Mineralstoffe mit der in der Rezeptur vorgesehenen Zusammensetzung des Gemisches dient die Heißabsiebung.

Lagerung von Bitumen: In der Asphaltproduktion wird Bitumen als Bindemittel verwen-

det. Zwischen 3 bis 8 % (im Durchschnitt 5 %) beträgt der Anteil an Bitumen im fertigen Mischgut, je nach Mischgutsorte. Hier spricht man idealerweise von einer „heißen“ Kette: Das Bitumen wird heiß angeliefert, heiß gelagert und heiß dem Mischvorgang zugegeben. Eine Unterbrechung dieser Kette, wie beispielsweise hohe Temperaturschwankungen würde energetisch und ökonomisch schwer ins Gewicht fallen. Die Tanks zur Heißlagerung des Bitumens sind liegend ausgeführt.

Einbringen bitumenhaltiger und/oder teerhaltiger Recyclingteile Bitumen- und teerhaltige Recyclingprodukte werden ebenfalls wie das Bitumen als Bindemittel eingesetzt. Mehr und mehr ersetzen Recyclingprodukte das Rohbitumen. Für das Erhitzen der Recyclingprodukte kommt eine extra Trommel zum Einsatz. Die Trockentrommel für die Mineralgesteine kann hierfür nicht eingesetzt werden, da die Kalibrierung des Wassergehaltes unterschiedlich ist. Die Recyclingprodukte werden geschlossen in Containern gelagert und besitzen somit einen weitaus niedrigeren Wassergehalt als die Mineralgesteine, welche offen gelagert werden und eine höhere spezifische Oberfläche aufweisen. Da es immer wieder zu Verkantungen kommen kann, gilt es eine strenge visuelle Beobachtung am Containerausgang zu führen.



Bild 13: Mischwerk des Asphaltmischwerks

#### 4.4.6. Zementwerk HeidelbergCement in Schelklingen

Bericht von Elena Lühr

##### Historie

Markant und weithin sichtbar liegt das Zementwerk am südlichen Stadtrand von Schelklingen, das ca. 25 km südwestlich von Ulm liegt. Das Zementwerk erzählt eine über 110-jährige Geschichte, und dient nicht nur als Zementwerk, sondern auch als Arbeitgeber und Ausbildungsbetrieb. Das Zementwerk gehört zu der Firma HeidelbergCement, die 1873 von Johann Philipp Schifferdecker in Heidelberg gegründet wurde und heute der größte Zuschlagstoff- und der viertgrößte Zementhersteller der Welt ist. Das Zementwerk Schelklingen bezieht seine Rohstoffe überwiegend aus der näheren Umgebung. Das Werk baut im Tagebau Kalk- und Mergelstein in dem Steinbruch Vohenbronnen und dem Steinbruch Gerhausen/Beiningen ab. Allerdings wird nur noch wenig Gestein aus dem Steinbruch Gerhausen/Beiningen abgebaut. Die Sandgrube Altheim, die nördlich von Alheim liegt, dient dem Zementwerk Schelklingen als Rohstofflieferant für Sand. Der größte Teil des Sandes wird jedoch von Gießereien (die Absande) abgekauft und zur Verarbeitung genutzt. Wird ein Steinbruch aufgegeben weil er unrentabel geworden ist, wird er von HeidelbergCement mit Hilfe lokaler Behörden und Naturverbänden wieder renaturiert und kultiviert. Das benötigte Eisenerz wird vom Zementwerk komplett dazugekauft.

##### Rohmaterialgewinnung und Zerkleinerung

Als Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Zementklinker dienen Rohstoffe, die die Hauptbestandteile des Zementes  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  enthalten. Die wichtigsten Rohstoffe für die Herstellung von Zement sind in der Regel Kalkstein, Ton und Mergel. Sie werden in Steinbrüchen durch Sprengen oder mit schwerem Gerät durch Reißen gewonnen und durch Radlader oder Muldenkipper zu den Brecheranlagen transportiert. Dort wird das Gestein grob auf die Größe von Straßenschotter zerkleinert.

Bild 14: Homogenisierung der Rohschotter in Mischbetten



Bild 15: Schachtvorwärmer



### Lagerung und Homogenisierung

Das vorzerkleinerte Rohmaterial, das Rohschotter heißt, wird vor der Weiterverarbeitung zunächst zwischengelagert. Es wird über Förderbänder, mit Seil- oder Schienenbahnen und in Ausnahmen auch mit LKWs in die Schotterhalle des Zementwerks transportiert, wo es in Mischbetten eingelagert und homogenisiert wird. Mischbetten dienen einer besseren Verwendung von inhomogenen Rohmaterialien und einer besseren Gleichmäßigkeit von Rohmehl und Klinker und damit einer besseren Zementqualität.

### Trocknung und Rohmahlung

Die gewünschte Rohmischung aus Schotter und den erforderlichen Zuschlagstoffen (Quarzsand und Eisenerz) wird über Dosiereinrichtungen hergestellt. Danach wird das Gemisch in zwei vertikalen Walzenschüsselmühlen transportiert und fein gemahlen. Anschließend wird das Rohmehl in den Schachtvorwärmer mit dem heißen Abgas aus dem Brennprozess gleichzeitig getrocknet und vorgewärmt und in eine Elektrofilteranlage geblasen. Dort wird das Rohmehl vom Abgas abgeschieden und in einem Mischkammersilo eingelagert. Im Zementwerk Schelklingen wird das Rohmehl alle dreißig Minuten in einem angegliederten Labor analysiert und bei Bedarf wird das Mischungsverhältnis geändert. Die Rohmehlproben werden durch einen Röntgenspektrometer auf sieben Elemente untersucht.

### Brennen

Das Brennen des Rohmehls - der wichtigste Vorgang in der Zementherstellung - erfolgt im Zementwerk Schelklingen in einem horizontalen, leicht geneigten Lepolofen (Rostvorwärmerofen). Drehöfen sind feuerfest ausgemauerte Rohre mit Durchmesser bis etwa 6m, die bis 3,5° geneigt gelagert sind und sich mit 1,5 bis 3 Umdrehungen in der Minute um seine Längsachse drehen. Durch die Neigung und der Drehung läuft das am oberen Ende aufgebraachte Brenngut der Brennstoffflamme entgegen.

Der Drehofen hat Zweitfeuerung angewendet. Im Lepolofen befindet sich die Klinkerbildung statt. Das Brenngut wird in der Sinterzone bei ca. 1450 °C gebrannt und erst durch die Ofendrehung bekommt das Brenngut eine kugelige Form. Das Brenngut wird mit der Brennung durch Neigung und Drehung des Ofens aus dem unteren Ende und in die Satellitenkühler eingebracht. Klinkerkühler spielen eine herausragende Rolle für die Wärmewirtschaft der Ofenanlage und erfüllen im Zementbrennprozess zwei Funktionen: die Kühlung des Brenngutes auf die erforderlichen Temperaturen; und die Rückgewinnung eines möglichst großen

Teils der Brenngutenthalpie mit der Kühl- bzw. Verbrennungsluft. Nach dem Brennen wird der Klinker abgekühlt und in Klinkersilos bevorratet.



Bild 16: Horizontaler Lepolofen und Satellitenkühler

### Zementmahlung

Nach der Lagerung in Klinkersilos wird der Klinker in Zementmühlen unter Zusatz von Gips, Anhydrit und zum Teil weiteren Zumahlstoffen, wie z. B. Kalkstein, Hüttensand oder Flugasche, zu Zement gemahlen. In diesem Prozess soll die Oberfläche des Mahlgutes so vergrößert werden, dass eine ausreichende Reaktivität für die Verarbeitung des Zementes vorhanden ist.



Bild 17: Kugelmühle

### **Verladung, Verpackung und Versand**

Zement wird überwiegend als lose Ware abgegeben und über Terminals auf Straßen- oder Schienenfahrzeuge bzw. Schiffe verladen. Ein kleiner Anteil des Zementes erreicht den Kunden als Sackware, abgefüllt durch Rotopacker und gestapelt über automatische Palettieranlagen.

### **Ständige Überwachung**

Hochqualifizierte Mitarbeiter betreiben die Anlagen mit Hilfe modernster mikroprozessorgesteuerter Leitsysteme vom zentralen Leitstand aus. Hier laufen sämtliche Daten aus den Anlagen und dem Labor zusammen. Im Leitstand werden nicht nur alle Produktionsabläufe, sondern auch alle relevanten Emissionsdaten rund um die Uhr überwacht. Die Emissionsdaten sind für die Überwachungsbehörde jederzeit einsehbar und werden 5 Jahre archiviert.

Darstellung Förderverein  
Baustoff-Forschung e.V. des  
Centrum Baustoffe und  
Materialprüfung der TUM

Das Ziel des Fördervereins ist die finanzielle Unterstützung der Aktivitäten des cbm im Bereich Wissenschaft und Forschung

Der Förderverein Baustoff-Forschung e.V. ist ein als gemeinnützig anerkannter, eingetragener Verein (Amtsgericht München, VR 18437)

Die Mitgliedschaft kostet 50,00€ pro Jahr. Eine Firmenmitgliedschaft ist für 200,00€ zu erwerben. Den Mitgliedsantrag erhalten Sie unter [www.cbm.bgu.tum.de](http://www.cbm.bgu.tum.de)

**Förderverein Baustoff-Forschung e.V. des Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TUM**

**Was wir für die Mitglieder tun:**  
Zusendung der Jahresmitteilung durchführen  
Kostenfreie Teilnahme am Baustoffseminar einrichten  
Mithilfe bei Lösung fachlicher Probleme ermöglichen

**Was die Mitglieder über die Mitgliedsbeiträge für uns tun:**  
Wissenschaftliche Veranstaltungen unterstützen  
Drucklegung wissenschaftlicher Arbeiten finanzieren  
Beschaffung technischer Hilfsmittel möglich machen  
Wissenschaftlichen Informationsaustausch fördern  
Mitarbeit in Fachgremien ermöglichen

## 5. Veranstaltungen

### 5.1. 11. Münchener Baustoffseminar

ausgerichtet vom Förderverein Baustoff-Forschung e.V.

#### **Bewehrungen im Betonbau – Tragfähig? Dauerhaft? Inspizierbar?**

Am 12. April 2013 wurde in München zum elften Mal das Münchener Baustoffseminar abgehalten und thematisierte die Frage nach der Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Betonbewehrung in der Praxis und die Möglichkeiten diese zu inspizieren. Die thematisch verschiedenen, halbstündigen Vorträge wurden von externen und internen Vertretern aus Industrie und Wissenschaft gehalten. Als externe Referenten wurden unter anderem Dr.-Ing. Christian Fischer vom MPA der Universität Stuttgart und Dr.-Ing. Jörg Moersch vom Institut für Stahlbetonbewehrung e.V. eingeladen. Die aktuellen Themen des cbm wurden von Dipl.-Ing. Kai Osterminski, Dipl.-Ing. Sylvia Keßler, Dr.-Ing. Andreas Volkwein und Dipl.-Ing. Marc Zintel vorgestellt.

Nach einer allgemeinen Einführung von Prof. Dr. Christoph Gehlen stellte Dr.-Ing. Jörg Moersch eine Übersicht des aktuellen Standes des laufenden Harmonisierungsverfahrens bei der Normung von Beton- bzw. Spannstählen vor. Jörg Moersch ist seit 2002 Geschäftsführer des Instituts für Stahlbetonbewehrung e.V. und arbeitet seit mehreren Jahren am europäischen Harmonisierungsprozess der Normen für Betonstahl und Spannstahl. Die Normungsarbeit nach dem zugrundeliegenden Mandat M115/rev. 1 aus dem Jahr 2009 durch den Ausschuss ECISS TC 104 gestaltet sich aus verschiedenen Gründen als schwierig. Die abgestimmten Entwürfe sollen Ende 2014 vorliegen und nach Einbeziehung der Mindestzeiten für Abstimmungen und Umfragen könnte Ende 2015 das erste harmonisierte Bauprodukt nach Mandat M115 erscheinen.

Diesem folgte der Vortrag von Dipl.-Ing. Kai Osterminski über die Einflüsse von Korrosion auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen und die Möglichkeiten einer Vorhersage des Korrosionsfortschrittes anhand eines Ingenieurmodells. Kai Osterminski ist seit 2011 Leiter der Projektgruppe Bewehrungstechnik am Centrum Baustoffe und Materialprüfung und arbeitet im Rahmen seiner Dissertation an der Entwicklung des Ingenieurmodells und den benötigten Datenbanken. Das Modell stellt in Kombination mit weiteren Ingenieurmodellen, welche Einleitungsphase und Konsequenzen der Bewehrungskorrosion bestimmen, die Möglichkeit der vollständigen Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen bereit.

Anschließend gab Dipl.-Ing. Sylvia Keßler einen Einblick in die Möglichkeiten und Grenzen der Methode der Potentialfeldmessung. Sylvia Keßler arbeitet seit 2010 als Leiterin der Arbeitsgruppe Stahl und Korrosion am cbm. Sie untersucht in ihrer laufenden Doktorarbeit die Quantifizierung der Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessungen. Mithilfe von unterschiedlichen Untersuchungen an vierzig Jahre alten, frei bewitterten Stahlbetonbauteilen konnten für die Praxis neue Erkenntnisse abgeleitet werden.

Dr.-Ing. Christian Fischer thematisierte im Anschluss daran den Einfluss von Stahlkorrosion auf den Verbund im Stahlbeton. Christian Fischer promovierte am Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart und ist in mehreren Referaten der MPA der Universität Stuttgart tätig. In seiner Promotion befasste sich mit den komplexen Zusammenhängen der Bewehrungskorrosion und ihre Folge auf die Verbundwirkung von Stahl und Beton. Mithilfe von weitreichenden experimentellen und numerischen Untersuchungen zu den Einflussgrößen auf das Verbundverhalten, konnten Bauteilschäden und deren Folgen detailliert bewertet werden.

Nach der Mittagspause widmete sich Dr.-Ing. Andreas Volkwein der Ermüdung von Stahlbewehrung mit und ohne Korrosionseinfluss. Andreas Volkwein ist ein langjähriger Mitarbeiter am cbm und war von 1998 bis 2009 Leiter der Arbeitsgruppe 3 „Stahl und Korrosion“. Er ist seit 2010 Forschungsbeauftragter des cbm. Im Vortrag wurde die Rolle der Korrosion auf das Dauerschwingverhalten und damit die Beeinflussung der Lebensdauer erläutert.

Dr.-Ing. André Weber stellte anschließend eine Alternative zum herkömmlichen Baustahl vor. André Weber ist Leiter in der Entwicklung der Firma Schöck Bauteile GmbH und befasst sich mit der Glasfaserbewehrung. Dieser seit mehreren Jahrzehnten bekannte Werkstoff bietet vielseitige Anwendungsmöglichkeiten und ermöglicht durch seine Eigenschaftspalette einfache Lösungen für bestimmte Problemstellungen an.

Abschließend präsentierte Dipl.-Ing. Marc Zintel eine Möglichkeit der Vermeidung der Korrosion von Stahlbewehrung. Marc Zintel befasst sich im Rahmen seiner Promotion mit epoxidharzbeschichteter Stahlbewehrung, welche durch die Barrierewirkung gegen den anliegenden Elektrolyten (Beton) die Korrosion be- bzw. komplett verhindern soll. Im Vortrag wurden der derzeitige Stand der Möglichkeiten und die Grenzen der Beschichtung anhand von Bauwerksuntersuchung an einer 20 Jahre alten Brücke mit epoxidharzbeschichteter Stahlbewehrung vorgestellt.

Herr Dr.-Ing. Volkwein wurde im Vorgriff auf seinen Ruhestand ab Juni 2013 für seine Verdienste am cbm geehrt. Nach kurzer Erläuterung zu seinem Werdegang wurde ihm symbolisch und als Andenken ein Teil seines damals zu seiner Doktorarbeit selbst entwickelten Mikrowellenaufbaus überreicht.

Das Seminar endete nach einer kurzen Verabschiedung und Danksagung von Christoph Gehlen.

Gruppenbild der Referenten  
v.l.n.r.: C. Gehlen, K. Osterminski, A. Weber, Ch. Fischer, S. Keßler, A. Volkwein, M. Zintel, J. Moersch



## 5.2. 14. Deutsche Betonkanu-Regatta

Projektbetreuung: Dipl.-Ing. Manuel Göbel

Von September 2012 bis Mitte Juni 2013 konstruierten 11 Bauingenieur-Studenten am Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München zwei voll schwimmfähige Kanus aus Beton, mit denen sie bei der 14. Deutschen Betonkanu-Regatta 2013 am Dutzendteich in Nürnberg an den Start gingen.

Die Boote - zwei Rennkanus - wurden am Computer als maßstabsgetreues CAD-Modell konstruiert, welches später als Vorlage für die Form der Schalung diente. Dabei entschied man sich für eine 6-teilige Außenschalung (drei Steuerbord, drei Backbord) aus Holz. Die hölzerne Schalhaut wurde mit einem Harz verkleidet, um ihren Widerstand zu erhöhen und um eine glatte Oberfläche für eine schönere Betonaußenansicht zu schaffen. Die Betonrezeptur wurde im Zuge einer Bachelor-Thesis ermittelt. Die Anforderungen an die Frisch- und Festbetoneigenschaften wurden über die Entwicklung einer hochfesten Feinbetonrezeptur - bestehend aus Portlandzement, gesichteter Steinkohlenflugasche, Silikastaub und Quarzsand - realisiert. Um die erforderliche Biegezugfestigkeit zu erreichen, wurden zwei Lagen Glasfasermatten als Bewehrung der 4 - 8 mm dicken Bootswände eingelegt. Zur Aussteifung des Bootes wurden Spanten in Form von zwei Strängen aus PE-Schaum einbetoniert.



TUM cbm-Kanu „Seppi“

Die fertigen Kanus mit den Namen „Seppi“ und „Rosi“ gingen anschließend mit rd. 70 weiteren Booten und über 100 Teams am Samstag, 21. Juni, in Nürnberg an den Start. Die TU München stellte zwei Herrenteams sowie ein Frauenteam. Dabei schaffte es ein Herrenteam bis ins Halbfinale. Das Finale gewannen nach 2009 und 2011 zum dritten Mal in Folge die niederländischen Studenten der Universität Twente Enschede.

Das Projektteam bedankt sich bei der HeidelbergCement AG Deutschland, BauMineral GmbH, Fuchs Lubritech GmbH, IB Dr. Rausch - Die Tragwerker und der PD FibreGlas Group für die freundliche Unterstützung.

## 5.3. Summer University und Trainee-Programm

### 5.3.1. Summer University Climate-KIC

Das Climate-KIC ist eines der im Jahr 2010 vom European Institute of Innovation and Technology (EIT) gegründeten Knowledge and Innovation Communities (KIC).

Das Ziel des Climate-KICs ist, Innovationen zur Minderung des Klimawandels, bzw. zur Anpassung, anzuregen und zu unterstützen. Dies soll mit Hilfe eines europäischen Netzwerks geschehen, in dem sich Partner aus der Wirtschaft, dem öffentlichen Sektor sowie dem akademischen Bereich befinden. Im Bereich „Climate KIC Educations“ werden an den beteiligten Universitäten Lehrveranstaltungen als Summerschool durchgeführt, bei denen die Studierenden neue Konzepte für die Anpassung an den Klimawandel lernen.

Im Rahmen des Workshops, der im August 2013 am cbm stattfand, beteiligte sich die AG6 mit einem halben Tag. Dieser umfasste einen Vortrag von Prof. Große über Zerstörungsfreie Prüfung von Faserverbundwerkstoffen und einen Übungsteil, der von Dipl.-Ing. Christian Geiss und Dr. Florian Stark durchgeführt wurde, wobei die 38 Studierenden im praktischen Teil selber Hand anlegen durften. Die zweigeteilte Vorlesung fand großen Anklang, so dass mit einer erneuten Durchführung im August 2014 gerechnet wird.

Foto: Prof. Große eröffnet mit dem theoretischen Teil "ZfP von Faserverbundwerkstoffen" den Beitrag der AG6 zur Summerschool.



### 5.3.2. Carbon Composites Trainee-Programm

Der Carbon Composites e. V. (CCeV) veranstaltete in diesem Jahr wieder ein Trainee-Programm für Studenten, welche neben ihrem Studium eine zusätzliche fachliche Ausbildung auf dem Gebiet der Faserverbundwerkstoffe erhalten möchten. Dieser Workshop ist studienbegleitend und auf zwei Semester aufgeteilt: Im ersten Semester werden die theoretischen und praktischen Grundlagen bei verschiedenen Industrie- und Institutspartnern vermittelt (z. B. SGL Carbon, EADS-MAS, MT Aerospace, Audi, Eurocopter, BMW Group und Uni Stuttgart). Das zweite Semester besteht aus der Abschlussarbeit.

Als eine von mehreren Stationen verbrachten 14 Studenten einen Tag am Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung. Dort erhielten sie zunächst, ähnlich wie bei der Summer University, eine Einführung in die Zerstörungsfreie Prüfung von Faserverbundwerkstoffen mit einem darauf folgendem Praktikum, bei dem die Teilnehmer mit typische Verfahren wie z. B. die optische Lockin-Thermografie, Schwingungsanalyse und Ultraschall zur Detektion von Schädigungen in Faserverbundstrukturen vertraut gemacht wurden. Teilweise durften sie dabei selbst Messungen an Realbauteilen durchführen.

## 5.4. Betriebsausflug 2013

### Geodätisches Observatorium Wettzell & Landshut

Der diesjährige Betriebsausflug fand am 25. September statt und wurde von Fabian Malm (Wissenschaftlicher Mitarbeiter der AG 6) organisiert. Dabei muss gesagt sein, dass eine starke Unterstützung seitens der Sekretärinnen Frau Renate Deuerling und Frau Britta Uhl geleistet wurde. Neben einer Führung durch das geodätische Observatorium Wettzell war

eine historische Stadtführung in Landshut geplant. Das Geodätische Observatorium Wettzell leistet im Rahmen zahlreicher Aktivitäten der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) und der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der TU München eine international anerkannte Spitzenstellung der Bundesrepublik Deutschland an den internationalen Aufgaben der Geodäsie und zählt zu den bedeutendsten geodätischen Observatorien weltweit. Die altbayerische Herzogstadt Landshut veranstaltete dieses Jahr wieder eines der größten historischen Feste Europas – „die Landshuter Hochzeit 1475“. Mittelalterlich geschmückte Straßen, Gässchen und Plätze prägen auch noch nach Abschluss der offiziellen Feierlichkeiten das Stadtbild.

Der Betriebsausflug startete dieses Jahr auf Grund des straffen Zeitplans mit einem On-board-Frühstück im doppelstöckigen Reisebus. Mit Hilfe der tatkräftigen Bord-Stewardessen Frau Uhl und Frau Deuerling konnte auch während der Fahrt Richtung Wettzell ein vielseitiges und reichhaltiges Frühstück mit Butterbrezen, süßem Gebäck und Kaffee serviert werden. Einige nutzten die rd. 2,5 Std. lange Fahrt, um noch einmal abzuschalten, andere sahen sich den SAT.1 Bayern Bericht zu Kleinwindanlagen, u.a. mit den Hauptdarstellern Prof. Große und Prof. Gehlen, über das DVD System im Bus an. Vorbei am BMW-Werk Dingolfing und an der Papierfabrik UVPM erreichten wir pünktlich das Observatorium Wettzell und wurden dort auch gleich von Herrn Thomas Kluegel empfangen. Während eine Hälfte der Gruppe sich einen Vortrag über den Standpunkt Wettzell, dessen Aufgabengebiet sowie das fachliche Hintergrundwissen anhörte, konnte die andere Hälfte bereits die Führung über das Gelände und die Kontrollstation starten. Highlights der Besichtigung waren die beiden TWIN-Teleskope mit einem Durchmesser von 13,2 m und einem umfangreichen Frequenzspektrum (1-18GHz), was teilweise an das technisch Machbare stößt. Mit den TWIN-Radioteleskopen setzt Deutschland neue Maßstäbe in der geodätischen Infrastruktur und erweist sich erneut als wichtiger Impulsgeber für die Beobachtungstechnologie. Weiterhin



Bild: oben links: On-Board-Service zum Frühstück; oben rechts: Faszinierte Blicke auf eines der TWIN-Teleskope in Wettzell



Bild: unten links: Mittagessen im Gasthof zum „Lindner Bräu“ in Bad Kötzing; unten rechts: Frau Deuerling unterwegs als Marketenderin

bestaunt werden konnte das Kontrollzentrum des WLRS (Wetzell Laser Ranging System), welches konzipiert wurde, um Entfernungen sowohl zu geodätischen Satelliten als auch zum Mond mit Zentimetergenauigkeit zu messen. Beobachtet werden damit die geodätischen Satelliten (1.000 km-20.000 km Flughöhe) und Satelliten der Schwerefeldmissionen.

Mit dem Kopf voller Informationen ging es anschließend weiter mit dem Bus zum „Lindner Bräu“ in Bad Kötzing. Der Ansturm von über 70 Leuten brachte die Gaststätte zum Leben und weckte die Bedienungen aus der Mittagsruhe. Nachdem die Getränke und das Essen serviert wurden, konnten die imposanten Eindrücke mit den Tischnachbarn noch einmal diskutiert werden. Da die eine oder andere Bayerische Creme doch etwas länger dauerte bis sie ihren Gast gefunden hatte, musste die Weiterfahrt mit etwas Verspätung Richtung Landshut angetreten werden. Dennoch war unser tiefenentspannter Busfahrer guten Mutes, die Zeitverzögerung wieder einholen zu können. Eine Vollsperrung einer Landstraße auf Grund eines Unfalls machte allerdings jede Chance zu Nichte, das nächste Reiseziel noch im angemessenen Zeitrahmen zu erreichen.

Somit wurde aus der Landshuter Stadtführung ein verlängerter Rasthof-Aufenthalt bei dem noch genüsslich das ein oder andere Feierabendbier getrunken werden konnte. Während der Fahrt dorthin wurde im Bus ein Mittelalter-Quiz verteilt. Die Siegerehrung mit Met und Trinkhorn wurde dann am Rastplatz von Prof. Große vorgenommen, Siegerteam: Team Tröte, die Herren D. Weger, Chr. Tauscher, M. Raith. Auf der Heimfahrt gab es noch kleine Überraschungshäppchen und Zwetschgendatschistückchen, die Herr Malm auf sehr charmante und humorige Weise feilbot, so dass keiner entkräftet in Pasing ankam, womit ein dennoch schöner Tag zu Ende ging.

## 5.5. Weiterbildendes Studium

### Asphalttechnik an der TU München

Das weiterbildende Studium Asphalttechnik wird seit 2005 angeboten und wurde vom Deutschen Asphaltverband e. V. (Bonn) initiiert und vom Hauptverband der Deutschen Bauindustrie sowie dem Zentralverband des Deutschen Baugewerbes mitgetragen. Um das Studium möglichst wohnortnah anzubieten, ändert sich alle zwei Jahre der Austragungsort des Studiums. Nachdem es bereits an der TU Braunschweig, an der TU Dresden, an der Ruhr-Universität Bochum und an der TU Darmstadt durchgeführt wurde, finden die Staffeln 2013 und 2014 am cbm der TU München statt. Das Studium richtet sich an Ingenieure in Bauverwaltungen, Prüflaboratorien, Bauunternehmungen und Ingenieurbüros sowie an alle, die ein vertieftes Wissen in der Asphalttechnologie erwerben wollen. Zulassungsvoraussetzung ist ein abgeschlossenes Hochschul- oder Fachhochschulstudium, ein gleichwertiges Ingenieurstudium oder ein naturwissenschaftliches Studium mit mindestens zwei Jahren Berufserfahrung.

Den Teilnehmern wird von Hochschullehrern und Fachleuten aus der Wirtschaft umfangreiches Wissen um den Asphalt vermittelt, damit sie auf der Baustelle, bei der Prüfung, bei Beratungs- und Schlichtungsfragen den Baustoff Asphalt richtig beurteilen, einsetzen und behandeln können. Die Inhalte des Studiums können unter den folgenden Themen zusammengefasst werden:

- Technisches Regelwerk
- Baustoffe
- Erstprüfung/Eignungsnachweis
- Asphaltarten und -sorten
- Herstellung von Asphalt
- Einbau und Verdichtung von Asphalt
- Gütesicherung
- Sonderbauweisen
- Kommunaler Straßenbau
- Erhaltung und Erneuerung
- Ausbauasphalt
- Dimensionierung
- Ausschreibung und Bauvertrag
- Umweltfragen
- Qualitätsorganisation
- Neue Entwicklungen

Im Februar trafen sich die 25 Teilnehmer der Staffel erstmals, um die Vorlesungen zu besuchen. Nach dem für jeden Teilnehmer zweitägigen Praktikum schloss sich die Phase der Bearbeitung der insgesamt 13 Lehrbriefe an, die bis Ende des Jahres andauerte. Nach Anfertigung einer Seminararbeit und der Vorstellung dieser im Rahmen eines Vortrages wird das Studium mit der schriftlichen und mündlichen Prüfung im Februar 2014 abgeschlossen. Jeder Teilnehmer erhält nach erfolgreichem Abschluss ein Zertifikat, das auch von je einem Vertreter der begleitenden Bauverbände unterzeichnet wird.



Bild: Teilnehmer bei der Demonstration des Benkelmann-Balkens

## 6. Ehrungen

### 6.1. Doce et Delecta

#### Lehrpreis der Fakultät Bau Geo Umwelt für Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Große

Exzellenz in der Lehre würdigen auch die Fakultäten der TUM und verleihen jährlich eigene Lehrpreise an Dozentinnen und Dozenten, die sich in besonderem Maße in der Lehre engagieren.

Bild: Prof. Christian Große



Im Rahmen des „Tages der Fakultät Bau Geo Umwelt“ wurde Prof. Große am 6. Juli 2013 der Doce et Delecta Preis für die Vorlesung "Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen" in der Kategorie „Vorlesung Masterstudium im Bau- und Umweltingenieurwesen“ im Zeitraum Sommersemester 2012 bis Wintersemester 2012/2013 überreicht. Der Preis wird direkt von den Studierenden der TU München über die Fachschaft der Fakultät Bau Geo Umwelt verliehen.

### 6.2. Ernst Otto Fischer-Lehrpreis

#### Dr.-Ing. Annette Spengler wird für ein innovatives Lehrkonzept ausgezeichnet

Bild: Urkunde Annette Spengler



Für den an der TUM intern ausgeschriebenen Lehrpreis können sich wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit innovativen Lehrkonzepten bewerben. Dr.-Ing. Annette Spengler, Lehrbeauftragte im cbm, hat diesen mit 10.000,00€ dotierten Preis im Jahr 2013 für die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt zugesprochen bekommen. Mit der Umsetzung des Praktikums „Werkstoffe im Bauwesen“ in ein eLearning Projekt wird der Bachelor Bauingenieur bereichert. Videos, Selbsttests, Austauschforen und ein Praktikumsbuch ergänzen die Vor-Ort-Besuche in den Baustofflaboren des cbm. Eine Parcoursprüfung löst die klassische schriftliche Wissensabfrage ab.

### 6.3. Fellowship für Innovation in der Hochschullehre

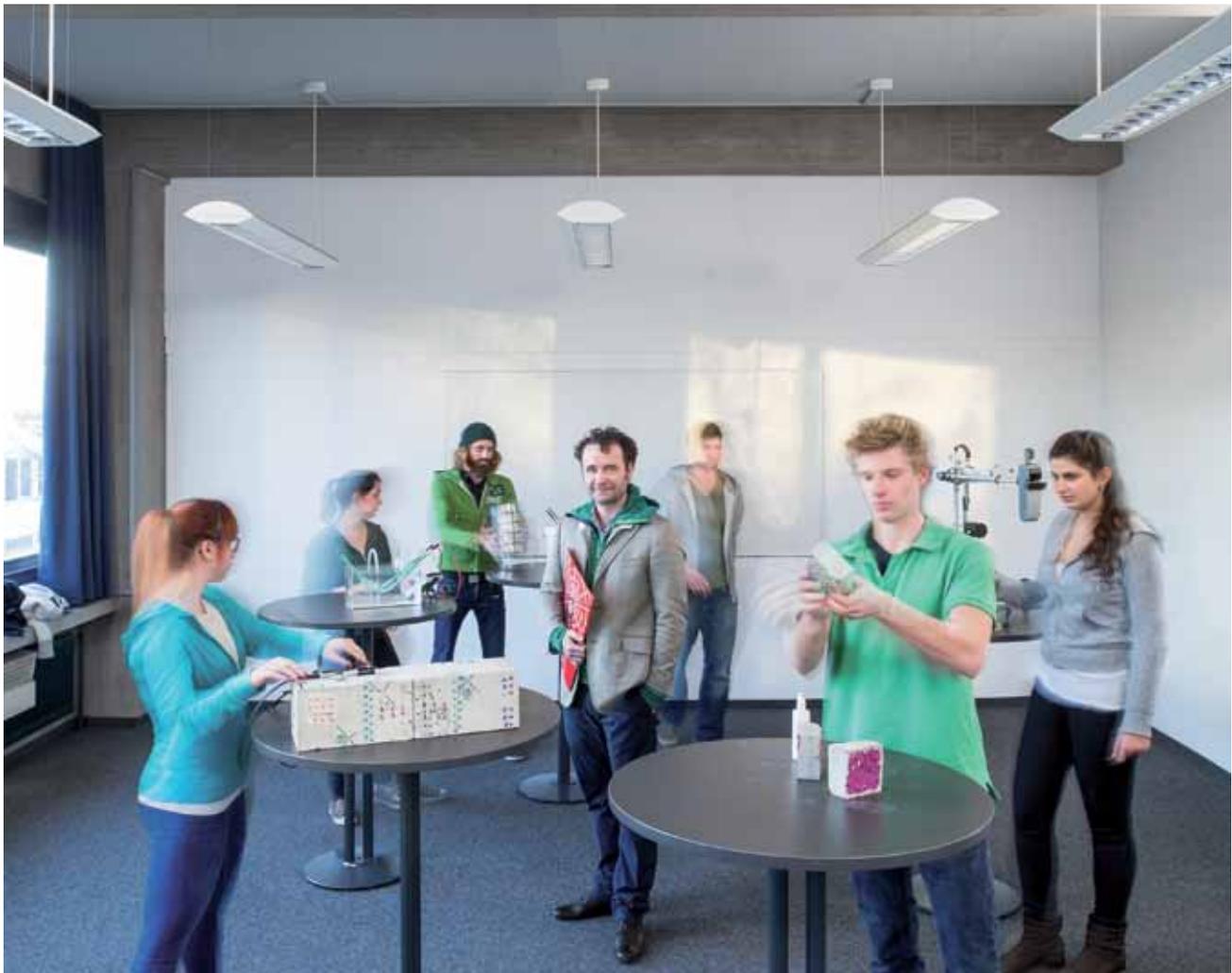
#### Stifterverband zeichnet Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen für sein Lehrkonzept aus

[http://www.stifterverband.info/wissenschaft\\_und\\_hochschule/lehre/fellowships/fellows\\_2013/index.html](http://www.stifterverband.info/wissenschaft_und_hochschule/lehre/fellowships/fellows_2013/index.html)

Das Hochschulreferat für Studium und Lehre der TUM stellt den Preisträger mit seinem Konzept auf seiner Internetseite wie folgt vor :

„Lernen ist der Erwerb von Wissen, das anschließende Ordnen dieses Wissens und schließlich dessen Verknüpfung mit eigenständigem Handeln - sprich: mit dem Erleben. Prof. Christoph Gehlen macht Studierende zu selbstbestimmten, aktiven Lernenden, die nur aus dem Hintergrund gecoacht und begleitet werden. Für sein Lehrkonzept wurde er vom Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft ausgezeichnet. Der Inhaber des Lehrstuhls für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen erhält ein Fellowship, das mit 50.000 Euro dotiert ist.“

Macht Studierende zu selbstbestimmten, aktiven Lernenden: Prof. Christoph Gehlen mit Studenten  
Foto: Astrid Eckert (TUM)



## 7. Berichte aus den Arbeitsgruppen

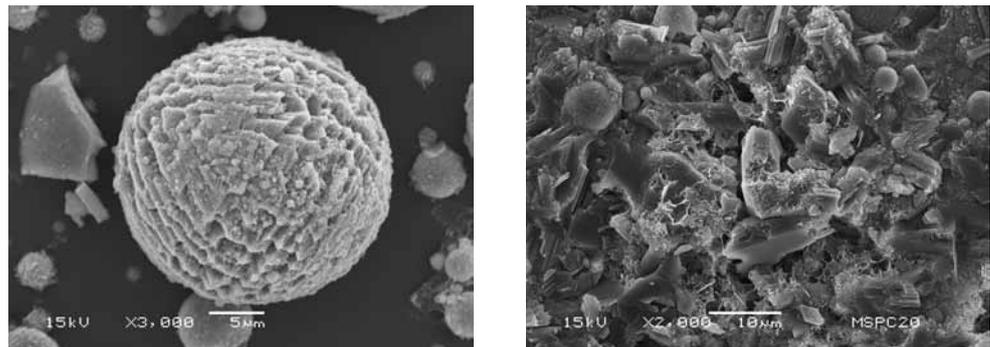
### 7.1 Arbeitsgruppenschwerpunkte

#### 7.1.1. AG 1 Bindemittel und Zusatzstoffe

Die Entwicklung dauerhafter, nachhaltiger und umweltverträglicher Baustoffe gewinnt ökonomisch und ökologisch immer mehr an Bedeutung. Eine Verringerung des Zementgehalts im Bindemittel durch Steinkohlenflugasche oder andere Betonzusatzstoffe und die Entwicklung dauerhafter, nachhaltiger Bindemittel stellt seit Jahren den zentralen Aufgabenbereich der Arbeitsgruppe 1 dar.

Personelle Veränderungen haben sich durch das Ausscheiden von Herrn Dipl.-Ing. Manuel Göbel und Frau Leno, M.Sc. ergeben. Verstärkt wird die AG1 nun durch Frau Irbe, M.Sc., die sich vor allem mit der Betreuung des Röntgendiffraktometers und mit DFG-geförderten Untersuchungen zur Beschleunigung der Reaktionskinetik von Flugasche durch organische Zusätze und mechanische Aktivierung befasst. Diese Thematik stellt eine Fortsetzung der Flugascheuntersuchungen zum Einfluss von verschiedenen, organischen Verbindungen auf das Löseverhalten an Flugaschegläsern dar.

Bild 1: angelöste Flugaschekugel (links), Gefüge eines Gips-Zement-Puzzolan-Bindemittels (rechts) unter dem Rasterelektronenmikroskop



Weitergeführt wird ebenfalls das AiF-Forschungsvorhaben zum Gips-Zement-Puzzolan-Hüttensand-Bindemittel mit Flugasche und REA-Gips. Hierbei sollen dauerhafte, gipsreiche Bindemittel mit für Zement üblichen Eigenschaften entwickelt werden. Gleichzeitig sollen diese Bindemittel wirtschaftlich sein und die Umwelt in deutlich geringerem Maße beeinträchtigen.

Abgeschlossen wurde 2013 der erste Teil des DFG-geförderten Forschungsprojektes zu den Mechanismen der Carbonatisierung von Zementstein unterschiedlicher Zusammensetzung unter erhöhtem Druck und überkritischen Bedingungen.

Ein weiterer großer Themenkomplex in der Arbeitsgruppe 1 ist die Forschung zur Dauerhaftigkeit zementgebundener Baustoffe. Ein Forschungsprojekt zur Modellierung der Mechanismen des Sulfatangriffes auf Beton wurde beendet, während ein weiteres Projekt zur Langzeitwirkung von Flugasche auf den Sulfatwiderstand von Betonen fortgesetzt wurde. Zum Thema Sulfatangriff hat Herr Wolfram Müllauer seine Dissertation mit dem Titel „Mechanismen des Sulfatangriffs auf Beton – Phasenneubildungen und Expansionsdrücke in Mörteln unter  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  Belastung“ erfolgreich abgeschlossen.

Forschungsprojekte zur Thematik der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) wurden auch im Jahr 2013 breit behandelt. Schwerpunkt war hier das Verständnis der Mechanismen beim

Eintrag von Tausalz auf die Löslichkeit von  $\text{SiO}_2$  und dem Einfluss von Flugasche auf die Stabilisierung der C(-A)-S-H-Phasen bei einem externen Tausalzangriff zu vertiefen. Zu diesem Thema hat Frau Anne Dressler ihre Dissertation mit dem Titel „Einfluss von Tausalz und puzzolischen, aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton“ erfolgreich abgeschlossen. Des Weiteren wurde ein Projekt zur Langzeitwirkung von Flugasche auf eine schädigende AKR fortgesetzt und ein weiteres Projekt, ebenfalls zur Langzeitwirkung von Flugasche auf NaCl-beanspruchte Betone, begonnen. Die Anpassung des 60 °C-Betonversuchs als Performance-Prüfung für flugaschehaltige Betone und die Entwicklung eines Verständnisses für die in beschleunigten Prüfverfahren ablaufenden Mechanismen wurde in einem weiteren Forschungsvorhaben bearbeitet.

Eng mit der Forschung verknüpft sind auch die Bereiche der Materialprüfung, die die Arbeitsgruppe 1 bearbeitet. Neben einigen Zulassungsprüfungen von Zementen (z.B. CEM II/B-M(S-L)) und der Fremdüberwachung von Flugasche, wurde auch die Klärung von Schadensursachen an Betonen oder die Lösung anwendungstechnischer Probleme bei Baustoffen behandelt. Einen großen Anteil in der Materialprüfung hat die Prüfung der Alkalireaktivität von Gesteinen und die Beurteilung der AKR-Empfindlichkeit von Betonen unter den Einwirkungen WS (feucht + Alkalien von außen + dynamische Belastung). Die Qualität der durchgeführten Laboruntersuchungen wird jährlich durch mehrere Vergleichsversuchen mit anderen Prüflabors und -instituten überwacht und bestätigt.

Auch in der Lehre werden sowohl die Grundlagen der hier angesiedelten Forschungsgebiete als auch die in den aktuellen Forschungsarbeiten entstandenen Ergebnisse den Studenten näher gebracht. Zum einen wird in den Masterstudiengängen Bauingenieurwesen und Baustoffe, Bauchemie und Instandsetzung die Theorie gelehrt, zum anderen können die Studenten aktiv in Forschungsprojekten als studentische Hilfskräfte oder an ihren Seminar-, Bachelor oder Masterarbeiten mitarbeiten.

### **7.1.2. AG 2 Betontechnologie**

In der AG 2 mit ihren Fachgruppen „Betontechnologie“ und „Straßenbeton“ werden neben den Aufgaben in Lehre und routinemäßiger Materialprüfung die Arbeitsschwerpunkte in der wissenschaftlichen Materialprüfung und in der Forschung gesetzt. Die enge Zusammenarbeit mit der Industrie gewährleistet hierbei eine praxisbezogene Forschung und ermöglicht somit eine schnelle Umsetzung von wissenschaftlich gewonnenen Erkenntnissen.

#### **Forschung in der Fachgruppe „Betontechnologie“**

Die Forschungsschwerpunkte in der Fachgruppe Betontechnologie liegen aktuell in den Bereichen:

- Konstruktionsbetone (Ultra-Hochfester Beton, Selbstverdichtender Beton, Leichtverarbeitbarer Beton, Sichtbeton),
- Rheologie zementbasierter Suspensionen,
- Nachhaltigkeit (ressourcenschonendes Bauen mit UHFB, nachhaltiger Fasereinsatz),
- Dauerhaftigkeit (Carbonatisierung & Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand),
- Verbunddübel und Rheologie von Festkörpern.

Die Forschungsaktivitäten im Bereich Rheologie konzentrierten sich auf die funktionale Gradierung von Stahlfasern in Carbopol®-Gelen. Ziel einer funktionalen Gradierung ist es die

Werkstoffeigenschaften - hier gesteuert durch den Stahlfasergehalt - im Bauteil lokal an die Erfordernisse anzupassen (Bild 1). Die für die Untersuchungen verwendeten Carbopol®-Gele sind transparent und weisen Viskositäten und Fließgrenzen im Bereich fließfähiger Mörtel auf. Vorteil ist, dass die Gradierung direkt visuell beurteilt werden kann. Sie eignen sich somit hervorragend als Modellwerkstoff. Für die Gradierung wurde eine Rotationsmaschine entwickelt und gebaut (Bild 2). Ziel der Untersuchungen war es, Erkenntnisse zur Produktion von effizienten, filigranen, zweiachsig gradierten Fertigteilen aus Stahlfaserbeton für Schalenträgerwerke zu gewinnen.

Bild 1, li.  
bei 525 U/min rotiertes Gel,  
Ansicht von oben auf den  
rechten Teil der Prismenschalung

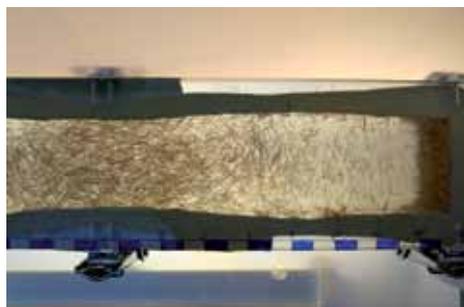
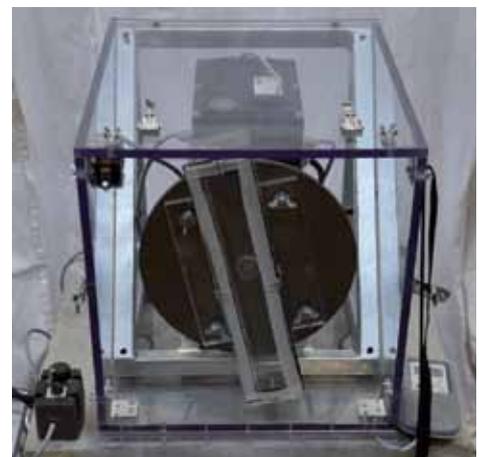


Bild 2, re.  
Rotationsmaschine



Der Forschungsschwerpunkt im Bereich der Modellierung des Tragverhaltens der Verbunddübel lag im vergangenen Jahr auf dem Einfluss der Temperatur auf das Kriechverhalten. Durch das Erkennen systematischer Zusammenhänge zwischen der vorherrschenden Temperatur und dem resultierenden Kriechen der Verbunddübel unter dauerhafter Lasteinwirkung soll eine Möglichkeit für eine sichere Voraussage des temperaturabhängigen Kriechens erarbeitet werden. Ziel des Projektes ist es, durch Versuche mit einer möglichst kurzen Versuchsdauer das temperaturabhängige Kriechverhalten der Verbunddübel vorauszusagen. Mithilfe der Versuche soll es auch ermöglicht werden, das Versagen der Verbunddübel im Kriechversuch in Abhängigkeit der vorherrschenden Temperatur vorauszusagen, was die Grundlage für eine Lebensdauerprognose von Verbunddübeln darstellt.

Bild 3, li.: Thermogravimetrische Aufnahme eines Verbunddübel bei 20°C und zugehöriges Kriechverhalten bei Raumtemperatur

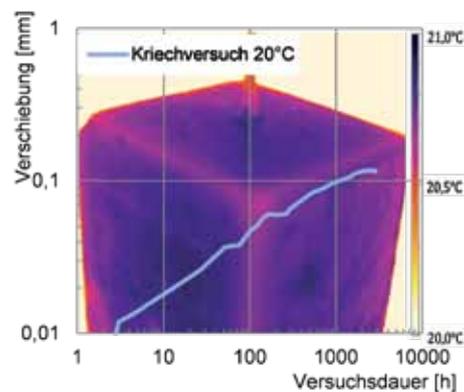
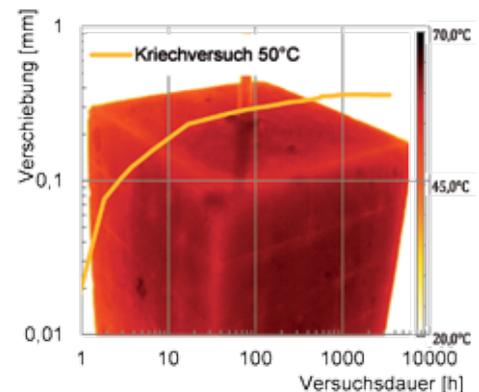


Bild 4, re.: Thermogravimetrische Aufnahme eines Verbunddübel bei 50°C und zugehöriges Kriechverhalten bei erhöhter Temperatur



### Forschung in der Fachgruppe „Straßenbeton“

Zur Sicherstellung der Griffigkeit und der Lärminderungseigenschaften ist die Dauerhaftigkeit der Textur von Fahrbahndecken von besonderer Bedeutung. Zur Beurteilung des Einflusses der Zementart und der Nachbehandlung (Austrocknung) auf die Gefügedichtigkeit im oberflächennahen Bereich und somit indirekt auf die Dauerhaftigkeit von Straßenbetonen wurde die Mikroindentation (Härteprüfung) eingesetzt. Bei der Mikroindentation dringt eine Diamantpyramidenspitze mit definierter Last in die Prüflfläche ein und hinterlässt einen Abdruck, anhand dessen die Härte ermittelt wird. Für die Untersuchungen wurden praxisübliche Straßenbetone hergestellt und nach der Herstellung bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten gelagert. An der Querschnittsfläche der Betone wurde die Mikrohärtigkeit in Abhängigkeit der Tiefe bestimmt. Bild 5 zeigt beispielhaft einen pyramidenförmigen Abdruck in der Betonmatrix nach der Mikroindentation.

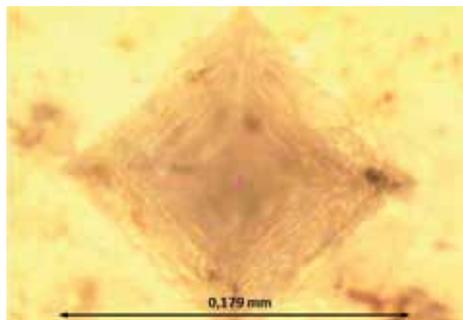


Bild 5: Pyramidenförmiger Abdruck in der Betonmatrix nach der Mikroindentation

Die Untersuchungen ermöglichen unter anderem die Beurteilung, bis in welche Tiefe die Nachbehandlung das Gefüge des Betons beeinflusst. Bild 6 zeigt ein typisches Härteprofil eines Straßenbetons.

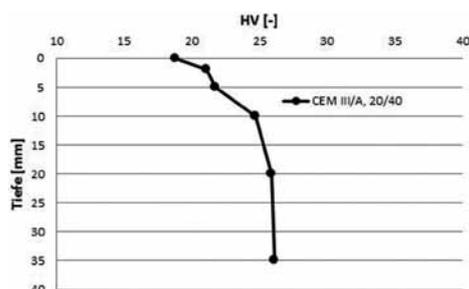


Bild 6: Härteprofil eines Straßenbetons: Zement: CEM III/A, Nachbehandlung: Lagerung bei 20°C, 40% r.F.

### 7.1.3. AG 3 Stahl und Korrosion

Das Jahr 2013 war von erheblichen personellen Veränderungen geprägt. Durch Erreichen des Rentenalters bzw. durch Auslaufen zeitlich befristeter Verträge schieden folgende Mitarbeiter aus: Constanze Förster, Karin Knaus, Dr.-Ing. Andreas Volkwein, Stefanie von Greve-Dierfeld, Matthias Scholz, Thomas Hackenbuchner und Mehmet Öztürk.

Insbesondere das Ausscheiden von Herrn Dr.-Ing. A. Volkwein nach mehr als 39-jähriger Tätigkeit an der TU München hinterlässt eine spürbare Lücke. Herr Dr. Volkwein war maßgeblich am Aufbau des heutigen cbm (unter seiner damaligen Bezeichnung als Prüfamf für Bituminöse Baustoffe) beteiligt. Mit der Vereinigung der Prüfamter an der Fakultät übernahm er im Jahr 2001 die Leitung unserer Arbeitsgruppe. Seine exzellenten und sich über viele Wissensgebiete erstreckenden Fachkenntnisse haben in erheblichem Maß zu der guten Positionierung unserer Arbeitsgruppe in der nationalen und internationalen Fachwelt beigetragen. Wir danken Herrn Dr. Volkwein in besonderer Weise für seine herausragende Arbeit am cbm sowie für die stets offene, hilfsbereite und dennoch auf höchstem wissenschaftlichem Niveau z.T. auch streitbare Zusammenarbeit.

Als neue Kollegen konnten wir 2013 folgende Mitarbeiter begrüßen: Nina Lillich, Csilla Bognar, Daniel Elner, Christoph Müller und Florian Hiemer.

Zu den Kernforschungsthemen der Arbeitsgruppe zählen der Werkstoff Stahl und dessen maßgebender Schädigungsmechanismus die Korrosion im Besonderen die Korrosion von Stahl im Beton. Ein zentrales Forschungsprojekt untersucht das Korrosionsverhalten von Stahl in Beton bei Anwendung des Instandsetzungsprinzips W-CI in gerissenem Beton. Dabei soll die Fragen beantwortet werden, unter welchen Randbedingungen das Instandsetzungsprinzip W-CI erfolgreich und dauerhaft angewendet werden kann. Neben der einfachen „blanken“ Bewehrung wird das Korrosionsschutzpotential von epoxidharzbeschichteter Bewehrung in Beton in einem weiteren Forschungsvorhaben untersucht. Hauptfaktoren für die Korrosionsschutzwirkung sind die etwaige Dichtigkeit der Beschichtung gegen einen anliegenden Elektrolyten (z.B. Beton) sowie die Anzahl und Größe herstellungs- bzw. baustellenbedingter Fehlstellen. Die bisherigen Ergebnisse sind sehr vielversprechend und deuten auf eine erhebliche Lebensdauererweiterung beim Einsatz von ECR im Vergleich zu unbeschichtetem Betonstahl hin. In Zusammenarbeit mit der Projektgruppe Bewehrungstechnik wird in einem Forschungsprojekt die Einwirkungskombination von dynamischer Beanspruchung bei parallel ablaufender Korrosion untersucht. Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Herleitung von prädikativen Modellen für das Versagen des Betonstahls von sowohl intakten als auch durch Bewehrungskorrosion geschädigten Betonstählen unter Zugschwellbeanspruchung.

In Kooperation mit dem CBMA, China Building Materials Academy, wird ein neues Forschungsprojekt unter der Leitung der Professoren YAO Yan und WANG Ling in der Arbeitsgruppe verankert. Der Titel des Projektes lautet „Research on the Transport behavior and Mechanism of Chloride Ions in Cement-based Materials under the Action of Multi-field Coupling“. Ziel des Projektes ist es, die Grundlagen für die Dauerhaftigkeitsmodellierung von Beton unter kombinierten Einwirkungen zu legen. Das Projekt läuft bis Ende 2018. Im August 2013 konnten wir bereits unsere Projektpartner, Professor YAO Yan, Professor WANG Ling und WANG Zhendi in unserem Institut begrüßen.

Im Bereich der Materialprüfung konnten das gewohnt hohe fachliche Niveau und die Servicequalität für die von uns überwachten Weiterverarbeiter von Betonstahl in Ringen sowie

Hersteller von Betonstahl, Betonstahlverbindungen, Spannstahl und alternativen Bewehrungen bei weiterem Ausbau des wirtschaftlichen Ergebnisses gehalten werden.

#### 7.1.4. AG 4 Chemie

Die Arbeitsgruppe 4 ist Ansprechpartner für alle chemischen Fragestellungen am cbm. Dabei liegt der Schwerpunkt bei der Analytik anorganischer nichtmetallischer Baustoffe, wie z. B. Betone, Zementmörtel, Zemente und Betonzusatzstoffe. Aber auch Kunststoffe und Bitumen werden in verschiedenen Fragestellungen untersucht. Dies geschieht im Rahmen von Fremdüberwachungen, als Auftragsanalytik für externe Auftraggeber oder zur Charakterisierung von Ausgangsstoffen oder Produkten im Rahmen von Forschungsvorhaben.

An verschiedenen Ringversuchen zum Thema Schwermetalle in Wasser und Abwasser, aber auch im Bereich der Flugaschen- und Zementanalytik konnten in diesem Jahr wieder erfolgreich teilgenommen werden.

Neben klassischen Analysemethoden wie Fotometrie, Titration, Ionenchromatografie, Infrarotspektrometrie, ICP-OES und ICP-MS haben wir inzwischen auch „exotischere“ Messmethoden wie die Festkörper-NMR-Spektroskopie oder Quasielastische Neutronenstreuung (QENS) etabliert. Während QENS momentan nur für spezielle Forschungszwecke eingesetzt wird, wird die NMR-Spektroskopie in vielen Forschungsprojekten am cbm als unterstützende Analysemethode eingesetzt.

Im letzten Jahr standen vor allem personelle Änderungen im Labor im Fokus. Nachdem uns Hannah Adebar nach erfolgreichem Abschluss ihrer Ausbildung wieder verlassen hat, konnten wir Varinia Ehrhardt als neue längerfristige Verstärkung für uns gewinnen. Auch sie absolvierte ihre Ausbildung zur Chemielaborantin an der TU München und schloss diese 2011 erfolgreich ab. Nach einem Intermezzo in der Radiochemie konnten wir sie nun für die Baustoffanalytik interessieren. Entsprechend dem jährlichen Rhythmus hat uns Herr Markus Koll nach Abschluss seines ersten Ausbildungsjahres im September Richtung Chemie-department in Garching verlassen. An seiner Stelle begann nun Frau Vivienne Burkhard ihre Ausbildung bei uns. Zusätzlich nutzten mehrere Schüler bzw. Ausbildungsanwärter ein einwöchiges Praktikum im Rahmen der Berufsvorbereitung, um Einblick in den Betrieb eines Chemielabors und den damit verbundenen Aufgaben des Chemielaboranten zu erhalten.

Intensiv gearbeitet wurde am LA-ICP-MS. Inzwischen konnten verschiedene Projekte mit Hilfe der Laserablation erfolgreich bearbeitet werden. Auch ist das Interesse der Studenten sehr hoch. So beschäftigten sich 2013 drei Studenten im Rahmen ihrer Masterarbeiten mit dem Analysensystem, wobei eine Masterarbeit über eine Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Energiesysteme entstanden und bereits abgeschlossen ist (siehe Masterarbeiten).

Die Lehre umfasste im Sommersemester wieder den Teil chemische Analytik der „Prüftechnik und Praktikum“-Vorlesung für die Baustoffingenieurvertiefer bzw. Masterstudenten und im Wintersemester die „Bauchemie“ zur BaustoffkundeVorlesung des Studiengangs „Bachelor Bauingenieurwesen“. Beim Bauingenieur-Praktikum im Sommersemester übernahm Herr Gutberlet den Teil „Kunststoffe“.

### 7.1.5. AG 5 Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine

Die Arbeitsgruppe 5 „Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine“ (AG 5) gliedert sich in die Fachgruppen „Asphalt“ (Leitung Dr.-Ing. Th. Wörner), „Bitumen und Abdichtungen“ (Leitung Dr.-Ing. B. Wallner) und „Gesteine“ (Leitung Dipl.-Geol. Dr. E. Westiner). Die Arbeitsbereiche der einzelnen Fachgruppen laufen unter dem Dach der nach RAP-Stra anerkannten Prüfstelle zusammen. In der AG 5 werden, wie in den Fachgruppen die Themenfelder Lehre, Forschung und Materialprüfung bearbeitet.

Die Kerntätigkeitsbereiche der AG 5 sind seit 2013 über das MPA BAU der TU München als Zertifizierungsstelle nach DIN EN 45011 akkreditiert und durch das DIBt unter der Kennnummer 1211 im Rahmen der EU-Bauproduktenverordnung in Brüssel notifiziert. Unter dem Schlagwort „EU-Bauproduktenverordnung“ wurde für die Vertragskunden der AG 5, unterstützt durch einen externen Referenten der Obersten Bayerischen Baubehörde, eine umfangreiche Informationsveranstaltung durchgeführt.

In der Fachgruppe „Asphalt“ werden Kontrollprüfungen und Schiedsuntersuchungen an Asphaltmischgut und Bohrkernen sowie die Beurteilung von Schadensfällen durchgeführt. Darüber hinaus beschäftigt sich die Fachgruppe mit Asphalten für Sonderanwendungen, wie z.B. Wasserbauasphalten und mit der Überwachung von Sonderbaumaßnahmen. Auf dem Gebiet der Griffigkeit werden Aufträge mit dem Griffigkeitsprognoseverfahren Wehner/Schulze (PWS) bearbeitet. In dieser Fachgruppe werden auch Erstprüfungen an Asphalt erstellt.

Im abgelaufenen Jahr wurde die Fachgruppe Asphalt vom Deutschen Asphaltverband mit Untersuchungen zur Dichtigkeit von Ausbauproben aus dem Nahtbereich der Sohlabdichtung einer Deponie beauftragt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen zur Zulassung von Asphalt im Deponiebau beitragen. Es zeigte sich, dass die Proben auch bei niederen Temperaturen und hohen Drücken dicht sind.

In der Fachgruppe „Bitumen und Abdichtungen“ erfolgt die Prüfung von Bitumen, polymermodifizierten Bitumen und Bitumenemulsionen. Im Bereich der Abdichtungen werden Polymerbitumen- und Bitumendach- und Dichtungsbahnen, sowie kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen und bitumenhaltige Fugenmassen untersucht. Der Umfang der durchführbaren Prüfungen geht aufgrund der Kompetenz der Laboranten und der vorhandenen Laborausstattung sowie der gesammelten Erfahrungen weit über das übliche Maß hinaus.

Im abgelaufenen Jahr stellten in der Fachgruppe Bitumen und Abdichtungen die vom Bundesverkehrsminister im Rahmen des ARS 11/2012 geforderten „Bindemittelprüfungen im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit“ den absoluten Tätigkeitsschwerpunkt dar. Um den enormen Auftragsbestand zu bewältigen, wurde die Personalstärke sowohl im Labor als auch bei der Sachbearbeitung erhöht, sowie der Gerätebestand erweitert und aktualisiert. Somit sind der außergewöhnlich umfangreichen Projektbearbeitung nur noch durch die absolut ausgereizten Raumkapazitäten Grenzen gesetzt.

Weiter wurden zu den im ARS 11/2012 geforderten rheologischen Bindemittelprüfungen umfangreiche Schulungen für externe Laboranten durchgeführt.

Auch der FGSV-Workshop „Dynamisches Scherrheometer“ in Köln wurde aktiv durch den Beitrag „Bestimmung des komplexen Moduls  $G^*$  und des Phasenwinkels“ mitgestaltet. In der Fachgruppe „Gesteine“ erfolgt neben der Beurteilung von Gewinnungsstätten und Aufbereitungsanlagen der Steine- und Erden-Industrie die Durchführung von Überwachungs- und Zertifizierungsmaßnahmen von Gesteinskörnungen für Beton, Asphalt, ungebundenen Schichten, Gleisschotter und Wasserbausteinen, die Qualitätssicherung von Baustoffgemischen für den Straßen- und Bahnbau (Eignungsnachweis, Fremdüberwachung,) und die Überwachung von Recycling-Baustoffen aus bayerischer Produktion. In dieser Fachgruppe werden zudem Eignungsprüfungen an Baustoffgemischen für Schichten mit hydraulischem Bindemittel und teer-/pechhaltigen Ausbaustoffen durchgeführt. In einem Sonderprogramm untersuchte die Fachgruppe Schichten ohne Bindemittel auf ihre Wasserdurchlässigkeit in situ und Frostempfindlichkeit im Labor. Mit den Versuchen sollte eine Möglichkeit geschaffen werden, die Begrenzung des Anteils an Feinanteilen in diesen Gemischen neu zu fassen.

Die AG 5 ist für Auftraggeber aus dem Bereich der Verwaltung und der Industrie tätig. Die Fachgruppen nehmen regelmäßig an Ringversuchen auf nationaler und europäischer Ebene teil, erhalten sich dadurch Kompetenzen mit konventionellen Prüfungen und Prüfverfahren der neuesten Generation und sichern sich nicht zuletzt hierdurch hinsichtlich der sachgerechten Durchführung der Prüfungen ab.

Im Berichtszeitraum wurde an folgenden Ring-/Vergleichsversuchen mitgearbeitet:

- Vergleichsversuche bayerischer Prüfstellen zu den neuen im ARS 11/2012 geforderten Bindemittelprüfungen
- Arbit-Ringanalyse für konventionelle und gebrauchsvorhaltensorientierte Prüfverfahren an Bitumen und Polymermodifizierten Bitumen (2013)

Die Ausbildung der Baustoffprüfer am Institut wird durch die AG 5 organisiert und maßgeblich abgewickelt. Im ersten Halbjahr 2013 schlossen Julian Hörbrand (verkürzt), Alexander Gabor und Markus Ullmann Ihre Ausbildung erfolgreich ab. Alle drei frischgebackenen Baustoffprüfer konnten in die AG 5 übernommen werden. Im zweiten Halbjahr 2013 sind Laura Böttl, Tatjana Frey und Alexandra Lindl in die Ausbildung gestartet.

#### **7.1.6. AG 6 Zerstörungsfreie Prüfung**

Die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) gewinnt in den letzten Jahren in allen Bereichen der Materialprüfung an Bedeutung. Traditionell ist die ZfP ein wichtiges Hilfsmittel in der Forschung, z. B. bei der Entwicklung von neuen Werkstoffen oder bei der Analyse des Werkstoffverhaltens oder der Schädigung von Bauteilen. Jedoch nimmt die Zahl an Anwendungen zu, die nicht der Grundlagenforschung sondern eher kommerziellen Bereichen zuzuordnen sind. Haupteinsatzbereiche sind dabei die Prüfung bzw. Inspektion von Bauteilen, Werkstoffen, Anlagen und Bauwerken, die Qualitätssicherung z. B. in der Produktion, die Überwachung in der Betriebsphase oder die Erhaltung von Anlagen und Bauwerken. Insbesondere in diesem letzten Bereich steigt die Nachfrage nach geeigneten Verfahren und qualifizierten Spezialisten, wie in gleicherweise das Alter von Anlagen und Bauwerken zunimmt. Ein weiterer Schwerpunkt der AG6 ist die Entwicklung bzw. Verbesserung geeigneter Zerstörungsfreier Prüfverfahren von Faserverbundwerkstoffen. In der Luft- und Raumfahrt sowie im Automobilsektor stieg der Marktanteil von Faserverbundwerkstoffen in den letzten Jahren enorm, was zu neuen Herausforderungen in der Qualitätssicherung und Kontrolle dieser Werkstoffe und Bauteile führt.

Die AG 6 beschäftigt sich mit allen Verfahren der ZfP, insbesondere aber mit Ultraschall, der Schallemissionsanalyse, Infrarot-Thermografie, Radar & Mikrowellentechnik, Wirbelstrom, induktiven und kapazitiven Verfahren, der Eigenschwingungs- und Modalanalyse, Impakt-Echo, Endoskopie und Radiologie. Entsprechende Geräte konnten mit Berufungsmitteln, Drittmitteln und über Gelder der Studienqualitätskommission angeschafft werden. Derzeit werden mehrere drittmittelbasierte Forschungsprojekte bearbeitet (siehe „Laufende Forschungsvorhaben“).

In 2013 eröffneten sich für den Lehrstuhl eine Reihe neuer Forschungsfelder. So wurde die Kooperation mit den Museen in München vertieft, vor allem den Pinakotheken und dem Deutschen Museum. Es wurden Projekte bearbeitet, in denen zerstörungsfreie Prüfmethoden bei der Überwachung und Schädigungsanalyse von Kunstgegenständen eingesetzt wurden. Auch die bestehende Kooperation mit Kollegen der Medizin aus dem Klinikum

Bild 1: Durchführung einer Schwingungsanalyse an einem Gemälde.



rechts der Isar wurde intensiviert (Klinik für Orthopädie und Sportorthopädie, Priv.-Doz. Burkhart). Die Analyse der Bruchprozesse am Oberschenkelknochen (Femur) und die Messung der Dicke von humanem Knorpelgewebe waren Forschungsziele. Neu ist die Kooperation mit dem Bundeskriminalamt (BKA), zu deren Herbsttagung ein Beitrag über die „forensische Archäologie“ beigesteuert werden konnte. Innerhalb der TU München ist der Lehrstuhl sehr gut vernetzt.

So existiert (neben den Kooperationen mit den Kollegen der beiden „eigenen“ Fakultäten BGU und Maschinenwesen) ein reger Austausch mit anderen Fakultäten wie dem Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft (Prof. Emmerling, Architektur), dem Fachgebiet Audio-Signalverarbeitung (Prof. Seeber, Elektrotechnik), der Holzforschung München (Prof. Van de Kuilen, Wissenschaftszentrum Weihenstephan) und mit dem IMETUM & Lehrstuhl für Biomedizinische Physik (Prof. Pfeiffer, Physik).

In 2013 konnte sich die Arbeitsgruppe mit der Technikerin Marina Nahn verstärken, während auf der anderen Seite die Wissenschaftliche Mitarbeiterin Frau Dipl.- Geophys. Dorothee Moser und der Arbeitsgruppenleiter Dr. Florian Stark aus der Arbeitsgruppe ausschieden.

Die Lehre im Bereich ZfP umfasste im Sommersemester einen Beitrag zum Praktikum Konstruktionswerkstoffe für den Bachelor „Bauingenieurwesen“. Im Rahmen des Bachelorstudiengangs „Ingenieurwissenschaften“ der Munich School of Engineering wurde der Ingenieurteil die Vorlesung Materialwissenschaften II betreut. Für Studierende Bau- und aus dem Maschinenwesen wurden in diesem Wintersemester Lehrveranstaltungen zur „Zerstörungsfreie Prüfung“ angeboten. Diese umfasste 3 SWS Vorlesung und 1 SWS Übung.

## 7.2 Abgeschlossene Forschungsvorhaben

### AG Bindemittel und Zusatzstoffe

#### 7.2.1. Carbonatisierung von zementgebundenen Baustoffen mit CO<sub>2</sub> unter erhöhtem Druck oder im überkritischen Zustand

Bearbeiter: Dipl.-Min. V. Leno  
Förderer: DFG

Die Carbonatisierung von Stahlbeton ist als nachteiliger Prozess bekannt, welcher unter Einwirkung von CO<sub>2</sub> aus der Luft zu einer Aufhebung der Passivierung und schlussendlich zu einer Korrosion der Stahlbewehrung führen kann. Andererseits kann eine stark beschleunigte Carbonatisierung unter gesteuerten Bedingungen bei z.B. der Herstellung von Betonfertigteilen eingesetzt werden, um gezielt die Porosität zu verringern und damit die Festigkeit bei gleichbleibendem Portlandzementklinkergehalt zu steigern. In diesem Forschungsvorhaben wurde Zementstein mit gasförmigem (100 % CO<sub>2</sub>, 5 bar), bzw. überkritischem CO<sub>2</sub> (150 bar) carbonatisiert, mit dem Ziel der Entwicklung eines neuartigen, festen und dichten Werkstoffes, der sowohl ökologisch als auch ökonomisch vielversprechend ist. Im ersten Förderungsabschnitt wurden Parameter wie Alkaligehalt, Ausgangsporosität (w/z-Wert) und -feuchte der Zementsteinproben sowie Behandlungsdruck und -dauer variiert. Zusätzlich wurde der Einfluss der Zusatzstoffe wie Hüttensand, Kalksteinmehl und Dolomitmehl auf den Carbonatisierungsvorgang und die Eigenschaften von carbonatisierten Zementsteinen untersucht.

Erwartungsgemäß führte die höhere Porosität (w/z-Wert) des Zementsteins, unabhängig von den Carbonatisierungsbedingungen, zu einer schnelleren Eindringung des CO<sub>2</sub> und damit zu einer schnelleren Carbonatisierung. Die Druckfestigkeitserhöhung (bezogen auf die Ausgangswerte) nahm mit sinkender Luftfeuchte der Vorlagerung und zunehmender Carbonatisierungstiefe zu. Die höchste Festigkeitssteigerung wurde nach einer Vorlagerung bei 35 % r.F. erzielt.

Die Verlängerung der Behandlung bei 150 bar und 50 °C von 4 auf 16 Stunden führte zu einer weiteren Erhöhung der Druckfestigkeit um bis zu ca. 50 %, wobei die Proben mit alkalireicherem Zement einen deutlich geringeren Festigkeitszuwachs zeigten. Auch nach einer zweitägigen Behandlung mit gasförmigem CO<sub>2</sub> bei 5 bar wirkte die höhere Alkalität des Zementes negativ auf den Festigkeitszuwachs.

Die Alkalität des Zementes hat einen eindeutigen Einfluss auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit von Zementstein- und Mörtelproben. Mit zunehmender Alkalität des Zementes steigt der pH-Wert der Porenlösung, was zu einer geringeren Carbonatisierungsgeschwindigkeit führt. Die Proben mit alkalireicherem Zement, bzw. mit Alkalidotierung, zeigten geringere Carbonatisierungstiefen und Festigkeitszuwächse nach der Behandlung mit überkritischem  $\text{CO}_2$ . Es konnte kein eindeutiger Einfluss der Zementalkalität ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0,56 \text{ M.-%}$  und  $1,02 \text{ M.-%}$ ) auf die Bildung von metastabilen  $\text{CaCO}_3$ -Phasen – Aragonit und Vaterit - festgestellt werden. Zusätze von Dolomitmehl und damit Mg führten ebenfalls zu keiner Begünstigung der Aragonitbildung und zu keinem nennenswerten Beitrag bei der Festigkeitserhöhung während der  $\text{scCO}_2$ -Behandlung.

Mittels Rasterelektronenmikroskopie wurde festgestellt, dass unhydratisierter Hüttensand während der  $\text{scCO}_2$ -Behandlung sich, im Gegensatz zu den silikatischen Klinkerphasen, nahezu inert verhält und dadurch keinen deutlich erkennbaren Beitrag zur Festigkeitsentwicklung leistet. In hüttensandhaltigen Zementsteinen wurde allerdings nach der Carbonatisierung, zusätzlich zu den üblichen Carbonatphasen, Mg- Calcit identifiziert. Diese Verbindung ist wahrscheinlich durch die Carbonatisierung von hydratisiertem Hüttensand (Hydrotalcit, MSH) entstanden.

Um den Einfluss des Calcits im Zement auf die Ausbildung des Gefüges während der Carbonatisierung zu untersuchen, wurden Mischungen von Portlandzementen mit 20 M. % und 40 M.-% Kalksteinmehl untersucht. Die Erwartung, dass die vorhandenen Calcitpartikel als Kristallisationskeime dienen und während der Carbonatisierung ein neuer Verbund zwischen diesen Partikeln entsteht, hat sich unter den gewählten Carbonatisierungsbedingungen nicht bestätigt.

Durch die Carbonatisierung des Zementsteins in überkritischem  $\text{CO}_2$  nimmt die Porosität deutlich ab, was teilweise auf die Erhöhung des Feststoffvolumens, aber auch auf das strukturbedingte Carbonatisierungsschwinden, zurückzuführen ist. Die Änderung der Probenvolumina ist von der Porosität des Zementsteins abhängig. Die Proben, die eine geringere Porosität ( $w/z = 0,5$ ) aufweisen und damit weniger Freiraum für die Kristallisation der  $\text{CaCO}_3$ -Phasen haben, dehnen sich während der Carbonatisierung. Dieses Quellverhalten ist auf die Bildung von Wasser als Reaktionsprodukt und eine daraus resultierende Feuchtedehnung zurückzuführen. Während der weiteren Lagerung in Normklima  $20 \text{ °C}/65 \text{ % r.F.}$  schwinden die Proben mit einer Verringerung der Länge bis unter das Ausgangsniveau, was auf die Strukturveränderung während der Carbonatisierung zurückzuführen ist. Die Proben mit einer höheren Porosität ( $w/z = 0,6$ ) kontrahieren schon während der Behandlung im überkritischen  $\text{CO}_2$ .

Es wurden Untersuchungen an Normmörteln und haufwerksporigen Mörteln mit Leichtzuschlag durchgeführt. Die Mörtelprismen, die nach DIN EN 960-1 hergestellt wurden, wurden vor der Carbonatisierung analog zu den Zementsteinproben vorgelagert ( $20 \text{ °C}$  und  $35 \text{ % r.F.}$ ). Die Leichtmörtelproben wurden nach einem Tag Feuchtlagerung ausgeschalt und dann direkt mit überkritischem  $\text{CO}_2$  behandelt. Die Haufwerksporosität ermöglichte einen schnellen Zutritt des  $\text{CO}_2$  in das Probeninnere, was zu einer vollständigen Carbonatisierung führte. Die Druckfestigkeiten der Normprismen nahmen um bis zu 140 % zu und lagen sogar um bis zu 22 % höher als die Normfestigkeit. Die Biegezugfestigkeiten der Proben zeigten eine geringe Abnahme. Ein ähnlicher Einfluss der Carbonatisierung auf die mechanischen Eigenschaften wurde auch bei den haufwerksporigen Leichtmörtelproben festgestellt. REM-Untersuchungen haben gezeigt, dass die Kontaktzone zwischen der Ge-

steinskörnung (Blähglas) und dem Zementstein nach dem Carbonatisierungsprozess dicht mit dem neugebildeten  $\text{CaCO}_3$  gefüllt ist.

Das Wissen über das Verhalten der Hydrate der Portlandzementklinkerphasen während der stark beschleunigten Carbonatisierung und danach unter Einsatzbedingungen ist entscheidend für die Entwicklung neuer carbonatisierter zementgebundener Werkstoffe. Anhand der bisherigen Forschungsergebnisse kann gefolgert werden, dass die positiven Effekte der Carbonatisierung u.a. von der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung des Klinkers abhängen.

### 7.2.2. Grundlagen für die Lebensdauerbemessung von Beton unter Sulfatangriff

Bearbeiter: Mag. rer. nat. W. Müllauer  
Förderer: DFG

Die Prüfung des Sulfatwiderstandes von Betonen - z.B. durch Dehnungsmessungen - vor allem bei hohen Sulfatkonzentrationen liefert bekanntlich nur unzureichende Hinweise auf das tatsächliche Verhalten der Betone im Einsatz. Ziel dieses Forschungsvorhabens war es insbesondere, den funktionalen Zusammenhang zwischen der Phasenentwicklung, der Dehnung und der Expansionsspannung beim Sulfatangriff auf Beton zu beschreiben, weil diese letztendlich zu der Zerstörung von Betonbauteilen führt bzw. führen kann.

Durch die Kombination von Röntgendiffraktometrie und  $^{27}\text{Al}$ - und  $^{29}\text{Si}$ -NMR-Spektroskopie war es möglich, neben Änderungen in den kristallinen Phasen auch Änderungen in den C-A-S-H-Phasen durch Sulfatangriff quantitativ zu erfassen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei Sulfatlagerung Ettringit aus vor allem AFm-Phasen bildet. Anders als bisher angenommen konnte erstmals nachgewiesen werden, dass Aluminium, das strukturell in Brückentetraeder-Positionen in C-A-S-H gebunden ist, bei Sulfatangriff mobilisiert werden und zu einer Ettringitbildung beitragen kann. Das wirkt sich vor allem auf die Interpretation des Sulfatwiderstandes aluminiumreicher Bindemittelmischungen, wie z.B. beim Einsatz von Flugasche, aus. Die Sulfatkonzentration der Lagerungslösung und die Lagerungstemperatur beeinflussen die Stärke des Sulfatangriffs maßgeblich. Mit steigender Sulfatkonzentration nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung durch Sulfatangriff zu. Bei in Laborprüfverfahren üblichen hohen Sulfatkonzentrationen kann es auch bei Zementen mit einem hohen Sulfatwiderstand durch die Bildung von eisenhaltigem Ettringit zu Schädigungen kommen, weil sehr hohe Übersättigungen der Porenlösung erreicht werden. Zudem tritt eine überproportionale Gipsbildung auf, die verstärkt Calcium aus den C-S-H-Phasen auslaugt.

Ein spezieller Versuchsaufbau wurde entwickelt, mit dem es möglich ist, die durch Kristallisationsdruck entstehenden Spannungen zu messen. Dabei konnte die Behinderung der Dehnung während des Sulfatangriffs gezielt variiert werden. Phasenänderungen und die Porosität wurden mit Röntgendiffraktometrie und Quecksilberdruckporosimetrie untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ursache der Dehnungen - und damit der Schädigung von Beton - im Aufbau von Kristallisationsdrücken durch die Bildung von Ettringit in kleinen Poren (ca. 10-100 nm) liegt. Übersteigen die durch den



Abbildung 1: Vergleich zwischen freier (oben) und behinderter Dehnung (unten) für Hohlzylinder nach 90 d in einer Sulfatlösung (30 g/L  $\text{SO}_4$ )

Kristallisationsdruck hervorgerufenen Spannungen die Zugfestigkeit der Bindemittelmatrix, dann kommt es zu einer ausgeprägten Dehnung, Rissbildung und Gefügeschädigung. Die treibende Kraft der Kristallisation ist die Übersättigung der Porenlösung. Die Bildung von Ettringit in großen Poren führt zu keinen Schäden, weil hier keine großen Kristallisationsdrücke erzeugt werden. Die Bildung von Gips bei hohen Sulfatkonzentrationen führt zu keinen zusätzlichen Spannungen, die freie Dehnung von schon geschädigten Proben wird aber durch die Gipsbildung in bereits gebildeten Rissen verstärkt.

Mit Hinblick auf die künftige Entwicklung eines besseren Prüfverfahrens für den Sulfatwiderstand des Betons bietet die Messung der Expansionsspannung eine vielversprechende Alternative zu den herkömmlichen Dehnungsmessungen, weil die Auswirkung des Kristallisationsdrucks und damit des primären Schädigungsmechanismus direkt quantifiziert wird. Es ist durchaus möglich, dass der Sulfatwiderstand bei praxisnahen Sulfatkonzentrationen geprüft werden könnte, oder zeitraffend bei hohen Konzentrationen, weil die Auswirkung der Gipsbildung durch Zwängung unterdrückt wird. Dies soll im Rahmen eines geplanten Forschungsvorhabens näher untersucht werden.

## AG Betontechnologie

### 7.2.3. Akustische Optimierung von Betonoberflächen durch Texturierung des Festbetons mit verbesserten Grinding-Verfahren

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Jens Skarabis  
Förderer: BMVBS / bast

Beim Grinding (Schleifen) von Betonfahrbahndecken wird eine rotierende Welle, auf der sich Schleifscheiben befinden, über die Oberfläche geführt. Am äußeren Rand der Schleifscheiben befinden sich die diamantbesetzten Schleifsegmente, deren Dicke 2,8 bzw. 3,2 mm beträgt. Sie bestimmen dabei die Rillenbreite der Grindingtextur. Der Abstand der Schleifscheiben zueinander wird über die Breite der zwischen ihnen angeordneten Distanzscheiben bestimmt. Abb. 1 zeigt eine mit Schleif- und Distanzscheiben besetzte Grindingwelle.

Über den Abstand der Schleifscheiben zueinander wird die Breite der an der Oberfläche entstehenden Stege bestimmt. Abb. 2 zeigt die Nahaufnahme einer Grindingtextur.

Abb. 1, li.: Grindingwelle (Breite: 1,20 m)

Abb. 2, re.: Nahaufnahme einer Grindingtextur mit Stegen und Rillen



Das Grindingverfahren wird seit Jahren erfolgreich eingesetzt, um bestehende Betonoberflächen mit einer neuen Texturierung zu versehen. Griffigkeits- und Ebenheitsprobleme der Oberfläche werden damit erfolgreich beseitigt. Als positiver Nebeneffekt konnte dabei festgestellt werden, dass die Grindingoberfläche auch geräuschkindernd wirken kann. Ziel des Vorhabens war, den Einfluss verschiedener Parameter auf die Geräuschemission von Betonfahrbahndecken mit Grindingtextur zu untersuchen.

Für die Laborversuche wurde im ersten Schritt ein Laborgrindinggerät entwickelt, mit dem praxisübliche Schleif- und Distanzscheiben verwendet werden können. Mit dem Laborgrindinggerät lassen sich kleinformatige Betonprobekörper texturieren, was eine Variation zahlreicher Parameter, wie z. B. dem Abstand der Schleifscheiben zueinander problemlos ermöglicht. Abb. 3 zeigt die für das Vorhaben entwickelte Laborgrindingmaschine.



Abb. 3: Laborgrindingmaschine

In den Laborversuchen wurden in der ersten Versuchsreihe Grindingtexturen an Mörtelprobekörpern erzeugt. Dabei wurden die Segmentbreiten und Distanzscheibenbreiten variiert. Diese Untersuchungen wurden an Mörtelprobekörpern durchgeführt, um den Einfluss grober Gesteinskörnung auf die Gestalt der Grindingtextur auszuschließen. Abb. 4 zeigt die Oberflächen der Mörtelprobekörper bei variierender Distanzscheibenbreite. Die Dicke des Schleifsegments betrug bei allen Oberflächen 3,2 mm.

Im Anschluss wurden die Textureigenschaften, wie die Texturtiefe und der texturinduzierte Strömungswiderstand, bestimmt. Beim Projektpartner Müller-BBM wurden auf Grundlage der Textureigenschaften akustische Simulationsrechnungen durchgeführt, um die zu erwartende Geräuschemission zu berechnen. Abb. 5 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnungen für die in Abb. 4 dargestellte Variation.

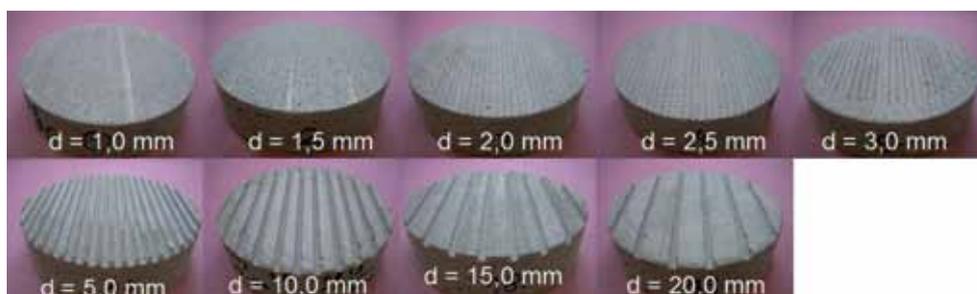
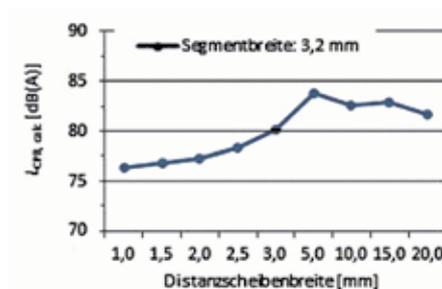


Abb. 4: Oberfläche der Mörtelprobekörper bei Variation der Distanzscheibenbreite

Abb. 5: Berechnete Geräuschemission bei Variation der Distanzscheibenbreite



Bei sehr geringen Distanzscheibenbreiten von 1,0 mm bis 2,0 mm wurde der Mörtel unabhängig von der gewählten Segmentbreite gleichmäßig abgeschliffen. Der Mörtel zwischen den Segmenten ist vom Schleifvorgang unmittelbar betroffen und wird ebenfalls gleichmäßig abgetragen, so dass als Folge Stege mit nur geringer Höhe und einer sehr homogenen Geometrie entstehen. Aufgrund der geringen Texturausprägung wurden bei diesen Texturen hohe Strömungswiderstände gemessen. Dies reduziert den aerodynamischen Anteil der Geräuschemission und hat folglich einen positiven Einfluss auf die Geräuschemission. Bei Distanzscheibenbreiten zwischen 3,0 mm und 5,0 mm wurde weniger Mörtel zwischen den Segmenten abgetragen. Als Folge verblieben an der Oberfläche Stege, die teilweise brachen und so zu einem inhomogenen Texturbild führten. Dieses Bruchbild erhöht die Vibration des Reifens und somit die Geräuschemission der Oberfläche. Bei Distanzscheibenbreiten von  $d \geq 5,0$  mm wurde der Mörtel zwischen den Segmenten nicht mehr abgeschliffen. Trotz der homogenen Textur bei  $d=5$  mm war hier die Geräuschemission am höchsten, was auf einen sehr hohen aerodynamischen Anteil infolge eines sehr geringen Strömungswiderstands zurückzuführen ist. Bei Distanzscheibenbreiten von mehr als 5 mm sinkt nimmt die Geräuschemission erneut ab, da der Strömungswiderstand wieder ansteigt.

In der zweiten Versuchsreihe wurden drei verschiedene Betone hergestellt, die als Praxisoberbetone eingesetzt werden können. Die Betone wurden mit ausgewählten Kombinationen aus Segmentbreiten und Distanzscheibenbreiten texturiert und anschließend wurde auf Grundlage der Textureigenschaften die zu erwartende Geräuschemission berechnet. Unabhängig vom Beton waren die Texturen bei geringen Distanzscheibenbreiten von bis zu 2 mm vergleichbar. Daraus resultierten ebenfalls vergleichbare Geräuschemissionen. Mit zunehmender Distanzscheibenbreite erhöhte sich der Einfluss des Betons. Abb. 6 zeigt die Oberfläche der Betone 1 und 2, die beide mit identischem Wellenbesatz (Segmentbreite

Abb. 6: Grindingtextur der Betone 1 (links) und 2 (rechts); Wellenbesatz beim Grinding beider Betone: Segmentbreite 3,2 mm, Distanzscheibenbreite: 5,0 mm



3,2 mm, Distanzscheibenbreite: 5,0 mm) texturiert wurden. Beton 1 zeigt dabei unkontrolliert gebrochene Stege, wohingegen Beton 2 ausgeprägte, homogene Stege aufweist. Ursache für diesen Unterschied ist die um  $12 \text{ N/mm}^2$  geringere Druckfestigkeit des Betons 1. Eine geringere Festigkeit führt zu einem früheren Brechen der Stege während des Schleifvorgangs.

Die Laborversuche zeigen, dass der Wellenbesatz wie auch die Eigenschaften des Betons einen signifikanten Einfluss auf die Texturgeometrie und somit auf die Lärminderungseigenschaften von Grindingoberflächen haben können. In einem aktuellen Forschungsvorhaben ist nun zu klären, wie dauerhaft lärmindernde Grindingtexturen sind. Dabei ist auch stets eine ausreichende Griffigkeit der Oberfläche sicherzustellen. Des Weiteren werden Betone entwickelt, die hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und der Dauerhaftigkeit besonders geeignet sind, um Grindingtexturen auch bei Neubaustrecken zum Einsatz kommen zu lassen.

## AG Stahl und Korrosion

### 7.2.4. Machbarkeitsstudie zur Evaluierung und Kalibrierung der neuen DAfStb Instandhaltungsrichtlinie Teil 1

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Stefanie von Greve-Dierfeld

Förderer: DAfStb

Für das Gebiet des Schutzes, der Instandsetzung und Verstärkung von Betonbauteilen wurden im Zuge der europäischen Harmonisierung die Normen der Reihe EN 1504 entwickelt. Die Teile 8, 9 und 10 (Planung, Ausführung, Qualitätsüberwachung) bleiben dabei jedoch von der Harmonisierung ausgeschlossen. Das bedeutet, für Planung und Ausführung bleibt in Deutschland weiterhin die Instandsetzungsrichtlinie des DAfStb als Technische Baubestimmung eingeführt.

Um die 2001 veröffentlichte Instandsetzungsrichtlinie an die aktuellen Regelungen (z.B. Instandhaltungsprinzipien und -verfahren nach EN 1504-9) und Entwicklungen im Betonbau anzupassen, befindet sich diese derzeit in Überarbeitung. Dabei erfährt sie eine wesentliche inhaltliche Erweiterung. In der überarbeiteten Richtlinie soll nun die gesamte Nutzungsdauer (Neubau) bzw. Restnutzungsdauer (Bestand) und damit die Instandhaltung im Vordergrund stehen. Rahmenbedingung der Instandhaltungsplanung ist, über die gesamte Nutzungsdauer einen zuvor unter Gebrauchssicherheits- und Tragsicherheitsgesichtspunkten (d.h. zuverlässigkeitsbasiert) definierten Mindestsollzustand zu keinem Zeitpunkt zu unterschreiten. Die Instandsetzung als ein singuläres Ereignis ist hierin nur noch ein Aspekt neben den Bereichen Inspektion, Wartung und Verbesserung / Ertüchtigung, welche, gewählt unter ökonomischen Gesichtspunkten, singulär oder in Intervallen im Rahmen eines Instandhaltungskonzepts durchgeführt werden. Namentlich wird diese Neuausrichtung bzw. Erweiterung durch die Umbenennung in „Instandhaltungsrichtlinie“ deutlich gemacht.

Der Planer nach neuer Instandhaltungsrichtlinie muss im Rahmen der Ist-Zustandsfeststellung die relevanten Materialeigenschaften/-widerstände und ggf. deren zeitliche Entwicklung, die relevanten Geometrien (Bauteilwiderstände) sowie heutige und zukünftige zu erwartende Einwirkungen identifizieren. Der Planer muss über geeignete Werkzeuge verfügen, die es ihm erlauben, auf Basis der Ist-Zustandsfeststellung den weiteren Zustandsverlauf vorherzusagen, um einen zukünftigen Schaden und sein ungefähres Ausmaß vorherzusehen. Ein „Schaden“ ist dabei nicht zwangsläufig mit einem Tragwerksversagen gleichzusetzen. Vielmehr stellt ein Schaden die Unterschreitung eines festgelegten Mindest-Sollzustandes dar. Wird eine Instandsetzung erforderlich, muss der Planer in Abhängigkeit des Instandsetzungsziels aus mehreren Prinzipien und Verfahren ein für den spezifischen Anwendungsfall sinnvolles Prinzip auswählen und sinnvolle Verfahren zusammenstellen.

Teil der Planung ist auch, Material und Geometrie unter der vorhergesagten Einwirkung so aufeinander abzustimmen, dass die planmäßige Restnutzungsdauer nach der Instandsetzungsmaßnahme sichergestellt wird. Die planmäßige Restnutzungsdauer nach der Instandsetzungsmaßnahme muss dabei nicht zwangsläufig mit der planmäßigen Restnutzungsdauer des Bauteils übereinstimmen. Vielmehr verfolgt die Planung das Ziel, die Instandhaltungskomponenten ein- oder mehrfache Instandsetzung, Wartung, Inspektion und ggf. Verbesserung so zu kombinieren, dass die planmäßige Restnutzungsdauer des Bauteils unter den gegebenen Randbedingung und unter Beachtung wirtschaftlicher Aspekte so optimal wie möglich sichergestellt werden kann.

Diese so erweiterte Planungsleistung ist wesentlich komplexer als die bisher nach Instandsetzungsrichtlinie geforderte. Zur Überprüfung der Machbarkeit, insbesondere zur Überprüfung der Richtigkeit, der Vollständigkeit und der Zweckmäßigkeit der Änderungen wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Studie durchgeführt, mit dem Ziel, eventuelle Schwächen der Neuregelungen zu identifizieren und qualifizierte Verbesserungsvorschläge abzuleiten.

Insgesamt sechs verschiedene, real durchgeführte Instandsetzungen an sechs verschiedenen Objekten wurden im Rahmen der Machbarkeitsstudien nach neuer Richtlinie (Stand vom 18.01.1012) erneut geplant und den alten Planungen gegenübergestellt. Im Rahmen der Neuplanungen und anschließenden Gegenüberstellung wurden unvollständige Angaben, Widersprüche, Ungenauigkeiten und / oder Überreglementierungen (Defizite) der neuen, in Bearbeitung befindlichen Instandhaltungsrichtlinie identifiziert und zusammengestellt.

Auf Grundlage dieser Auswertung wurden, falls notwendig, konkrete Verbesserungsvorschläge für entsprechend relevante Textpassagen der neuen Instandhaltungsrichtlinie erarbeitet.

## **AG Chemie mit Bindemittel und Zusatzstoffe**

### **7.2.5. Eindringen von NaCl in Beton und Auslaugung von umweltrelevanten Stoffen II**

Förderer: VDZ, Verein Deutscher Zementwerke

#### **Einleitung**

Das Eindringen von Tausalz in Betonbauteilen beeinflusst maßgebend die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen und liefert auch Alkalien, die zu einer schädigenden AKR führen können. Das Gleichgewicht zwischen den Hydratationsphasen und der Porenlösung des Betons wird gestört. Dadurch können Schwermetalle in die Porenlösung eintreten und mittels Diffusion die Betonoberfläche erreichen. Chlorideindringprofile in Beton werden i.d.R. mittels chemischer Analyse von Bohrmehlproben bestimmt. Die Auslaugung von Spurenelementen wird indirekt über die Analyse der Lagerungslösung entsprechender Probekörper ermittelt. Die LA-ICP-MS (Laser Ablation - Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry) bietet die Möglichkeit, Verteilungen von sowohl den Hauptelementen (Ca, Si, Al, Fe, K, Na, S) wie auch den Spurenelementen wie Cr, V, Zn in Beton gleichzeitig aufzunehmen. Bei der Laserablation wird Material mit einem energiereichen Laser punktförmig (bis 4 µm) auf einer Messlinie entlang aus der Oberfläche ablatiert und zur Analyse mit einem Trägergas in ein Massenspektrometer transportiert.

Ziel der Arbeit war es, die Eignung der LA-ICP-MS zur Bestimmung von Verteilungen von Na und Cl und Spurenelementen in zementgebunden Baustoffen in Kontakt mit NaCl-Lösung zu prüfen. Nachdem im ersten Teil dieser Untersuchungen Zementsteine aus CEM I nach

28 d Lagerung untersucht worden sind, lagerten die Proben im zweiten Teil, über den hier berichtet wird, 90 d. Zusätzlich wurden Probekörper mit einem CEM II B/S 42,5 untersucht. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf dem Versuch, die Ortsauflösung zu verbessern.

### Untersuchungen

Prismen ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ) aus Zementstein mit einem w/z-Wert von 0,5 wurden aus CEM I 42,5 R bzw. CEM II B/S 42,5 hergestellt. Nach dem Ausschalen wurden die Prismen unter Luftabschluss in einer Folie bei  $20^\circ\text{C}$  bis zum Alter von 28 d hydratisiert. Anschließend wurden die Probekörper 28 d in entweder entionisiertem Wasser oder einer 10%igen NaCl-Lösung bei  $20^\circ\text{C}$  gelagert. Dabei wurde jeweils zwei Probekörper in 17,3 Liter Lösung bzw. Wasser gelagert. Zum Vergleich wurden Parallelproben weiter in einer Folie gelagert. Nach 28 d wurden die Prismen aus den Lösungen genommen und jeweils eine 2 cm dicke Scheibe aus dem mittleren Bereich der Prismen trocken herausgeschnitten. Die chemische Zusammensetzung der Lösungen wurde mit ICP-OES analysiert. Mit LA-ICP-MS wurden Verteilungen von Elementen über die Schnittfläche der Scheiben bestimmt. Daten von jeweils zwei parallelen Messlinien mit einem Abstand von 0,5 mm wurden über die Gesamtbreite der Scheiben aufgenommen (Teil I). Anschließend wurden die Lösungen erneuert und die Lagerung der verbleibenden Prismen bis insgesamt 90 d fortgesetzt und wieder nach dem gleichen Schema untersucht.

### Ergebnisse und Diskussion

Bild 1 zeigt die Oberfläche einer Zementsteinprobe nach der Ablation (abgebildete Fläche ca.  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ). Die glatte Oberfläche und die gleichmäßige Ablationsrinne weisen auf gute Ablationsbedingungen hin.

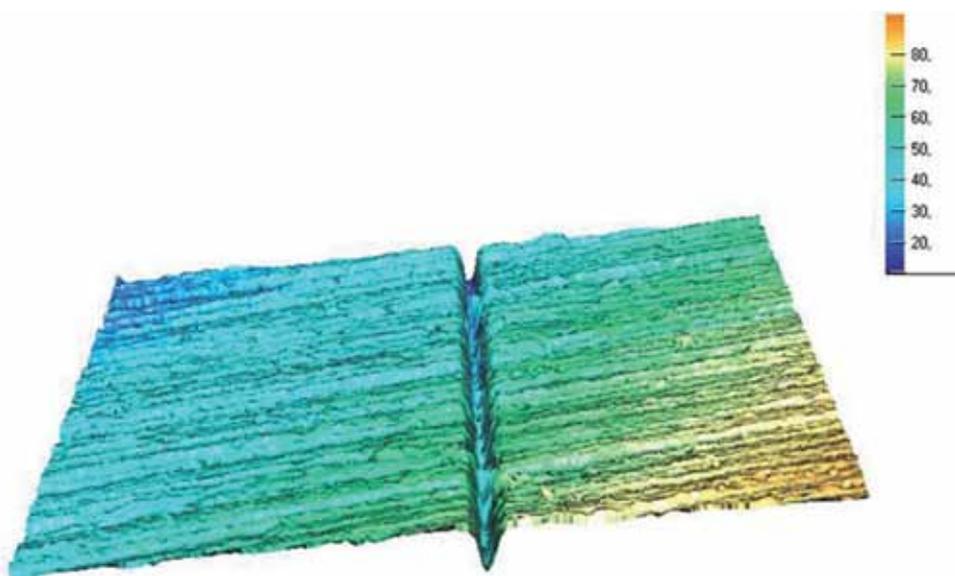


Bild 1: Oberfläche einer Zementsteinprobe nach der Ablation

Bild 2: Verteilung von K, Na und Cl in Zementstein mit CEM I nach 90 d in 10%iger NaCl-Lösung

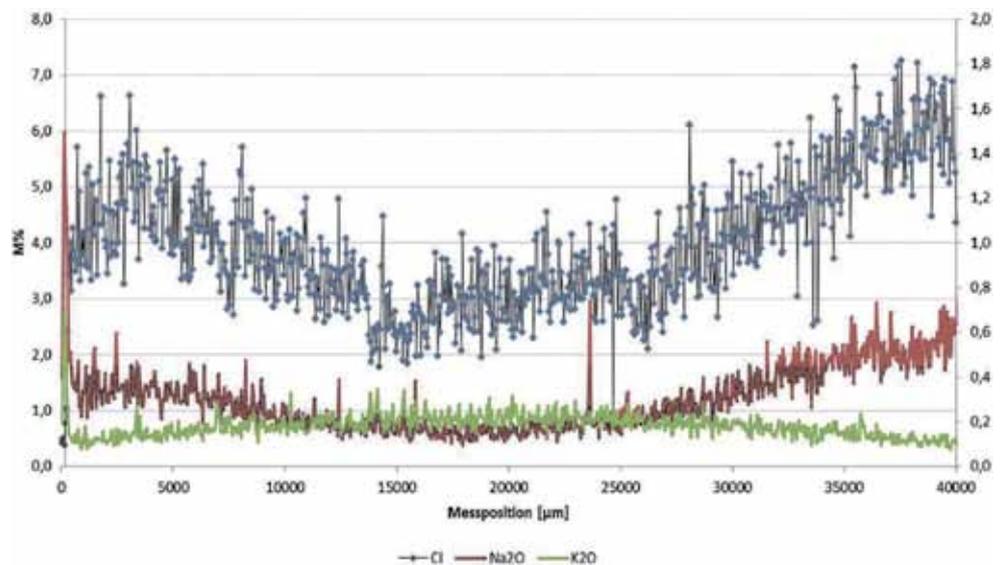
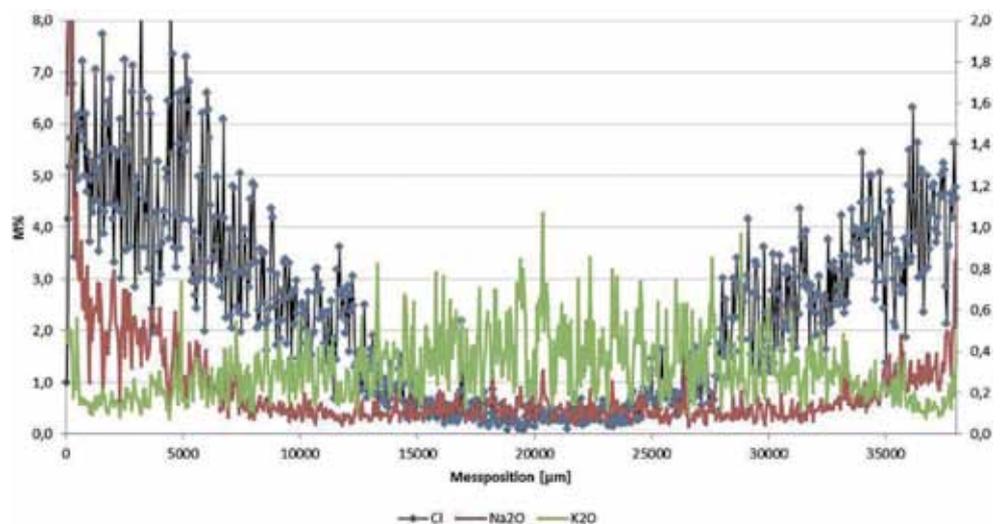


Bild 2 zeigt das Tiefenprofil der Zementsteinprobe mit CEM I nach 90 d Lagerung in 10%iger NaCl-Lösung. Deutlich zu erkennen ist, dass Cl nach 90 d den Zementsteinprobekörper komplett durchdrungen hat. Auch die Auslaugung von K und das Eindringen von Na ist bis in die Mitte des Probekörpers messbar, jedoch nicht so deutlich ausgeprägt wie beim Cl.

Im Vergleich hierzu ist der Ionentransport im Zementstein mit CEM II B/S deutlich langsamer (Bild 3). So hat hier das Cl die Innenbereich des Probekörpers noch nicht erreicht. Die Eindringtiefe liegt bei etwa 1,5 cm. Deutlich zu erkennen ist die geringere Eindringtiefe des Na, dessen Gehalt nur bis zu einer Tiefe von ca. 0,8 cm erhöht ist. Entsprechendes gilt für die Auslaugung des K.

Bild 3: Verteilung von K, Na und Cl in Zementstein mit CEM II B/S nach 90 d in 10%iger NaCl-Lösung



Die Ablationseinstellungen wurden zu Gunsten einer besseren Ortsauflösung so geändert, dass die Vorschubgeschwindigkeit abgesenkt und entsprechend die Laserenergie ange-

passt wurde. Dadurch wurde die Ortsauflösung von 300 µm auf 50 µm gesenkt. Durch die verbesserte Ortsauflösung wird die Messung deutlich empfindlicher für Oberflächeneffekte und es führt zu einer stärkeren Abbildung der Mikroheterogenität (vgl. Bild 4). Hier gilt es, die Messeinstellungen weiter zu verbessern bzw. die Datenauswertung zu überdenken.

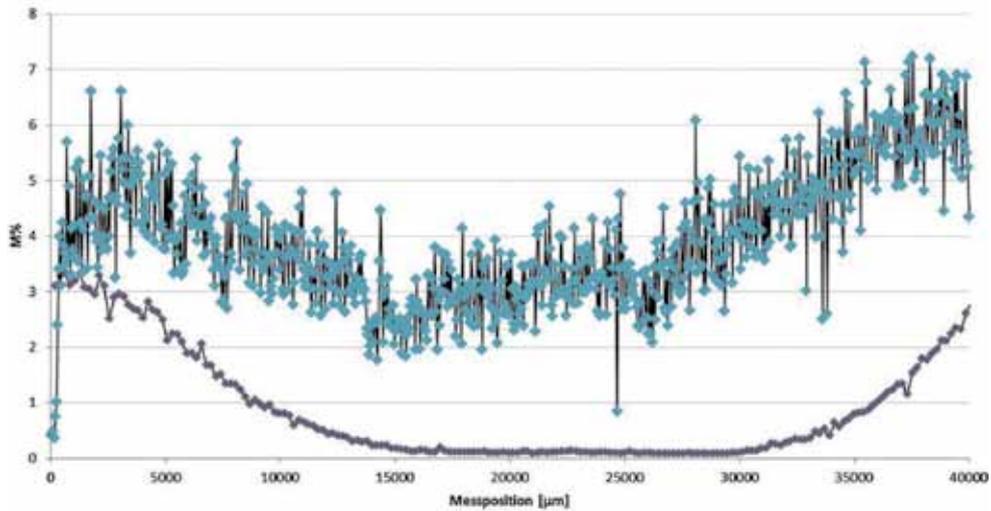


Bild 4: Vergleich Cl in Zementstein mit CEM I in 10%iger NaCl nach 28 d (violett) und 90 d (blau)

Die Hinweise auf die Auslaugung von Cr haben sich an den 90 d gelagerten Proben nicht bestätigt (Bild 5). Dabei waren die neuen Messeinstellungen für die Auswertung eher hinderlich. Auch die Probekörper mit CEM II B/S zeigten bei den Schwermetallen Cr, Zn und V keine messbaren Auslaugerscheinungen.

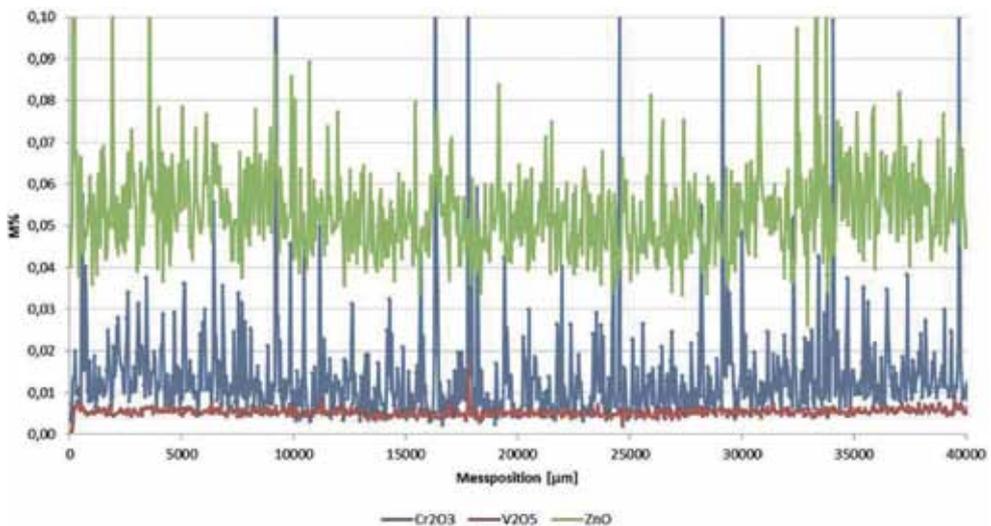


Bild 5: Verteilungen von Cr, V und Zn in Zementstein mit CEM I nach 90 d in 10%iger NaCl-Lösung

### Zusammenfassung

Das Messverfahren LA-ICP-MS ist in der Lage, Eindringprofile von Na und Cl (in M.-%) in zementgebundenen Baustoffen nach der Beaufschlagung mit einer Tausalzlösung reproduzierbar und zuverlässig aufzunehmen. Gleichzeitig können Verteilungen der Hauptelemente (Ca, Si, Al, K, Na, S) und der Spurenelemente erfasst werden.

Es konnte gezeigt werden, dass die Probekörper mit CEM I nach 90 d vollständig von Cl und Na durchdrungen waren. Bei Verwendung eines CEM II B/S war die Diffusion deutlich langsamer und die Eindringung von Cl und Na nach 90 d erst in dem Bereich, den es bei den CEM I Proben schon nach 28 d erreicht hatte.

Geänderte Messeinstellungen führten zwar zu einer verbesserten Ortsauflösung, aber auch zu einer verstärkten Abbildung der Mikroheterogenität.

### **AG Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine**

#### **7.2.6. Auswertung der Griffigkeitsdaten aus der laufenden Straßenzustandserfassung – Erweiterung des bisherigen Erfahrungshintergrundes im Hinblick auf den Widerstand gegen Polieren von feinen Gesteinskörnungen**

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Thomas Patzak

Förderer: Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr

In die Auswertung der Griffigkeitsmessdaten wurden Abschnitte im Straßennetz, deren Griffigkeitsniveaus oberhalb des Schwellenwertes lagen und bei denen demzufolge bauliche Maßnahmen zu ergreifen sind, einbezogen. Da die Betrachtung von einzelnen 100 m - Auswerteabschnitten häufig von singulären Ereignissen geprägt ist (Steigung, Kurvenbereich, Einmündung) wurden nur Strecken in die Auswertung genommen, bei denen mindestens zwei zusammenhängende 100 m - Auswerteabschnitte mit Zustandswerten oberhalb des Schwellenwertes zu verzeichnen waren.

Es konnte festgestellt werden, dass Griffigkeitsprobleme erst mit zunehmendem und hohem Deckenalter auftreten. Die in den letzten Jahren im Regelwerk verankerten Anforderungen bzw. in den Bekanntmachungen der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren formulierten Änderungen und Ergänzungen an die Griffigkeit und an die Eigenschaften des Asphaltes und seiner Komponenten haben zu einer Erhöhung des allgemeinen Griffigkeitsniveaus beigetragen.

An Ausbauproben der ausgewählten Strecken wurden die Griffigkeitsentwicklung nach dem Verfahren Wehner/Schulze und die asphalttechnologischen Eigenschaften (Mischgutzusammensetzung, Hohlraumgehalte, Polierwerte der rückgewonnenen Gesteinskörnungen) bestimmt.

Wie die Untersuchungsergebnisse zeigen, können ungünstige Griffigkeitswerte auch auf kritische Asphaltkonzeptionen zurückgeführt werden. Asphaltbetone, deren Gesteinskörnungen aus Festgesteinen (z. B. Basalt, Serpentin) bestehen, waren ebenso betroffen wie Deckschichten mit Lockergestein (Kies).

Daneben erfüllen teilweise auch die zum Einsatz gekommenen Gesteinskörnungen die aktuell gültigen Anforderungen hinsichtlich Kornform, Anteil an gebrochener Kornoberfläche und Widerstand gegen Polieren (grobe Gesteinskörnungen: PSV, feine Gesteinskörnungen:  $PSV_{fGK}$ ) der TL Asphalt-StB 07 bzw. die Ergänzungen der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern nicht.

Bei mehr als der Hälfte der Strecken liegt der Widerstand gegen Polieren (PSV), der rückgewonnenen groben Gesteinskörnungen, unter der derzeitigen Anforderung von

$PSV_{\text{angegeben}}$  (48). Ein direkter Vergleich dieser Werte mit den Anforderungen ist jedoch nur begrenzt möglich, da für die Bestimmung des PSV nur auf rückgewonnene und nicht - wie gefordert - auf frische ungebrauchte Gesteinskörnungen zurückgegriffen werden konnte. Obwohl die feinen gebrochenen Gesteinskörnungen mit Ausnahme einer Strecke aus Lieferwerken stammen, deren grobe Gesteinskörnung einen Widerstand gegen Polieren der Kategorie  $PSV_{\text{angegeben}}$  (42) aufweisen und somit der  $PSV_{\text{fGK}}$  des feinen Gesteinskörnungsgemisches nicht eigens ermittelt werden müsste, wurde der Anforderungswert von mindestens  $PSV_{\text{fGK}}$  61 - bestimmt am feinen Gesteinskörnungsgemisch des Asphalt - an drei von sieben Strecken nicht erreicht. Darüber hinaus wurde an einer Strecke der  $PSV_{\text{fGK}}$  der anteiligen feinen Gesteinskörnungen, welcher mindestens 58 betragen muss, unterschritten.

Zusammenfassend sollte das Augenmerk zukünftig verstärkt auf die Asphaltkonzeption gerichtet werden. Dabei sollte einerseits auf die Einhaltung der Asphaltrezeptur geachtet werden und andererseits durch die Verwendung von polierresistenten Gesteinskörnungen bzw. durch anteiliges Mischen einzelner Korngruppen polierresistentere Asphaltkonzeptionen angestrebt werden.

Die Verwendung von Polymermodifizierten Bitumen in Asphalten höher belasteter Strecken verringert zudem das Risiko von aufsteigendem Mörtel.

Aus den durchgeführten Untersuchungen ist zu folgern, dass die derzeit geltenden Regelungen zu den TL Asphalt-StB 07 in Bayern keiner Änderung bedürfen.

„Bei Gemischen aus gebrochener und/oder unebrochener feiner Gesteinskörnung muss der Gesamtanteil an feiner Gesteinskörnung im Gesteinskörnungsgemisch des Asphalt es rechnerisch einen  $PSV_{\text{fGK}}$  von mindestens 61 erreichen; zugleich muss der  $PSV_{\text{fGK}}$  der anteiligen feinen Gesteinskörnung jeweils mindestens 58 betragen.“ Erweiternd könnte sich zukünftig die Bestimmung des  $PSV_{\text{fGK}}$  für feine Gesteinskörnungen unabhängig vom  $PSV$  der groben Gesteinskörnung vom selben Lieferwerk als zielführend erweisen.

Anforderungswerte für den Polierwert mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze  $PWS_{0,2/0,4}$  an feinen Gesteinskörnungen können erst dann festgelegt werden, wenn der Bewertungshintergrund, der derzeit in einem separaten Forschungsvorhaben ermittelt wird, vorliegt.

Um zukünftig gezielte Aussagen über das Griffigkeitsverhalten unterschiedlicher Asphalte gewinnen zu können, wäre eine nach Asphaltarten und -sorten getrennte Auswertung bei der ZEB vorteilhaft. Zudem erscheint eine alleinige Betrachtung der 100 m Auswerteabschnitte als nicht zielführend, d.h. es sollten zusätzlich zumindest zwei zusammenhängende 100 m Auswerteabschnitte in die Auswertung mit einfließen.

## AG Zerstörungsfreie Prüfung

### 7.2.7. MEMIN – Multidisciplinary Experimental and Modeling Impact Research Network

Bearbeiter: Dipl.-Geophys. D. Moser  
Förderer: DFG (FOR 887, Teilprojekt 4)

Das grundsätzliche Ziel von MEMIN (Teil I) war es, Impaktprozesse auf der Meso-Skala in porösen Gesteinen umfassend zu quantifizieren, um dabei ein Verständnis zu entwickeln von (i) der Dynamik der Kraterbildung, (ii) von Impaktschädigung, und (iii) von geophysikalischen Eigenschaften von Impaktkratern in sedimentären Targets.

Um diese Ziele zu erreichen, wurden Parameterstudien über Impaktenergie, die Auswirkungen von Porosität, und die Anwesenheit von Wasser in Sandsteintargets durchgeführt. Die neuen Datensätze halfen dabei, die Lücke zwischen Experiment und Natur zu verringern.

Insgesamt wurden 24 Kraterexperimente an den Anlagen des Ernst Mach Instituts in Freiburg durchgeführt. Projektile zwischen 2.5 und 12 mm Durchmesser wurden auf Geschwindigkeiten zwischen 2.5 und 7.8 km/s beschleunigt und erzeugten Impaktenergien zwischen 0.7 und 82 kJ. Dabei wurden Krater mit Durchmessern zwischen 3.9 und 40 cm gebildet.

Für jede Reihe von Experimenten war eine lange Vorbereitungszeit notwendig, um Messsysteme zu testen und um Targets und Projektile einzurichten. Nach grundsätzlichen Vorbereitungen wurden Ejektorfänger, Ultraschallsensoren, High-Speed Videokameras und Beleuchtung, Drucksensoren, und Sensoren, die den Impaktblitz aufzeichneten, installiert und getestet.

Es wurden in der ersten Antragsphase von MEMIN I Kenntnisse gewonnen, über den Einfluss von Porosität, Wassersättigung des Porenraums, und experimentelle Parameter (Größe, Geschwindigkeit, Material des Projektils) auf bestimmte Aspekte des Kraterbildungsprozesses. Der derzeitige Wissensstand wurde in einem Sonderband der Zeitschrift „Meteoritics & Planetary Science“ dokumentiert.

## 7.3. Laufende Forschungsvorhaben

### AG Bindemittel und Zusatzstoffe

#### 7.3.1. Variierte Vorlagerungszeiten und deren Auswirkungen auf flugaschehaltige Betone im 40 °C- und 60 °C-Betonversuch

Bearbeiter: K. Fischer,  
Förderer: VGB-Forschungsstiftung

#### 7.3.2. Einfluss von Tausalz und aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen der Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton

Bearbeiter: Dr.-Ing. A. Dressler, Kai Fischer, M. Sc.  
Förderer: DFG

### **7.3.3. Einsatz von Flugasche im Beton zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion - Langzeitverhalten**

Bearbeiter: Dr.-Ing. A. Dressler  
Förderer: VGB-Forschungstiftung

### **7.3.4. Wirkung von höheren Flugaschegehalten auf den Sulfatwiderstand von Beton – Langzeitlagerung**

Bearbeiter: Dr.-Ing. L. Urbonas  
Förderer: VGB-Forschungstiftung

### **7.3.5. Gips-Zement-Puzzolan-Hüttensand-Bindemittel mit Flugasche und REA-Gips für Betone**

Bearbeiter: Y. Wang, M. Sc.  
Förderer: AiF

## **AG Betontechnologie**

### **7.3.6. Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton-Auslagerungsversuch**

Bearbeiter: C. Milachowski  
Förderer: AiF/FTB

### **7.3.7. Anwendungsorientierte Optimierung und Klassifizierung der rheologischen Eigenschaften von UHPC**

Bearbeiter: T. Kränkel, O. Mazanec  
Förderer: DFG

### **7.3.8. Simulation der Beanspruchung von Betonfahrbahndecken**

Bearbeiter: A. Spengler  
Förderer: BMVBS / bast

### **7.3.9. Beton in großen Tiefen**

Bearbeiter: T. Kränkel, S. Leonhardt  
Förderer: Bauer Spezialtiefbau

### **7.3.10. Schalen aus gradierten Betonfertigteilen**

Bearbeiter: S. Leonhardt, D. Lowke  
Förderer: DFG – Im Rahmen des SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“

### **7.3.11. Lärmarmes Betonsteinpflaster**

Bearbeiter: F. Duran  
Förderer: BMVBS / bast

### **7.3.12. Modellierung des Tragverhaltens von Verbunddübeln**

Bearbeiter: T. Kränkel  
Förderer: HILTI AG/ fischerwerke GmbH

## AG Stahl und Korrosion

### 7.3.13. Ermüdungsverhalten von Betonstahl unter Korrosionsbeanspruchung

Bearbeiter: Dipl.-Ing. S. Keßler; Dipl.-Ing. F. Meyer; Dipl.-Ing. K. Osterminski  
Förderer: DFG

### 7.3.14. Beurteilung der Korrosionsschutzwirkung bei Betonstahl, der mit Epoxidharz pulverbeschichtet ist

Bearbeiter: Dipl.-Ing. M. Zintel  
Förderer: Industrie

### 7.3.15. Korrosionsverhalten von Stahl in Beton bei Instandsetzungsprinzip W-CI in gerissenem Beton

Bearbeiter: Dipl.-Ing. S. Keßler; Florian Hiemer M.Sc.  
Förderer: DFG

## AG 4 Chemie

### 7.3.16. Grundlagen der Gefügeentwicklung von UHPC. Einfluss von Bindemittelzusammensetzung und Temperatur auf die C-S-H-Bildung

Bearbeiter: T. Gutberlet M.Sc.  
Förderer: DFG

### 7.3.17. Grundlagen des Betonsäurewiderstands - Einfluss der korrodierten Schicht

Bearbeiter: T. Gutberlet M.Sc.  
Förderer: DFG

## AG 5 Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine

### 7.3.18. Akustisch optimale Textur mit künstlicher Gesteinskörnung (EOS) - Entwicklung eines dünnen Straßenbelages aus Asphalt mit schalltechnisch optimierten Körnungen aus Elektroofenschlacke (im Rahmen von LeiStra 3)

Bearbeiter: Olga Kazakova M.Sc.  
Förderer: BAST

## 7.4. Neue Forschungsvorhaben

### AG Bindemittel und Zusatzstoffe

#### 7.4.1. AKR-Vermeidung durch Flugasche bei Alkalieintrag von außen - Langzeitlagerung

Bearbeiter: Dr.-Ing. Anne Dressler  
Förderer: VGB-Forschungsstiftung

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) ist in den letzten Jahren wieder in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. Ursache hierfür sind Schäden an Fahrbahndeckenbetonen in denen die Reaktionsprodukte einer AKR festgestellt wurden. In der Praxis wird als vermeidende Maßnahme bisher der Einsatz einer unbedenklichen Gesteinskörnung gefordert. Dies ist in einigen Gegenden in Deutschland jedoch nur unter enormen logistischen und dadurch

auch finanziellen Aufwand möglich. Der Einsatz von Flugasche im Bindemittel, insbesondere im Straßenbau (WS), aber auch bei Bauwerken im Sprühnebelbereich (WA) entsprechend einem NA-Zement, wird momentan nicht in Betracht gezogen.

Um den Einfluss eines Alkaliangriffs von außen auf flugaschehaltige Betone mit reaktiven Gesteinskörnungen unter realen Witterungsbedingungen zu untersuchen, wurden in einem Vorläuferprojekt 60 Betonwürfel (300 mm Kantenlänge) mit unterschiedlichen Rezepturen und der Verwendung verschiedener Ausgangsstoffe hergestellt. Die Betonwürfel wurden ins Freilager ausgelagert und seitdem 2-mal wöchentlich mit einer definierten Menge an 10 %iger NaCl-Lösung besprüht. Dieses soll eine Beaufschlagung von Betonbauteilen im Sprühnebelbereich von Straßen simulieren.

Ziel dieser Untersuchungen ist es das Langzeitverhalten flugaschehaltiger Betone im Hinblick auf eine schädigende AKR bei einem Alkalieintrag von außen zu beurteilen. Daneben soll herausgearbeitet werden, unter welchen Randbedingungen eine schädigende AKR bei einer zusätzlichen Alkalizufuhr von außen durch den Einsatz von Flugasche als Betonzusatzstoff reduziert oder sogar vermieden werden kann. Dabei kann auch die Wirkung einer flugaschehaltigen Betonmischung gegenüber einem Beton mit NA-Zement verglichen werden. Die Möglichkeit ein Zement-Flugaschegemisch entsprechend einem NA-Zement einzusetzen ist in der aktuellen Alkali-Richtlinie des DAfStb bisher nicht gegeben.

#### **7.4.2. Wirkung von Additiven auf die Lösungsmechanismen von Flugaschen in zementären Systemen (Fortsetzung)**

Bearbeiter: Linda Irbe, M. Sc.  
Förderer: DFG

Die Verwendung von Alkanolaminen kann die Frühfestigkeit von flugaschehaltigen Mörteln steigern. Um die Mechanismen dieser Steigerung systematisch zu untersuchen, wurden im ersten Teil der Forschung Lösungsversuche an Steinkohlenflugaschen (SFA) und künstlichen Gläsern durchgeführt. Aus den Lösungsversuchen ging hervor, dass Alkanolamine und weitere OH-Gruppenhaltige Additive (z.B. Zitronensäure) in der Lage sind, die Löslichkeit von Bestandteilen des Flugascheglasses durch eine Komplexbildung von Aluminium und Eisen zu erhöhen. Durch die hohen Ionenkonzentrationen in Porenlösungen von flugaschehaltigen Zementpasten wird die glaslösende Wirkung von Additiven überdeckt. Es wird davon ausgegangen, dass Komplexbildner eine katalytische Funktion erfüllen, die zu höheren Hydratationsraten führt. Da bei Mörtelversuchen mit Quarzmehl, als inerte Referenz, ebenfalls erhöhte Druckfestigkeiten durch Alkanolaminzugabe gemessen wurden, ist von zusätzlichen Effekten, z.B. auch von einer dispergierenden Wirkung dieser Additive, auszugehen.

Es bleibt die Frage, wie sich die durch Zugabe von Alkanolaminen verursachten, messbaren Festigkeitssteigerungen flugaschehaltiger Zementmörtel bei Variation der Zusammensetzung der Hauptkomponente Portlandzement ändern. Außerdem muss die Zugabe von Fließmitteln berücksichtigt werden, da eine gegenseitige Beeinflussung der organischen Zusatzmittel positive wie negative Effekte haben kann.

Im zweiten Teil dieser Arbeit sollen nun offen gebliebene Fragen geklärt werden. Zum einen soll die angenommene katalytische Wirkung der verwendeten organischen Additive genauer belegt werden. Zum anderen ist die Rolle der Sulfate, speziell aus den Oberflächenbelägen der SFA bei der Wirkung der Additive zu klären. Hinzu kommt die postulierte dispergierende Wirkung der Additive auf SFA oder auch inerte Zusatzstoffe.

Mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen soll es schließlich möglich sein, die anteiligen Beiträge zu bestimmen, die die Leistungssteigerungen von flugaschehaltigen Mörteln herbeigeführt haben. Für eine solche differenzierte Beurteilung ist auch die Betrachtung eines Portlandzementes mit geringerem Alkaligehalt wichtig, da durch die Alkalien die Wirkung der organischen Additive wie auch die der SFA maßgeblich beeinflusst wird. Da übliche, praxismgerechte Betone nicht mehr ohne organische Zusatzmittel wie z.B. Fließmittel auskommen, werden auch Untersuchungen zur Interaktion der eingesetzten Additive mit Betonzusatzmitteln für eine umfassende Beurteilung gemacht.

## **AG Betontechnologie**

### **7.4.3. Modellierung des Einflusses der Temperatur auf das Tragverhalten von Verbunddübeln unter dauerhafter Lasteinwirkung**

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Thomas Kränkel  
Förderer: Hilti AG / fischerwerke GmbH

Im Hinblick auf die weitreichenden Einsatzgebiete der Verbunddübel (Außenbereiche, Innenräume, Tunnel) müssen diese einen großen Temperaturbereich besitzen. Aufgrund der polymeren Basis der Verbundmörtel weisen Verbunddübel jedoch ein signifikant temperaturabhängiges Tragverhalten auf. So führt eine Temperaturerhöhung meist zu einer verminderten Verbundsteifigkeit und/oder Zugtragfähigkeit im Kurzzeitversuch (Auszugversuch). Systematische Untersuchungen zum temperaturabhängigen Langzeittragverhalten, insbesondere der Zugtragfähigkeit existieren jedoch nur unzureichend.

Das Forschungsvorhaben hat zum Ziel, systematische Zusammenhänge zwischen der vorherrschenden Temperatur und dem resultierenden Langzeittragverhalten (Kriechen) der Verbunddübel unter dauerhafter Lasteinwirkung zu erkennen. Es soll ein Konzept erarbeitet werden, um dieses temperaturabhängige Kriechverhalten präzise prognostizieren zu können. Dieses Konzept soll es insbesondere auch ermöglichen, das Versagen der Verbunddübel im Kriechversuch in Abhängigkeit der vorherrschenden Belastung und Temperatur vorauszusagen. Dies stellt die Grundlage für eine Lebensdauerprognose von Verbunddübeln dar. Die Eingangswerte für die Prognose sollen dabei in einfachen Versuchen mit einer ökonomisch sinnvollen Zeitdauer ermittelt werden können, um eine Anwendbarkeit des Konzeptes in der Praxis, z.B. zur Überprüfung der temperaturabhängigen Kriechbeständigkeit neuer Verbunddübelssysteme, zu gewährleisten.

### **7.4.4. Dauerhafte Betondecken – Akustische Optimierung von Betonoberflächen durch Texturierung des Festbetons mittels optimierten Grinding-Verfahrens**

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Jens Skarabis  
Förderer: BMVBS / bast

Das Grinding (Schleifen) von Fahrbahndecken aus Beton wird bisher hauptsächlich eingesetzt, um die Griffigkeit bzw. die Ebenheit der Oberfläche zu verbessern. Dabei wurde festgestellt, dass Grindingtexturen auch lärmindernd wirken können. Abb. 1 zeigt beispielhaft die Grindingtextur auf einem Abschnitt der A94.

In einem bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben wurde unter anderem eine Parameterstudie zum Einfluss der Texturgeometrie auf die Lärminderung von Grindingtexturen durchgeführt. Darauf aufbauend werden in diesem Forschungsvorhaben Grindingtexturen im Hinblick auf die Lärminderung weiter optimiert. Dabei sollen auch Betone entwickelt

werden, die in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit bzw. Texturdauerhaftigkeit besonders geeignet sind, um das Grinding auch bei Neubaustrecken zur Anwendung kommen zu lassen. Im Labor werden an verschiedenen Betonen mit einer Laborgrindingmaschine unterschiedliche Grindingtexturen erzeugt und anschließend die Textureigenschaften, wie die Texturtiefe und der texturinduzierte Strömungswiderstand, bestimmt. Beim Projektpartner Müller-BBM werden auf Grundlage der Textureigenschaften Simulationsrechnungen durchgeführt, um die zu erwartende Geräuschemission zu berechnen.



Abb. 1: Grindingtextur auf der A94

Im zweiten Teil der Untersuchungen wird die Dauerhaftigkeit der Grindingtextur durch eine Simulation von verschiedenen Praxisbeanspruchungen bewertet. Im Anschluss an die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen werden erneut die Textureigenschaften der Oberflächen bestimmt, um anschließend anhand akustischer Simulationsrechnungen die Veränderung der Geräuschemission im Vergleich zum Ausgangszustand beurteilen zu können. Die Laborversuche sollen Aufschluss darüber geben, mit welchen Betonen bzw. Grindingtexturen optimale Lärminderungseigenschaften dauerhaft hergestellt werden können. Am Ende des Vorhabens wird eine Erprobungsstrecke gebaut, bei der drei unterschiedliche Betone mit je vier verschiedenen Grindingtexturen zur Anwendung kommen.

## AG Chemie

### 7.4.5. Die Rolle des Aluminiums in C-A-S-H bei chemischem Angriff auf Beton

Betreuer: L. Irbe M.Sc.  
Förderer: DFG

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Klärung der Rolle von Aluminium in den C-A-S-H-Phasen bei einem chemischen Angriff auf Betonbauteile.

Im ersten Teil der Forschungsarbeit sollen über verschiedene Synthesewege gezielt C-A-S-H-Phasen hergestellt und charakterisiert werden. Neben der direkten Synthese von C-A-S-H, die C-A-S-H als Produkt der frühen Reaktionen vor allem von Klinkermineralen simuliert, wird Al nachträglich (indirekt) in C-S-H eingebaut, um die spätere Freisetzung von Aluminium aus aluminiumhaltigen puzzolanischen Zusatzstoffen in die Porenlösung zu simulieren. Durch NMR- und XRD-Untersuchungen sowie chemische Analyse sollen Zusammenhänge zwischen der Nanostruktur von C-A-S-H (Al-Gehalt, mittlere Kettenlänge, Al/Si-, Ca/Si-Verhältnis, Alkaligehalt) und der chemischen Zusammensetzung der Porenlösung (Ca-, Si-, Al-, Alkali-Konzentrationen, pH) aufgestellt werden. Im zweiten Teil der Forschungsarbeit liefern Lagerungsversuche mit  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -Lösungen, NaCl-Lösungen bzw. Salzsäure Grundkenntnisse über Änderungen in der C-A-S-H-Nanostruktur bei chemischem Angriff, insbesondere die Verfügbarkeit bzw. Stabilität von Al und Alkalien bei einem Sulfatangriff, einer schädigenden AKR, der Carbonatisierung und einem Säureangriff.

## AG Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine

### 7.4.6. Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen

Bearbeiter: Olga Kazakova M.Sc., Dipl.-Ing. (FH) Thomas Patzak  
Förderer: BAST

Das Vorhaben wird in Zusammenarbeit mit dem Institut für Straßenbau und Eisenbahnenwesen der Universität Karlsruhe (KIT, Federführung) und dem Nordlabor in Pinneberg durchgeführt. Im Rahmen des Projektes sollen die performance-relevanten Eigenschaften von derzeit hergestellten Asphaltmischgütern in den Phasen der Mischgutkonzeption, der Mischgutproduktion und des Mischguteinbaus (fertige Schicht) untersucht werden. Hierfür werden 21 geeignete Baumaßnahmen ausgewählt und beginnend von der Erstprüfung bis zur Bauausführung wissenschaftlich begleitet sowie Asphaltuntersuchungen in den Laboratorien der Forschungsnehmer durchgeführt. Es werden sowohl die nach den RDO Asphalt dimensionierungsrelevanten Kennwerte als auch die Verformungs-, Ermüdungs-, Tieftemperatur- und Griffigkeitseigenschaften prüftechnisch bestimmt. Weiterhin werden ergänzende Untersuchungen zu performance-relevanten Eigenschaften an den Bitumen der untersuchten Asphalte durchgeführt. Bei den in situ-Untersuchungen an drei verkehrlich hoch belasteten Strecken werden mittels Tragfähigkeits- und Griffigkeitsmessungen (FWD und SKM) weitere Kennwerte ermittelt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen über die Phasen hinweg werden analysiert und interpretiert, um Empfehlungen für die Erstellung des Technischen Regelwerks für „performance-basierte Vertragsbedingungen“ geben zu können. Darüber hinaus sollen die gewonnenen Informationen als Hilfestellung zur praktischen Anwendung der RDO, zur Weiterentwicklung der Stoffmodelle und zur Umsetzung der nächsten Normengeneration in das nationale Regelwerk dienen. Die gesammelten Daten werden in einer Datenbank zusammengestellt.

## AG Zerstörungsfreie Prüfung

### 7.4.7. AiF-ZIM-Brandprojekt

Titel: Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der Betonabplatzungen bei Brandversuchen  
Projektleiter: Dipl.-Ing. Ronald Richter  
Projektpartner: Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig GmbH)  
Laufzeit: 01.03.2013 bis 28.02.2014

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Programms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)“

Die Beständigkeit von Beton und Brandschutzkonstruktionen bei Tunnelbrandbeanspruchungen ist für neue und bestehende Tunnel von hoher Bedeutung. Die Beurteilung erfolgt durch experimentelle Prüfungen, die sehr aufwendig und deshalb teuer sind. Daher ist es wichtig, aus diesen Untersuchungen möglichst viele belastbare Daten und damit nützliche Informationen zur Verfügung stellen zu können. Bezüglich des Abplatzverhaltens von Beton ist oft nur eine Unterscheidung der Probekörper vor und nach dem Versuch möglich. Hier misst man Abplatztiefen und verlorenes Gewicht. Eine Information über die zeitliche Entwicklung dieser Abplatzungen und deren Tiefen erreicht man dadurch leider nicht. In-

halt und Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Zusammenstellung von Messtechnik und Analysesoftware für die Detektion der Entstehung und des Schädigungsverlaufes von Abplatzungen bei Beton unter Brandbeanspruchung. Dies soll eine verbesserte Informationsgewinnung und Dokumentation von experimentellen Brandversuchen ermöglichen. Nach einer Analyse der Tauglichkeit sowie der Grenzen der Verfahren, sollen die Messergebnisse mechanischem Materialverhalten zugeordnet werden. Um dies zu erreichen, muss die Messtechnik an die Prüfstände der MFPA Leipzig GmbH angepasst und durch automatisierte Auswertungsprogramme eine wirtschaftliche und robuste Anwendbarkeit entwickelt werden.

#### **7.4.8. MAIzfp: Kombinierte zerstörungsfreie Prüfmethode zur Qualitätssicherung von Faserverbundwerkstoffen**

Bearbeiter: Dr. Florian Stark  
Förderer: BMBF (03MA112H)

Am 1. März 2013 startete im Rahmen des BMBF geförderten Spitzenclusters MAI Carbon das Verbundprojekt „MAIzfp – Kombinierte zerstörungsfreie Prüfmethode zur Qualitätssicherung von Faserverbundwerkstoffen“. Durch die gemeinsame Forschung des Lehrstuhls mit unterschiedlichen Industrie- und Forschungspartnern werden Kompetenzen auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung von CFK-Materialien zusammengeführt und weiterentwickelt. Das Ziel ist eine Verbesserung der Aussagesicherheit von sowohl einzelnen ZfP-Methoden als auch deren Kombination um einen ökonomischen Herstellungsprozess von Faserverbundwerkstoffen zu gewährleisten. Innerhalb MAIzfp wird dabei in enger Zusammenarbeit mit den Industriepartnern an der Integration der verschiedenen ZfP-Verfahren in einem seriennahen Prozess gearbeitet. Grundlage für den Wissenstransfer bildet dabei das jeweilige Einsatzziel des Industriepartners in der Qualitätssicherung, der Werkstoffcharakterisierung oder Schadensbeurteilung. Die Detektionswahrscheinlichkeit (Probability of Detection) für CFK-typische Produktionsfehler und Schädigungen (z.B. Porositäten, Zwischenfaserbrüche, Delaminationen oder Faserbrüche) wird evaluiert - als Referenzmessung wird die Computer-Tomografie angewendet. Außerdem kommt der Standardisierung der Messmethodik und der Ausnutzung von Synergieeffekten zwischen einzelnen Verfahren eine zentrale Bedeutung zu. Dazu soll zunächst eine gemeinsame Wissensbasis für die Detektionswahrscheinlichkeit materialspezifischer Defekte erarbeitet und anschließend der Einfluss dieser detektierten Defekte im Material auf die strukturellen Eigenschaften des Faserverbundbauteils bewertet werden. Dadurch lassen sich neue Anforderungen an die Detektionsschwellen der einzelnen Verfahren definieren und je nach Anwendung die effizientesten Prüfverfahren auswählen. Dies führt zu einer Reduktion des Prüfaufwandes, einer verbesserten Aussagesicherheit und damit zu einer Verringerung der Bauteilkosten. Ebenso kommt der Automation von ZfP-Methoden eine Rolle als Schlüsseltechnologie für die Großserientauglichkeit von Faserverbundwerkstoffen zu. Dieser Aspekt soll gesondert betrachtet werden und von den Weiterentwicklungen im Projekt MAIzfp profitieren.

#### **7.4.9. HEALCON - Self-healing concrete to create durable and sustainable concrete structures**

Bearbeiter: Fabian Malm, M.Sc.  
Förderer: European Commission, DG Research & Innovation,  
Project Number 309451

Im Rahmen des am 1. Januar 2013 gestarteten 4-jährigen EU-Projekts HEALCON (European Commission, DG Research & Innovation, Project Number 309451), unter der technischen Leitung von Prof. Nele De Belie (University Gent, Belgium), ist die Technische Universität München im Fachbereich Zerstörungsfreie Prüfung Projektpartner geworden. Aufgabe von HEALCON ist es, verschiedene Techniken für selbstheilenden Beton zu entwickeln sowie deren Effizienz zu untersuchen, um dauerhafte und nachhaltige Tragwerke aus Beton zu schaffen. Dies umfasst die Herstellung der einzelnen Heilmittel, die Entwicklung verschiedener Verkapselungstechniken, die Herstellung und Untersuchung von Probekörpern, sowie die Durchführung von Feldstudien an realen Bauwerken. Weitere Projektpartner sind die Universität Gent (Belgien), Avecom (Belgien), Technische Universität Delft (Niederlande), Acciona (Spanien), TTI (Stuttgart, Deutschland), VTT (Finnland), COWI (Dänemark), DTI (Dänemark), CEINMAT (Spanien), Devona (Portugal), Fescon (Finnland). Im Zuge des Projekts wird der Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung zerstörungsfreie Prüfverfahren und Dauerüberwachungstechniken testen, die geeignet sind, den Heilungserfolg nachzuweisen.

#### **7.4.10. MEMIN – Multidisciplinary Experimental and Modeling Impact Research Network, Teil II**

Bearbeiter: Manuel Raith (MSc)  
Förderer: DFG (FOR 887, Teilprojekt 7); „Geophysikalische Untersuchungen zur Kraterentstehung im Labor“

Im Juli 2013 wurde die Finanzierung der Forschergruppe FOR 887 MEMIN für weitere drei Jahre von der Deutschen Forschungsgemeinschaft bewilligt. Die Gruppe des MEMIN-Projekts (Teil II) erhält von der DFG 1,6 Millionen Euro, verteilt auf die federführende Universität Freiburg, die Universitäten in Jena, München und Münster, das Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik in Freiburg, das Museum für Naturkunde Berlin und das DESY Hamburg sowie Kooperationspartner in Beauvais/Frankreich und Stony Brook/USA. MEMIN steht für „Multidisciplinary Experimental and Modeling Impact crater research Network“ und verfolgt das Ziel, die Prozesse bei der Entstehung von Meteoritenkratern im Detail zu verstehen. Sprecher ist der Geologe Prof. Dr. Thomas Kenkmann von der Universität Freiburg.

Seit Jahrmilliarden prägen Meteoriteneinschläge die Oberflächen aller bekannten Planeten, Monde, Asteroiden und Kometen im Sonnensystem. So wird etwa die Entstehung des Erdmondes auf eine gewaltige Kollision mit der frühen Erde erklärt. Das Aussterben der Dinosaurier lässt sich ebenfalls auf einen Meteoriteneinschlag zurückführen. Kosmische Einschläge sind auch heute für die Erde gefährlich. Eindrucksvoll wurde dies am 15. Februar 2013 in Erinnerung gerufen, als über der sibirischen Stadt Tscheljabinsk ein etwa 15 Meter großer Meteor beim Eindringen in die Atmosphäre explodierte und am gleichen Tag der 55 Meter große Asteroid „2012 DA14“ in nur 27.000 Kilometern Höhe an der Erde vorbei flog.

Die MEMIN-Gruppe erzeugt im Labor experimentelle Meteoriteneinschläge. Ein Leichtgasbeschleuniger bringt bis zu 1,2 Zentimeter große Stahlkugeln oder echte Meteoriten auf eine Geschwindigkeit von mehr als 25.000 Stundenkilometer. In weniger als einer Millisekunde entstehen durch die Energie, die beim Einschlag freigesetzt wird, Krater mit bis zu

40 Zentimeter Durchmesser. Moderne Hochgeschwindigkeitskameras und Drucksensoren zeichnen eine Vielzahl von Prozessen in Echtzeit auf. Speziell entwickelte Partikelkollektoren fangen das ausgeworfene Material auf, so dass die Forscherinnen und Forscher es mit geologischen und mineralogischen Methoden untersuchen können. Die Daten dienen als Grundlage für Modelle, die die Kraterbildung simulieren und neue Einblicke in die Prozesse erlauben. Aufgrund der Dimension der experimentellen Krater ist es möglich, die Ergebnisse auf planetare Maßstäbe hochzurechnen.

Mit den neuen Fördermitteln wollen die Forscher zum Beispiel herausfinden, wie die Materialeigenschaften von typischen Gesteinen der Erdoberfläche die Kraterbildung beeinflussen. Im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten sollen nun Kalksteine stehen, nachdem in der ersten Phase poröse Gesteine wie Sandstein, wassergesättigte Gesteine sowie solche mit nur sehr geringem Porenvolumen experimentell untersucht wurden. In den Mittelpunkt des Interesses rücken nun auch jene Prozesse, die sich in den ersten Nano- bis Mikrosekunden unmittelbar beim Aufschlag ereignen. Beim Kontakt des Projektils mit dem Gesteinskörper entstehen kurzfristig extreme Drücke und Temperaturen, die zur Aufschmelzung und Verdampfung der getroffenen Gesteine bis hin zur Plasmabildung führen können. Als Ergebnis wollen die Forscher ein deutlich vertieftes Verständnis der hochdynamischen und komplexen Verhältnisse beim Meteoriteneinschlag entwickeln – als wichtige Grundlage für erfolgreiche Abwehrstrategien.

#### **7.4.11. WindForS**

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. habil. Christian Große

Im Mai 2011 haben zunächst sechs Hochschulen und Forschungseinrichtungen das Windenergie Forschungsnetzwerk Süd (WindForS) gegründet. Die Hochschule Aalen, das Karlsruhe Institute of Technology, die Universität Stuttgart, die Universität Tübingen, die Technische Universität München und das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg bündeln ihre Kompetenzen auf dem Gebiet der Windenergie in der Forschung wie auch in der Aus-, Fort- und Weiterbildung. Ein Schwerpunkt ihrer Kooperation sind u.a. die Weiterentwicklungen der Windenergienutzung an topografisch anspruchsvollen Standorten in Süddeutschland. Der Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung am cbm erforscht dabei Methoden für die Prüfung von Einzelkomponenten (wie Rotorblätter, Fundament, Turm) oder für die effiziente Dauerüberwachung. Weitere Informationen zu WindForS unter [www.windfors.de](http://www.windfors.de).

Mit Wirkung zum 1. Januar 2014 hat WindForS eine eigene Geschäftsstelle mit Geschäftsführer in Stuttgart bekommen, die vollständig aus Mitteln des Landes Baden-Württemberg finanziert wird. Im Rahmen von WindForS wird derzeit die Erstellung eines Windenergie-testfelds im süddeutschen Raum vorbereitet, in dem einerseits verbesserte Methoden der Windnutzung im komplexen Gelände untersucht werden können. Andererseits kann ein solches Testfeld auch Daten für ökologische Fragestellungen liefern sowie Beiträge zur Landschaftsintegration und Akzeptanz. Entsprechende Forschungsanträge sind in der Vorbereitung.

## 7.5. Wissenschaftliche Materialprüfung

### AG Betontechnologie

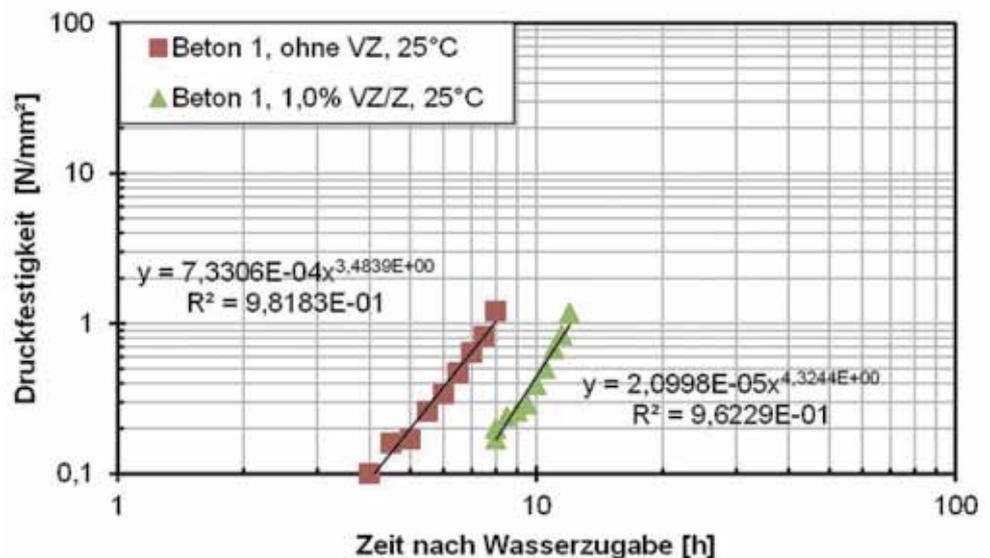
#### 7.5.1. Untersuchungen zur Entwicklung der Druckfestigkeit von Beton im sehr jungen Alter – Eignung als Gleitbeton

Bearbeiter: Dipl.-Ing Thomas Kränkel

Förderer: Max Bögl Bauunternehmung GmbH & Co. KG

Im Rahmen von umfangreichen Untersuchungen wurden zwei Betone im Hinblick auf ihre Eignung als Gleitbetone überprüft. An den Betonen wurde der zeitliche Verlauf der Druckfestigkeit im sehr jungen Alter, d.h. möglichst ab 0,1 N/mm<sup>2</sup> bis etwa 1,5 N/mm<sup>2</sup> sowie der Einfluss eines Verzögerers auf das Zeitintervall des vorgenannten Festigkeitsbereichs bestimmt. Parallel zu den Druckfestigkeitsprüfungen wurden bei einem Beton ein Nadelpenetrationstest und ein qualitativer Test zur Oberflächenbearbeitbarkeit in einem eigens entwickelten Miniaturgleitschalungsfertiger durchgeführt. Dazu wurden Probekörpern für die Druckfestigkeit gelagert. Ziel dieser Versuche war es, einen Zeitpunkt bzw. eine Druckfestigkeit zu ermitteln, ab der die Betonoberfläche nicht mehr ohne Schäden, d.h. ohne ein Herausreißen der Gesteinskörner nachbearbeitet werden kann. Ein typischer Verlauf der Druckfestigkeit im sehr jungen Alter ist in Abb. 1 dargestellt.

Abb. 1: Verlauf der Druckfestigkeit im sehr jungen Alter



Die Entwicklung der Druckfestigkeit konnte in guter Näherung bei allen untersuchten Varianten mit Hilfe einer Potenzfunktion approximiert werden. Aus den Untersuchungen ergab sich, dass ab einer Druckfestigkeit von rd. 0,5 N/mm<sup>2</sup> eine Bearbeitung der Betonoberfläche nur noch mit einer Beschädigung möglich ist. Bei der Durchführung des Penetrationstests wurden bei einer Druckfestigkeit von 0,8 N/mm<sup>2</sup> deutliche Betonabplatzungen festgestellt. Der für das Nachbearbeiten der Betonoberfläche bzw. für das Gleiten maßgebliche Druckfestigkeitsbereich wurde daher zwischen 0,1 N/mm<sup>2</sup> und 0,5 N/mm<sup>2</sup> festgelegt. Die Untersuchungen zeigten eine lineare Abhängigkeit von Beginn und Ende sowie der Länge des Gleitfensters vom Verzögerergehalt. Weiterhin ergab sich eine gute Übereinstimmung

der Gleitfenster sowie deren Verschiebung mit zunehmendem Verzögerergehalt für beide untersuchten Betone. Unter Ansatz der beiden genannten Kriterien für die Druckfestigkeit ergeben sich folgende zeitliche Gleitfenster für die beiden Betone:  
Beginn zwischen rd. 4 Stunden (ohne VZ) bis rd. 7 Stunden (1,0 M.-%/z VZ), Ende zwischen rd. 6 Stunden bis rd. 10 Stunden, jeweils ab Wasserzugabe; Länge des Gleitfensters zwischen rd. 1,5 Stunden bis 3,3 Stunden.

## AG Chemie

### 7.5.2. Untersuchungen einer Grauverfärbung auf einem Straßenbeton

Im Rahmen einer Schadensuntersuchung kam es zu folgender Fragestellung: Im Bereich einer Leitplanke kam es zu einer Grauverfärbung der Straßenbetonoberfläche. Es sollte geklärt werden, um was es sich bei dieser Verfärbung handelt. Für die Untersuchungen erhielten wir Bohrkern aus einem verfärbten sowie aus einem nicht verfärbten Bereich. Zusätzlich erhielten wir ein Stück einer Leitplanke aus diesem Bereich.

Da eine Probenahme für eine quantitative Analyse aussichtslos erschien, wurden als erstes Analysen mit der Laserablations-ICP-MS durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird mit einem Laserstrahl Material von der Oberfläche abgelöst und mit einem Trägergas in die ICP-MS transportiert. Dort findet die Quantifizierung der Inhaltsstoffe statt. Es wurden zum Vergleich eine nicht verfärbte und eine verfärbte Oberfläche untersucht, wobei jeweils mehrere Linienscans durchgeführt wurden. Zur Kontrolle wurden von beiden Proben nach der Ablation die entstandenen Krater mit einem konfokalen Lasermikroskop ausgemessen.

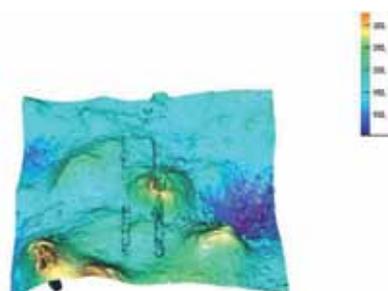
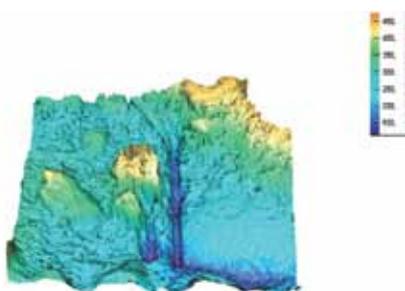
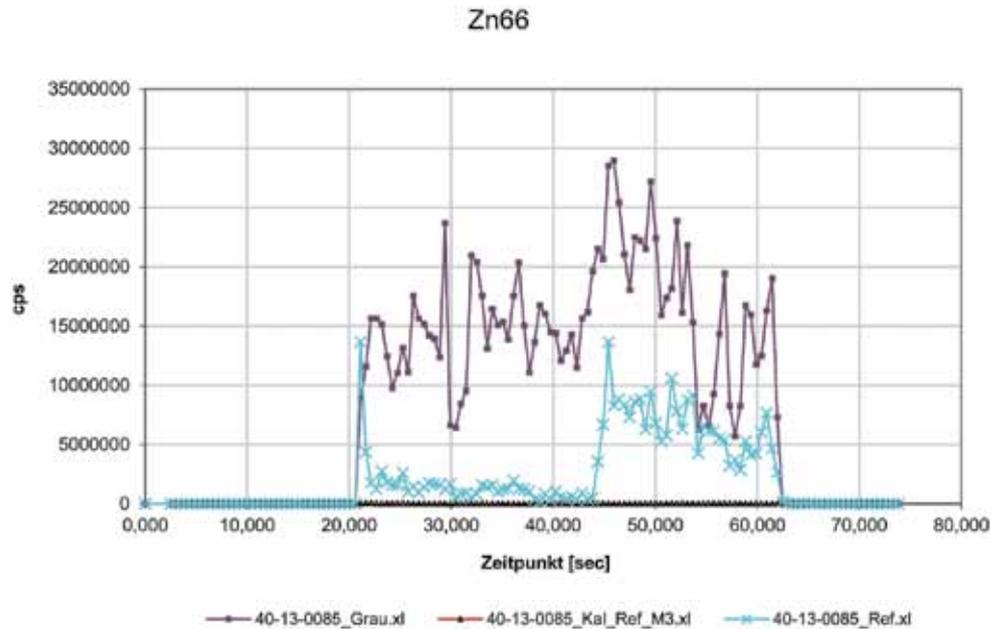


Bild 1, li.: Laserscanning-Mikroskopie-Bild der Referenzprobe nach der Ablation

Bild 2, re.: Laserscanning-Mikroskopie-Bild der Probe mit der grauen Verfärbung nach der Ablation

Die Lasermikroskopbilder zeigen deutlich die Unebenheit der Probenoberflächen und die deutlich unterschiedlichen Ablationstiefen. Somit ist ein direkter Vergleich der beiden Proben nicht möglich. Trotz des geringeren Materialabtrages ergaben sich bei der Probe mit der Grauverfärbung beim Zink deutlich höhere Signalintensitäten (vgl. Abb. 3). Das heißt, dass die Probe mit der Grauverfärbung an der Oberfläche deutlich mehr Zink enthält.

Bild 3: Intensitätsverteilung von Zink entlang der ablatierten Linie (magenta: Probe mit Grauverfärbung; cyan: Referenzprobe; schwarz: Laborvergleichsprobe)



Um das Ergebnis zu verifizieren, wurde auf beiden Oberflächen ein Tropfen Salpetersäure (2M HNO<sub>3</sub>) gegeben, nach kurzer Einwirkzeit mit der Pipette wieder abgezogen und diese anschließend auf Zink geprüft. Analog wurde mit dem Leitplankenstück verfahren. Aufgrund des deutlich sichtbaren Einwirkfleckens (der dunkelgraue Belag wurde optisch offensichtlich in diesem Bereich vollständig entfernt) konnte so ein auf die Oberfläche bezogener Zn-Gehalt bestimmt werden:

Probe:	Leitplanke	Referenz	Beton grau
Einheit:	mg/cm <sup>2</sup>	mg/cm <sup>2</sup>	mg/cm <sup>2</sup>
Zn-Gehalt:	1,31	0,04	0,22

Bild 4: Betonoberflächen nach der Säurebehandlung



Somit bestätigte sich, dass der graue Belag auf dem Bohrkern sowie auch die Leitplankenoberfläche einen hohen Anteil an Zink enthalten. Somit stammte die Grauverfärbung offensichtlich von Zink, das sich durch Umwelteinflüsse von der Leitplanke gelöst hat. In welcher Form es auf der Betonoberfläche vorlag, wurde nicht untersucht.

## 7.6. Das cbm in den Medien

### 7.6.1. Presseworkshop „Innovative Baumaterialien“

Zum Thema „Innovative Baumaterialien“ hatte Dr. Andreas Battenberg, Pressereferent des Corporate Communications Center der TU München, interessierte Journalisten am 23.04.2013 ins cbm eingeladen. Vertreten waren die Süddeutsche Zeitung, die Zeit, die Schweizer Sonntagszeitung, der Deutschlandfunk, der Bayerische Rundfunk sowie freie Journalisten. Vor der Besichtigung der Labore des cbm führten Professor Dr.-Ing. Christian Große mit dem Vortrag „Gebäude unterm Stethoskop“ und Professor Dr.-Ing. Christoph Gehlen mit „Ultrahochfester Beton“ die Journalisten in ihre jeweiligen Forschungsschwerpunkte ein. Außerdem präsentierte Prof. Dr.-Ing. Jan-Willem van de Kuilen für den Bereich „Holzforschung“ das Thema „Gläserne Douglasie“. Nach einem gemeinsamen Labor-Rundgang bei dem den Journalisten auch mit einigen Experimenten die Forschungsbereiche näher gebracht wurden, blieb viel Gelegenheit, die Fragen der Presse zu beantworten. Um auch die Labore der Holzforschung noch besichtigen zu können, verabschiedeten sich die Teilnehmer des Workshops nach dem Mittagsbüffet Richtung Innenstadt. In den darauffolgenden Monaten erschienen unter anderem ein Beitrag in der Schweizer Sonntagszeitung „Stahlhartes Maschwerk – Ultrahochfester Beton revolutioniert die Baukunst und senkt die CO<sup>2</sup>-Belastung“, ein halbseitiger Bericht in der Süddeutschen Zeitung im Bereich Wissen mit dem Titel „Die absolute Härte – Ingenieure verbessern das wichtigste Baumaterial der Welt: Ultrahochfester Beton ist so stabil wie Stahl, klimafreundlich und beständig.“, oder auch in der Zeit online im Bereich Mobilität „Bröselnde Pfeiler – Deutschlands Infrastruktur ist marode. Brücken, Fernstraßen und Autobahnen sind Sanierungsfälle“. Der Kontakt zur Presse wurde durch den Workshop intensiviert und führt zu vermehrten Anfragen für Stellungnahmen in den Forschungsgebieten des Centrum Baustoffe und Materialprüfung.

### 7.6.2. Filmaufnahmen von Sat1 Bayern und ZDF



Abbildungen: Filmaufnahmen von SAT1.Bayern für den Beitrag „Klein aber fein: Mehr Windenergie in ganz Bayern“, gesendet am 15. August 2013.



Abbildungen: Filmaufnahmen des ZDF in der Material-Prüfhalle des cbm für den Beitrag „Winzige Helfer - Mikroorganismen sollen Brücken sanieren“, gesendet am 28. November 2013 in ZDF heute nacht und am 3. Dezember 2013 in Drehscheibe Deutschland.

## 8. Mitarbeit in Ausschüssen, Arbeitskreisen, Gremien und Fachkommissionen

### RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures)

TC FPC	„Form pressure generated by fresh concrete“	Lowke
TC ISC	„Non destructive in situ strength assessment of concrete“	Große
TC MCM	„On-site measurement of concrete and masonry structures by visualized NDT“	Große
TC MMB	„Methods of measuring moisture in building materials and structures“	Gehlen
TC PSC	„Performance-based specifications and control of concrete durability“	Gehlen/Große
TC TDC	„Test methods to determine durability of concrete under combined environmental actions and mechanical load“	Gehlen

### Comité Européen de la Normalisation (CEN)

TC 104	„Concrete and Related Products“	
TC 104/WG 4	„EN 450 Fly Ash for Concrete“	Heinz
TC 104/SC 1/TG 5	„Use of additions“	Heinz
TC 51/WG 12/TG 5	„Corrosion of Reinforcement“	Gehlen
ECISS/TC 104/ WG 3	„Corrosion Resistant Reinforcing Steels“	Gehlen
ECISS/TC 19	„Concrete reinforcing and prestressing steels - Properties, dimensions, tolerances and specific tests“	Meyer
ISO TC 71/SC/WG 4	„Durability – Service Life Design of Concrete“	Gehlen

### fib (fédération internationale du béton)

Commission 5	„Structural Service Life Aspects“	Gehlen
TG 5.8	„Condition Control and assessment of reinforced concrete structures exposed to corrosive environment“	Gehlen**
TG 5.11	„Calibration of Code deemed to satisfy provisions for durability“	Gehlen**
TG 5.13	„Operational documents to support Service Life Design“	Gehlen
TG 8.7	„Code-type models for concrete behaviour“	Gehlen

### Deutscher Ausschuss für Stahlbeton / DAfStb

TA	„Betontechnik“	Gehlen/Heinz
	AG „Dauerhaftigkeitsbemessung“	Gehlen*
	Ad hoc Gruppe „Sulfatwiderstand“	Heinz*
	UA UHPC	Heinz
	UA Alkali-Rili, AK3, AK1	Heinz
TA	„Bewehrung“	Osterminski
TA	„Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ (AK Rili SIB „Planung“ zur Überarbeitung der Richtlinie)	Gehlen
PA	Programmausschuss „Ermüdung“	Gehlen

### Normenausschuss Bauwesen im DIN (NABau)/ Spiegelausschüsse DIN/DAfStb, Spiegelausschüsse DIN/FGSV

NA 021-00-03 AA	„Betonstahl und Spannstahl“	Gehlen* Meyer
NA 021-00-08-02 UA	„Walzdraht zum Ziehen“	Meyer

NA 005-02-10 AA	„Dach und Dichtungsbahnen“	Wallner
NA 005-02-19 AA	„Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen“	Wallner
NA 005-07-02 AA	„Betontechnik“ (Sp CEN/TC 104)	Gehlen/Heinz
	Ad hoc Gruppe „Sulfatwiderstand“	Heinz*
	UA UHPC	Heinz
	UA Alkali-Rili, AK3, AK1	Heinz
NA 005-07-03 AA	„Bewehrung (Betonstahl, Spannstahl)“	Volkwein
NA 005-07-06 AA	„Schutz, Instandsetzung, Verstärkung“ (Sp CEN/TC 104/SC 8)	Gehlen
NA 005-07-13 AA	„Zement“ (Sp zu Teilbereichen von CEN/TC 51 und ISO/TC 74)	Heinz
NA 005-10-10	„Asphalt“	Wörner
NA 062-03-32	„Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel“	Wörner

### Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Arbeitsausschuss „Korrosion und Korrosionsschutz“	Keßler
---	--------

### Sachverständigenausschüsse d. Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt)

	Betontechnologie	
SVA 1	SVA-A „Betonstähle, Betonstahlverbund“	Volkwein
	SVA-B „Betonstähle, Betonstahlverbund“	Volkwein
SVA 2	SVA-A „Bewehrter Poren- und Leichtbeton“	Gehlen
	SVA-B „Bewehrter Poren- und Leichtbeton“	Gehlen
SVA 3	SVA-A „Betontechnologie“	Heinz
	SVA-B1 „Bindemittel“	Heinz
	SVA-B2 „Betonzusatzmittel“	Heinz
	SVA-B3 „Betonzusatzstoffe“	Heinz
	SVA-B5 „Betone“	Heinz
PG	Projektgruppe „Instandsetzungssysteme für Beton“	Gehlen
PG	Projektgruppe „Hütten, Sand, Mehl als Betonzusatzstoff“	Gehlen
PG	Projektgruppe „Sulfat-Widerstandsprüfung“	Gehlen
ad hoc-Ausschuss	„Nicht metallische Bewehrung“	Heinz
SVA 12	SVA-A „Spannstähle“	Volkwein
	SVA-B1 „Spannstähle“	Volkwein
SVA 72	SVA-A „Bauwerks- und Dachabdichtungen“	Wallner
	SVA-B „Bauwerks- und Dachabdichtungen“	Wallner
PG	Projektgruppe „Bahnen zur Dach- und Bauwerksabdichtung“	Wallner
PG	Projektgruppe „Flüssig aufzubringende Bauwerksabdichtungen“	Wallner
PG	Projektgruppe „Fugenabdichtungen“	Wallner
PG	Projektgruppe „Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen“	Wallner

### FGSV Forschungsgesellschaft Straßen- und Verkehrswesen

LA 6.0	Lenkungsausschuss der Arbeitsgruppe AG 6 „Gesteinskörnungen“	Westiner
AA 6.1	Gesteinskörnungen	Westiner*
AK 6.1.1	Polierresistenz und Polierprüfung	Westiner
AK 6.1.3	Sandeigenschaften	Westiner
AA 6.2	Industrielle Nebenprodukte und Recycling-Baustoffe	Westiner
AA 6.3	Schichten ohne Bindemittel	Neidinger
AK 6.3.1	Infiltrationsverfahren	Neidinger

LA 7	Lenkungsausschuss „Asphaltbauweisen“	Wörner
AA 7.2	Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel	Wörner
AK 7.2.1	Bitumen und modifizierte Bitumen	Wallner
AK 7.2.2	Bitumenemulsionen und bitumenhaltige Bindemittel	Wörner*
AA 7.3	Bauweisen	Wörner
AA 7.6	Prüfung von Asphalt	Wörner
AK 7.6.1	Entwicklung von Prüfverfahren	Wörner
AA 7.6.2	Mörtelkomponenten	Westiner
AK 7.6.4	Laboratoriumstechnik	Wörner*
LA 8	Lenkungsausschuss „Betonbauweisen“	Gehlen
AA 8.2	Baustoffe	Gehlen
AA 8.4	Oberflächen	Skarabis
Kommentar-Gruppe	„Asphaltstraßen“	Wörner*

#### **DIN/FGSV Spiegelausschüsse**

313/6.2.0.2	Gesteinskörnungen, Prüfverfahren, Petrographie, Probenahme	Westiner
07.15.00	Gesteinskörnungen und Mörtel	Westiner

#### **Arbeitsgemeinschaft Deutscher Zertifizierungs-, Überwachungs- und Prüfstellen für Bewehrungen (ADZB)**

Volkwein/Meyer

#### **Nationale Kontaktstelle NKS**

Expertengremium	„Umwelttechnologien“, „Werkstoffe“ im 7. FRP der EU	Große
-----------------	---	-------

#### **DGZfP – Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung**

FA	ZfP im Bauwesen, UA „Korrosionsnachweis“	Gehlen
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Impakt-Echo“	Große
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Ultraschallprüfungen“	Große
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Feuchte“	Große
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Baugrunduntersuchungen“	Große
FA	Hochschullehrer ZfP	Große
FA	Schallemissionsprüfverfahren	Große
FA	Thermographie der DGZfP	Richter

#### **Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. - GFKORR**

AK	„Korrosion im Bauwesen“	Gehlen
----	-------------------------	--------

#### **DGEG**

2.3	Asphaltwasserbau	Wörner
-----	------------------	--------

#### **Carbon Composites e.V.**

AK	NDE in Werkstoff- und Bauteilprüfung	Große
AK	Faserverstärkung im Bauwesen	Große
AK	Materialien und Prozesse	Große

## **GCTP – German Construction Technology Platform**

Lenkungsgruppe	Große
AG Networks	Große
AG Cultural Heritage	Große
AG Underground Construction	Große

## **Gutachtertätigkeit**

DFG – Fachkollegium Bau	
Österreichische Forschungsförderungsges.mbH, Wien, Österreich	
FWO, Fonds Wetenschappelijk Onderzoek, Brüssel, Belgien	
Studienstiftung des Deutschen Volkes, Bonn	Gehlen/Heinz/Große
Carl Zeiss Stiftung (Wissenschaftler-Rückkehrprogramm GSO/CZS)	Große
MIT Massachusetts Institute of Technology; "Sustainability of Kuwait's Built Environment"	Große
Wissenschaftliche Kommission Niedersachsen	Große
ANR, Agence Nationale de la Recherche, French National Research Agency	Große

## **TAA Sand und Kiesindustrie / Natursteinindustrie**

Wörner / Westiner

## **Bayert**

Wörner

## **DACH Deutsche Akkreditierungsstelle Chemie**

Heinz

## **Nanocem scientific committee**

Heinz

## **American Concrete Institute (ACI)**

Gehlen

## **VDI/VDE-GMA FA 2.12 Strukturanalyse und -überwachung in der Bautechnik**

Große

\* = Obmann / \*\* = Chairman

**Prof. Christoph Gehlen****Gehlen, C.:**

Dauerhaftigkeitsbemessung und Lebenszyklus von Stahlbetonbauwerken.

Innovative Betontechnologien, 02.-03.10.2013, Moskau, russischer Tagungsband

**Gehlen, C.:**

Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen - Nachweisformate.

17. Münchener Massivbau Seminar, 22.11.2013, Tagungsband S. 61-67

**Gehlen, C.; von Greve-Dierfeld, S.:**

Lebensdauer von Stahlbetonbauteilen - Empfehlungen für eine modifizierte deskriptive Bemessung. Band 1, Kapitel III.

In: Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos, Johann-Dietrich Wörner (Hrsg.): Beton-Kalender 2013. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2013, S. 223-270

**Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.:**

Rheology of Fibre Reinforced Fine-Grained High Performance Concrete for Thin-Walled Elements - Effect of Type and Content of Steel Fibres.

1st International RILEM Conference on Rheology and Processing of Construction Materials and the 7th RILEM Conference on Self-Compacting Concrete, 02.-04.09.2013, Paris, Proc. S. 309 - 316

**Kessler, S.; Gehlen, C.:**

Reliable identification of corrosion in reinforced concrete structures.

Proc. 11th International Conference on Structural Safety & Reliability, ICOSSAR, June 16-20, 2013, Columbia University, New York

**Kessler, S.; Gehlen, C.:**

Studie zur Potentialfeldmessung an 40 Jahre alten Stahlbetonbauteilen vom Olympiastadion München. Beton- und Stahlbetonbau, Volume 108 (9), 2013, S. 620-629

**Keßler, S.; Gehlen, C.:**

Numerical Evaluation of ROC of Potential Mapping.

5th European-American Workshop on Reliability of NDE, 7.-10.10.2013

**Kränkel, T.; Lowke, D.; Rosa, S.O.; Gehlen, C.:**

Deaeration and segregation tendencies of highly flowable concrete owing to vibration. International Conference on Advances in Cement and Concrete Technology in Africa (ACCTA), January 28th – 30th 2013; Emperor's Palace, Johannesburg

**Lowke, D.; Illguth, S.; Kränkel, T.; Gehlen, C.:**

Rheological Optimization of Flowable Concretes Based on Computational Fluid Dynamics (CFD).

7th RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete and of the 1st RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials, 02.-04.09.2013, Paris

**Rahimi, A.; Gehlen, C.; Reschke, T.; Westendarp, A.:**

Long-Term Performance of Concrete Structures in a Marine Environment - Measured and Calculated.

Proceedings of Int. Conf. Concrete under Sever Conditions - Environment and Loading (CONSEC13), September 23-25, 2013, Nanjing, China

**Rahimi, A.; Gehlen, C.; Reschke, T.; Westendarp, A.:**

Approaches for Modelling the Residual Service Life of Marine Concrete Structures after Repair.

Proceedings of Int. Conf. Concrete under Sever Conditions - Environment and Loading (CONSEC13), September 23-25, 2013, Nanjing, China

**Strehlein, D.; Lowke, D.; Pathe, E.; Gehlen, C.;****Schießl, P.:**

Neue Erkenntnisse zur Verringerung von Dunkelverfärbungen an Sichtbetonoberflächen. beton, Jahrgang 2013, Ausgabe 5, S. 176

**Thiel, C.; Götzfried, F.; Gehlen, C.:**

Physikalische und chemische Auswirkungen von tauenden Chloriden auf Betone von Verkehrsbauwerken / Physical and chemical Effects on Concrete of Roads and Bridges caused by De-icing Chlorides.

Straße und Autobahn, 64. Jahrgang (Heft 9), 2013, S. 684-688

**Volkwein, A.; Weirich, T.; Gehlen, C.:**

Ermüdung der Bewehrung ohne und mit Korrosion.

Erhaltung von Bauwerken, 3. Kolloquium. 22. und 23. Januar 2013 mit CD-ROM, Hrsg.: Technische Akademie Esslingen -TAE-, Ostfildern3. Kolloquium, Selbstverlag

**Zintel, M.:**

Epoxidharzbeschichtete Bewehrung im Praxiseinsatz.  
11. Münchener Baustoffseminar: Bewehrungen im Betonbau - Tragfähig? Dauerhaft? Inspizierbar?, Centrum Baustoffe und Materialprüfung, TUM, 12.04.2013

**Zintel, M.; Gehlen, C.; Kessler, S.:**

Epoxidharzbeschichtete Bewehrung in der Praxis - Bewertung der Korrosionsschutzwirkung nach 21 Jahren Nutzungsdauer anhand eines deutschen Pilotprojektes.  
in: Erhaltung von Bauwerken, 3. Kolloquium. 22. und 23. Januar 2013 mit CD-ROM, Hrsg.: Technische Akademie Esslingen -TAE-, Ostfildern3. Kolloquium, Selbstverlag S. 239-247

**v. Greve-Dierfeld, S.; Gehlen, C.:**

Lebensdauerbemessung - Anwendung und Validierung.  
Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen auf Bewehrungskorrosion, Teil 2 Dauerhaftigkeitsbemessung (Heft 602), 2013, S. 131-167

**Prof. Christian Große****Grande García, E.; Schweikle, M.; Föhr†, P.; Stark, F.; Grosse, C.; Burgkart, R.:**

Three dimensional characterisation of compressional wave velocities in bovine and porcine femoral bone.  
European Symposium on Ultrasonic Characterization of Bone Granada, 2013 Session IV: US characterization

**Grosse, C.:**

Structural health monitoring of constructions - new developments.  
in: russische Ausgabe der Beton und Eisenbeton - Anlagen, Stoffe, Technologien, 2013

**Grosse, C.:**

Konzepte für die inter fakultative Lehre im Fach Zerstörungsfreie Prüfung.  
In: Nothnagel & Twelmeier (Hrsg.): Baustoff und Konstruktion. Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 359-374

**Grosse, C.; Malm, F.; van Tittelboom, K.; de Belie, N.:**

Overview of Nondestructive Testing Techniques for the Observation of Healing Effects in Cementitious Materials.  
6th Kumamoto International Workshop on Fracture, Acoustic Emission and NDE in Concrete, 17.-18.09.2013

**Grosse, C.; Richter, R.; Ozbolt, J.:**

Combined acoustic emission and simulation approach to study fracture behavior of concrete under fire load.  
8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-8, March 10-14, 2013, Toledo-Spain

**Grosse, C.; Schumacher, T.:**

Anwendungen der Schallemissionsanalyse an Betonbauwerken.  
Bautechnik, Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau, 2013 Bautechnik Volume 90, Issue 11, pp 721-731, November 2013

**Grosse, C.; Van Tittelboom, K.; De Belie, N.:**

Non-destructive testing techniques for the observation of healing effects in cementitious materials – an introduction.  
4th International Conference on Self-Healing Materials - ICSHM 2013, Belgium on 16-20 June 2013

**Jüngert, A.; Grosse, C.; Krüger, M.:**

Local Acoustic Resonance Spectroscopy (LARS) for Glass Fiber-Reinforced Polymer Applications.  
Journal of Nondestructive Evaluation, December 2013, Springer US, Print ISSN 0195-9298

**Malm, F.; Richter, R.; Stark, F.; Grande, E.; Föhr, P.; Burgkart, R.; Große, C.:**

Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Bruchprozessen an Femur-Knochen.  
19. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. – 13. September 2013, Augsburg

**Moser, D.; Poelchau, M.; Stark, F.; Grosse, C.:**

Application of nondestructive testing methods to study the damage zone underneath impact craters of MEMIN laboratory experiments.  
Hrsg.: The Meteoritical Society: Meteoritics & Planetary Science, Volume 48, Issue 1, pages 87-98, January 2013, Wiley Online Library

**Ozbolt, J., Grosse C., Richter R.:**

Combined acoustic emission and simulation approach to study fracture behavior of concrete under fire load.  
8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-8, March 10-14, 2013, Toledo, Spain

**Radlmeier, M.; Richter, R.; Grosse, C.:**

Automatische Qualitätsbeurteilung der Ersteinsatzbestimmung von Schallemissionssignalen mit Hilfe von autoregressiven Pickerfunktionen.

19. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. – 13. September 2013, Augsburg

**Richter, R. ; Malm, F. ; Grosse, C.:**

Lokalisierung von Schallemissionsereignissen in Probekörpern mit veränderlicher und inhomogener Schallgeschwindigkeitsverteilung.

19. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. – 13. September 2013, Augsburg

**Richter, R.; Dehn, F.; Schmidt, J.; Juknat, M.; Grosse C.:**

Measurement systems to detect the time-dependant development of concrete spalling under fire exposure.

MATEC Web of Conferences, Concrete Spalling due to Fire Exposure: Proceedings of the 3 rd International Workshop. Paris, France, September 25-27, 2013

**Richter, R.; Grosse, C.; Portner, B.; Raith, M.:**

Auswertemöglichkeiten und Darstellung von Schallemissionsdaten am Beispiel von Brandexperimenten.

DGZfP-Jahrestagung 2013, 19. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. – 13. September 2013, Augsburg

**Richter, R.; Malm, F.; Grosse, C.:**

Lokalisierung von Schallemissionsereignissen in Probekörpern mit veränderlicher und inhomogener Schallgeschwindigkeitsverteilung.

19. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. – 13. September 2013, Augsburg

**Stark, F.; Schlamp, V.; Große, C.:**

Zerstörungsfreie Prüfung der Flügelblätter von Vertikal- und Horizontalwindenergieanlagen mit der THz-Methode und der Lockin-Thermografie.

Thermographie-Kolloquium 2013, 26.-27.09.2013, Stuttgart

**Prof. Detlef Heinz**

**Heinz, D.:**

Neue AKR-Regelungen - Was gilt in Bayern.

Mitgliederversammlung des Bayerischen Baustoffüberwachungs- u. Zertifizierungsverein, BAYBÜV e.V., 11.04.2013, Bad Gögging

**Heinz, D.; Gerlicher, T.; Urbonas, L.:**

Ultra-High Performance Concrete Mixes with Reduced Portland Cement Content.

Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering (DARNIO JI ARCHITEKTURA IR STATYBA) 3 (4),

**Hilbig, H.; Gmell, A.; Nakonz, M.; Heinz, D.:**

Laser Ablation ICP-MS for Spatially Resolved Element Analysis. 3. Munich School of Engineering-Kolloquium, 04.07.2013

**Müllauer, W.; Beddoe, R.E.; Heinz, D.:**

Sulfate attack expansion mechanisms.

Cement and Concrete Research, Volume 52, 2013, S. 208-215

**Wang, Y.; Urbonas, L., Heinz, D.:**

Application of PCE Superplasticizer in FGD-gypsum-based Multi-component Binder Systems. 1st International Conference on the Chemistry of Construction Materials, 2October 7-9, 2013, Berlin, S. 303

**AG 1 Bindemittel und Zusatzstoffe**

**Heinz, D.; Gerlicher, T.; Urbonas, L.:**

Ultra-High Performance Concrete Mixes with Reduced Portland Cement Content.

Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering (DARNIOJI ARCHITEKTURA IR STATYBA) 3 (4),

**Müllauer, W.; Beddoe, R.E.; Heinz, D.:**

Sulfate attack expansion mechanisms.

Cement and Concrete Research, Volume 52, 2013, S. 208-215

**Siauciunas, R.; Mikaliunaite, J.; Urbonas, L.:**

Tribochemical and thermal activation of  $\alpha$ -C<sub>2</sub>S hydrate as precursor for cementitious binders.  
CEEC-TAC2, 2nd Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry, 27.-30.08.2013, Vilnius, Lithuania, PS 2.54

**Wang, Y.; Urbonas, L., Heinz, D.:**

Application of PCE Superplasticizer in FGD-gypsum-based Multi-component Binder Systems. 1st International Conference on the Chemistry of Construction Materials, 2October 7-9, 2013, Berlin, S. 303

**AG 2 Betontechnologie****Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.:**

Rheology of Fibre Reinforced Fine-Grained High Performance Concrete for Thin-Walled Elements - Effect of Type and Content of Steel Fibres.  
1st International RILEM Conference on Rheology and Processing of Construction Materials and the 7th RILEM Conference on Self-Compacting Concrete, 02.-04.09.2013, Paris, S. 309 - 316

**Kränkel, T.; Lowke, D.; Rosa, S.O.; Gehlen, C.:**

Deaeration and segregation tendencies of highly flowable concrete owing to vibration. International Conference on Advances in Cement and Concrete Technology in Africa (ACCTA), January 28th – 30th 2013; Emperor's Palace, Johannesburg

**Lowke, D.; Illguth, S.; Kränkel, T.; Gehlen, C.:**

Rheological Optimization of Flowable Concretes Based on Computational Fluid Dynamics (CFD).  
7th RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete and of the 1st RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials, 02.-04.09.2013, Paris

**Skarabis, J., Gehlen, C.:**

Lärminderung von Betonfahrbahndecken.  
Aachener Fahrbahnoberflächensymposium, RWTH Aachen, 16.05.2013

**Skarabis, J.:**

Betonstraßenbau im Ausland - Bericht des Preisträgers 2011  
Tagungsband der Betonstraßentagung der FGSV, 2013 (19.-20.09.2013, Karlsruhe)

**Strehlein, D.; Lowke, D.; Pathe, E.; Gehlen, C.; Schießl, P.:**

Neue Erkenntnisse zur Verringerung von Dunkelverfärbungen an Sichtbetonoberflächen.  
beton, Jahrgang 2013, Ausgabe 5, S. 176

**Thiel, C.; Götzfried, F.; Gehlen, C.:**

Physikalische und chemische Auswirkungen von tauenden Chloriden auf Betone von Verkehrsbauwerken / Physical and chemical Effects on Concrete of Roads and Bridges caused by De-icing Chlorides.  
Straße und Autobahn, 64. Jahrgang (Heft 9), 2013, S. 684-688

**AG 3 Stahl und Korrosion****Beck, M.; Beckert, A.; Hanisch, J.; Isecke, B.; Osterminski, K.; Raupach, M.; Schießl, P.; Tian, W.; Warkus, J.:**

Deterioration model and input parameters for reinforcement corrosion.  
Structural Concrete - Journal of the fib 13 (3), 2013, S. 145 - 155

**Gehlen, C.; von Greve-Dierfeld, S.:**

Lebensdauer von Stahlbetonbauteilen - Empfehlungen für eine modifizierte deskriptive Bemessung.  
Band 1, Kapitel III. In: Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos, Johann-Dietrich Wörner (Hrsg.): Beton-Kalender 2013. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2013, S. 223-270

**Kessler, S.:**

Potentialfeldmessung - Untersuchung von Einflussfaktoren an natürlich korrodierten Stahlbetonprobekörpern.  
11. Münchener Baustoffseminar: Bewehrungen im Betonbau - Tragfähig? Dauerhaft? Inspizierbar?, Centrum Baustoffe und Materialprüfung, TUM, 12.04.2013

**Kessler, S.; Gehlen, C.:**

Reliable identification of corrosion in reinforced concrete structures.  
Proc. 11th International Conference on Structural Safety & Reliability, ICOSSAR, June 16-20, 2013, Columbia University, New York

**Kessler, S.; Gehlen, C.:**

Studie zur Potentialfeldmessung an 40 Jahre alten Stahlbetonbauteilen vom Olympiastadion München. Beton- und Stahlbetonbau, Volume 108 (9), 2013, S. 620-629

**Keßler, S; Gehlen, C.:**

Numerical Evaluation of ROC of Potential Mapping.  
5th European-American Workshop on Reliability of NDE,  
7.-10.10.2013

**Osterminski, K.:**

Ingenieurmodell für die Korrosion von Stahl in Beton.  
11. Münchener Baustoffseminar: Bewehrungen im Beton-  
bau - Tragfähig? Dauerhaft? Inspizierbar?, Centrum Bau-  
stoffe und Materialprüfung, TUM, 12.04.2013

**Rahimi, A.; Gehlen, C.; Reschke, T.; Westendarp, A.:**

Long-Term Performance of Concrete Structures in a Mari-  
ne Environment - Measured and Calculated.  
Proceedings of Int. Conf. Concrete under Sever Condi-  
tions - Environment and Loading (CONSEC13), Septem-  
ber 23-25, 2013, Nanjing, China

**Rahimi, A.; Gehlen, C.; Reschke, T.; Westendarp, A.:**

Approaches for Modelling the Residual Service Life of  
Marine Concrete Structures after Repair.  
Proceedings of Int. Conf. Concrete under Sever Condi-  
tions - Environment and Loading (CONSEC13), Septem-  
ber 23-25, 2013, Nanjing, China

**Volkwein, A.:**

Zur Ermüdung der Bewehrung - Eine schwierige Prognose.  
11. Münchener Baustoffseminar: Bewehrungen im Beton-  
bau - Tragfähig? Dauerhaft? Inspizierbar?, Centrum Bau-  
stoffe und Materialprüfung, TUM, 12.04.2013

**Volkwein, A.; Weirich, T.; Gehlen, C.:**

Ermüdung der Bewehrung ohne und mit Korrosion.  
in: Erhaltung von Bauwerken, 3. Kolloquium. 22. und 23.  
Januar 2013 mit CD-ROM,  
Hrsg.: Technische Akademie Esslingen -TAE-, Ostfildern3.  
Kolloquium, Selbstverlag

**v. Greve-Dierfeld, S.; Gehlen, C.:**

Lebensdauerbemessung - Anwendung und Validierung.  
Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen auf  
Bewehrungskorrosion, Teil 2 Dauerhaftigkeitsbemessung  
(Heft 602), 2013, S. 131-167

**Zintel, M.:**

Epoxidharzbeschichtete Bewehrung im Praxiseinsatz.  
11. Münchener Baustoffseminar: Bewehrungen im Beton-  
bau - Tragfähig? Dauerhaft? Inspizierbar?, Centrum Bau-  
stoffe und Materialprüfung, TUM, 12.04.2013

**Zintel, M.; Gehlen, C.; Kessler, S.:**

Epoxidharzbeschichtete Bewehrung in der Praxis - Be-  
wertung der Korrosionsschutzwirkung nach 21 Jahren  
Nutzungsdauer anhand eines deutschen Pilotprojektes.  
in: Erhaltung von Bauwerken, 3. Kolloquium. 22. und 23.  
Januar 2013 mit CD-ROM, Hrsg.: Technische Akademie  
Esslingen -TAE-, Ostfildern3. Kolloquium, Selbstverlag  
S.239-247

**AG 4 Chemie****Buchwald, A.; Vanooteghem, M.; Gruyaert, E.; Hilbig, H.; De Belie, N.:**

Purdocement: application of alkali-activated slag cement  
in Belgium in the 1950s.  
In: RILEM (Hrsg.): Materials and Structures. Springer Ver-  
lag, 2013

**Gutberlet, T.; Hilbig, H.; Beddoe, R.E.:**

Acid Attack on Concrete – Structure of the Corroded Sur-  
face Layer.  
1st International Conference on the Chemistry of Const-  
ruction Materials, 07.-09.10.2013,  
S. 363 - 366

**Gutberlet, T.; Hilbig, H.; Beddoe, R.E.; Lohstroh, W.:**

New insights into water bonding during early tricalcium  
silicate hydration with quasilastic neutron scattering.  
Cement and Concrete Research (51), 2013, pp.104-108

**Hilbig, H.; Gmell, A.; Nakonz, M.; Heinz, D.:**

Laser Ablation ICP-MS for Spatially Resolved Element  
Analysis. 3. Munich School of Engineering-Kolloquium,  
04.07.2013

**AG 5 Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine****Hutschenreuther, J.; Wörner, Th.:**

Asphalt im Straßenbau. Kirschbaum Verlag (2. Aufl.), 2013

**Wörner, Th.; Neidinger, S.; Westiner, E.:**

Granulometrische Eigenschaften von feinen Gesteinskör-  
nungen.  
Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtent-  
wicklung, Abt.Straßenbau, Bonn: Bundesministerium für  
Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Fachverlag NW in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH (Bremen), 2013

## AG 6 Zerstörungsfreie Prüfung

**Grande García, E.; Schweikle, M.; Föhr, P.; Stark, F.; Grosse, C.; Burgkart, R.:**

Three dimensional characterisation of compressional wave velocities in bovine and porcine femoral bone. European Symposium on Ultrasonic Characterization of Bone Granada, 2013 Session IV: US characterization

**Grosse, C.; Malm, F.; van Tittelboom, K.; de Belie, N.:**  
Overview of Nondestructive Testing Techniques for the Observation of Healing Effects in Cementitious Materials. 6th Kumamoto International Workshop on Fracture, Acoustic Emission and NDE in Concrete, 17.-18.09.2013

**Grosse, C.; Richter, R.; Ozbolt, J.:**  
Combined acoustic emission and simulation approach to study fracture behavior of concrete under fire load. 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-8, March 10-14, 2013, Toledo-Spain

**Malm, F.; Richter, R.; Stark, F.; Grande, E.; Föhr, P.; Burgkart, R.; Große, C.:**  
Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Bruchprozessen an Femur-Knochen. 19. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. – 13. September 2013, Augsburg

**Moser, D.; Poelchau, M.; Stark, F.; Grosse, C.:**  
Application of nondestructive testing methods to study the damage zone underneath impact craters of MEMIN laboratory experiments. Hrsg.: The Meteoritical Society: Meteoritics & Planetary Science, Volume 48, Issue 1, pages 87–98, January 2013, Wiley Online Library

**Ozbolt, J., Grosse C., Richter R.:**  
Combined acoustic emission and simulation approach to study fracture behavior of concrete under fire load. 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-8, March 10-14, 2013, Toledo, Spain

**Radlmeier, M.; Richter, R.; Grosse, C.:**  
Automatische Qualitätsbeurteilung der Ersteinsatzbestimmung von Schallemissionssignalen mit Hilfe von autoregressiven Pickerfunktionen. 19. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. – 13. September 2013, Augsburg

**Richter, R. ; Malm, F. ; Grosse, C.:**  
Lokalisierung von Schallemissionseignissen in Probekörpern mit veränderlicher und inhomogener Schallgeschwindigkeitsverteilung. 19. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. – 13. September 2013, Augsburg

**Richter, R.; Dehn, F.; Schmidt, J.; Juknat, M.; Grosse C.:**  
Measurement systems to detect the time-dependant development of concrete spalling under fire exposure. MATEC Web of Conferences, Concrete Spalling due to Fire Exposure: Proceedings of the 3rd International Workshop. Paris, France, September 25-27, 2013

**Richter, R.; Grosse, C.; Portner, B.; Raith, M.:**  
Auswertemöglichkeiten und Darstellung von Schallemissionsdaten am Beispiel von Brandexperimenten. DGZfP-Jahrestagung 2013, 19. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. – 13. September 2013, Augsburg

**Richter, R.; Malm, F.; Grosse, C.:**  
Lokalisierung von Schallemissionseignissen in Probekörpern mit veränderlicher und inhomogener Schallgeschwindigkeitsverteilung. 19. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. – 13. September 2013, Augsburg

**Stark, F.; Schlamp, V.; Große, C.:**  
Zerstörungsfreie Prüfung der Flügelblätter von Vertikal- und Horizontalwindenergieanlagen mit der THz-Methode und der Lockin-Thermografie. Thermographie-Kolloquium 2013, 26.-27.09.2013, Stuttgart

## 10. Ausgewählte Veröffentlichungen

In: **Cement & Concrete Composites**, Volume 34, Issue 5, (2012), pp 618-626

### 10.1. Effect of carbonation, chloride and external sulfates on the leaching behaviour of major and trace elements from concrete

Wolfram Müllauer, Robin E. Beddoe and Detlef Heinz

#### Abstract

The effect of the exposure of concrete structural components to  $\text{CO}_2$ , chloride and external sulfates on the leaching of major and trace elements (Al, Ca, K, Na, S, Si, Ba, Sr, Cr and V) was investigated for concrete made with OPC and fly ash using a tank leach test and the Dutch availability test NEN 7341. Concrete specimens were carbonated under natural and accelerated conditions (2 vol.%  $\text{CO}_2$ ) before testing. Exposure to chloride or external sulfates was simulated by adding NaCl (30 g/L) or  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (3 or 30 g  $\text{SO}_4^{2-}$ /L) to the tank leach test eluent. The results show that concrete leaching depends significantly on the abovementioned environmental factors. In particular, the cumulative release of Cr during the tank leach test increased proportionally to carbonation depth. More V was released from carbonated concrete. Replacement of the cement by a fly ash with more Cr and V had no discernible effect on Cr release, but resulted in additional V release in proportion to the level of cement replacement. Exposure of concrete to NaCl solution enhanced the release of Cr, but not V. Exposure to  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  solution increased the release of Cr and V considerably. It is suggested that the dissolution of  $\text{CrO}_4^{2-}$  and  $\text{VO}_4^{3-}$  substituted AFt/AFm governs the leaching of Cr and V.

#### 1. Introduction

At present, increasing attention is being paid to the potential leaching of heavy metals from concrete structural components, in particular, in view of the increasing use of secondary fuels in cement production and additions like fly ash or slag in concrete which generally lead to larger amounts of heavy metals in concrete. Heavy metals are leached into water in contact with concrete surfaces by direct dissolution of surface phases and/or diffusion through the pore solution to the concrete surface. The solubility of heavy metals depends on their bonding in the hydration products as well as their ability to form aqueous complexes and precipitate solubility-controlling phases. Thus van der Sloot [1] observed no distinct correlation between the total amounts of Cr, Mo, Pb, V and Zn in mortar and their availability as defined by the Dutch availability test NEN 7341 [2], i.e. their soluble content with respect to dry specimen weight. Consequently, the evaluation of environmental risks cannot be based on the total amounts of trace metals contained in concrete alone, but requires better understanding of the mechanisms involved in leaching. In addition to this, leaching is affected by the actual environmental conditions at the surface of concrete structural components. These include exposure to  $\text{CO}_2$  and NaCl. The latter is commonly used as a deicing agent for concrete highways in moderate and cold climates. Sometimes concrete is exposed to sulfates in groundwater or soil. Such effects are not considered by contemporary leach tests with water which are used to assess the release of environmentally relevant substances from concrete. Incorrect assessment may lead, on the one hand, to underestimation of the actual release of toxic substances or, on the other hand, to the restriction of otherwise useful construction materials.

Since carbonation results in a reduction in pH of the pore solution of concrete, dissolution of the hydration products as well as changes in porosity and pore size distribution, it is expected to affect the solubility and transport of major and trace elements in the pore solution and therefore their leaching behaviour. Despite this, relatively little is known about the effect of carbonation on the release of heavy metals from concrete. Andac and Glasser [3] and Van Gerven et al. [4] investigated the effect of CO<sub>2</sub> on the leaching of metals from cement-stabilized municipal solid waste incineration fly ash by bubbling pure CO<sub>2</sub> through the leachant. The latter authors noted a significant increase in the leaching of Cr, Zn, Ni and Co. However, CO<sub>2</sub> bubbling tends to produce very low pH values and amounts of dissolved CO<sub>2</sub> much in excess of those occurring naturally. Another approach is to compare the leaching of carbonated and non-carbonated specimens. Usually the carbonation process is accelerated in climatic chambers with high CO<sub>2</sub> concentrations or by the use of super critical CO<sub>2</sub> [5-7]; the method chosen affecting the degree of carbonation and leaching behaviour. Van Gerven et al. [5] observed a reduction of the leaching of Ca, Ba, Cu and Pb from mortar specimens by carbonation.

Penetrating chloride is also expected to affect the solubility of major and trace elements in the pore solution. Thus, for example, according to You et al. [8] Cr may be released from ettringite which is able to incorporate Cr(VI). Opposed to this, it has been reported by Dai et al. [9] that Cr (VI) can be fixed by adsorption on Friedel's salt, an AFm phase formed in the presence of chlorides.

Exposure of concrete structural components to external sulfates leads to deterioration owing to the formation of the expansive phases, ettringite and gypsum, whereas portlandite, AFm phases and C-S-H tend to dissolve, see for example Müllauer et al. [10, 11]. It is likely that external sulfates affect the solubility of trace metals and thus their leaching behaviour.

This paper focuses on the effect of carbonation, exposure to NaCl and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions on the leaching behaviour of Al, Ca, K, Na, S, Si, Ba, Sr, Cr and V from concrete made with OPC and fly ash. The Dutch availability test NEN 7341 and a German tank leach test [12] were used.

## 2. Materials and Methods

The experiments were carried out with concretes made from OPC and a fly ash with the chemical compositions listed in Table 1. The materials were analysed by ICP-OES after digesting in nitric acid. This particular fly ash resulted in a marked increase in the amounts of V, Cr, Ba and Sr in the concrete.

Five different concrete compositions differing in the amount of fly ash were used, Table 2. The concretes were prepared at a total binder content of 450 kg/m<sup>3</sup> and an equivalent water binder ratio w/beq of 0.60. The equivalent water/binder ratio is used in German regulations for mixes with fly ash [13] where a factor k accounts for the amount of fly ash considered as binder, the rest being regarded as inert filler. The aggregate was Munich sand 0/4 mm and 4/8 mm gravel graded at A8/B8. Concrete cubes (100 mm) were cast from moulds lined with PTFE sheeting to avoid contamination of the concrete by a release agent. After 24 hours at 20°C and 98 % RH in climatic cabinet, the samples were demoulded, tightly wrapped in polyethylene foil and stored over water for 90 days.

Table 1: Chemical composition of the initial materials

Substance	Unit	Cement	Fly ash	Sand	Gravel
SiO <sub>2</sub>	wt. %	13.95	50.40	26.66	14.34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		5.35	27.31	1.76	1.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		4.88	4.79	1.00	0.74
TiO <sub>2</sub>		-	1.50	0.09	0.07
CaO		61.44	7.29	30.85	36.24
MgO		1.20	1.49	6.89	8.59
MnO		0.55	0.06	0.04	0.03
SO <sub>3</sub>		2.95	0.46	0.01	0.01
K <sub>2</sub> O		0.78	1.52	0.24	0.10
Na <sub>2</sub> O		0.22	0.28	0.22	0.14
Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>		0.73	1.28	0.38	0.20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.17	1.06	0.00	0.00
LOI		1.21	2.48	32.11	38.31
Cr	mg/kg	97.7	343.6	31.0	44.0
V		41.0	336.0	5.0	6.0
Ba		217.0	1645.0	17.0	23.0
Sr		218.0	1723.0	127.0	129.0

In order to investigate the effect of carbonation on leaching, the cubes were unwrapped and stored for 154 days at 20°C in the following controlled conditions.

- (i) Argon for non-carbonated reference samples
- (ii) 65 % RH with ambient CO<sub>2</sub> concentrations for natural carbonation
- (iii) 2 vol.% CO<sub>2</sub>, 65 % RH to accelerate the carbonation process

Afterwards, carbonation depths were determined by spraying a phenolphthalein solution onto freshly fractured surfaces of companion specimens. The main specimens were all conditioned at 20°C and 65 % RH for a further 28 days before performing the tank leach tests. Two separate specimens were investigated for each concrete composition and storage condition. Each specimen was immersed in distilled water (VS = 90 L/m<sup>2</sup>) in a polyethylene container and the space above the water flooded with argon to minimize carbonation during the experiments. After 1, 3, 7, 16, 32 and 56 days the concentrations of Ca, Na, K, Al, S, Si, Cr, V, Ba and Sr in the eluates were determined by ICP-OES, the pH determined by titration and the eluent renewed. After each step, the containers were flooded with argon again and resealed. An overview of specimen storage is given in Fig. 1.

Table 2: Concretes used in the experiments

Concrete	Cement c kg/m <sup>3</sup>	Fly ash f		Aggregate a kg/m <sup>3</sup>	w/b <sub>eq</sub> <sup>b</sup>	w/b <sup>c</sup>	Water w kg/m <sup>3</sup>
		%	kg/m <sup>3</sup>				
B1	450	0	0	1551	0.60	0.60	270
B2	427.5	5	22.5	1566		0.58	262
B3	405	10	45	1581		0.56	254
B4	360	20	90	1611		0.53	238
B5	270	40	180	1730		0.41	183

<sup>a</sup>68% 0/4mm sand, 32% 4/8 mm gravel. <sup>b</sup>Equivalent  $w/b$  ratio for mixes with fly ash,  $w/b_{eq} = w/(c + k f)$ ,  $k = 0.4$ ,  $f/c \leq 0.33$  according to DIN 1045-2 [13]. <sup>c</sup> $w/(c+f)$

To investigate the effect of penetrating chloride and external sulfates on leaching behaviour, the tank leach test was performed using concrete B1, following 90d storage in a foil, with eluents containing NaCl (30 g/L) or Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (3 and 30 g SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L). The sulfate concentrations correspond to upper limit of exposure class XA2 according to EN 206 and the concentration of solutions often used to test the resistance of concrete to sulfate attack. The data were corrected for small quantities of Si, Al, Sr and Cr in the initial sulfate and chloride solutions.

The cumulative release of major and trace elements at end of the tank leach test (56 d) was calculated from the concentration of each substance  $j$  in the eluate after each elution step  $i$  and the eluent/concrete volume-to-surface ratio  $V_S$ .

$$E_{S,j} = V_S \sum_{i=1,6} c_{i,j} \quad (1)$$

Additional specimens of concretes B1 and B4 were stored under conditions (i) and (iii) after which pieces of concrete were dried at 40°C, finely ground to <125 μm and analysed following the availability test NEN 7341 to assess the maximum leachability of major and trace element in the concretes at pH 4, 7, 9.8, 12 and 13. In the test, 5 g powder portions were mixed with 500 ml distilled water and, while stirring, the pH adjusted by titrating 1 mol/L HNO<sub>3</sub> or NaOH.

### 3. Results and discussion

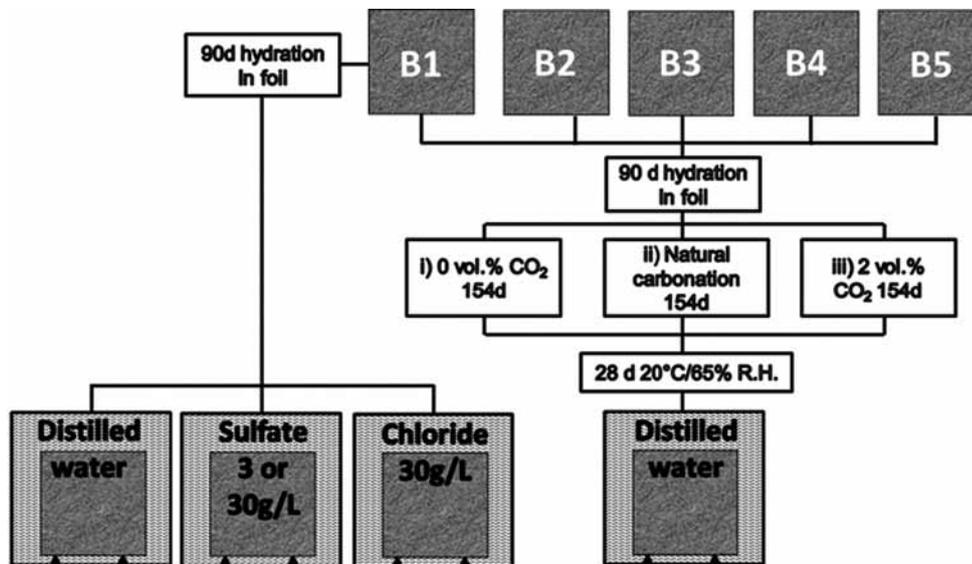


Fig. 1: Overview of specimen storage

#### 3.1 Carbonation

The carbonation depths measured after 154 d are presented in Table 3. A decrease in carbonation depth with increasing fly ash content is apparent which is, as is well-known, due to the denser concrete pore structure obtained with fly ash. The phenolphthalein test yielded no measurable carbonation depth for the specimens stored in argon.

Table 3: Carbonation depth of specimens B1-B5 after 154 d (following 90 d initial storage in a foil)

Storage conditions, 20°C	B1	B2	B3	B4	B5
i) 0 vol.% CO <sub>2</sub> , argon	0.0 mm				
ii) natural CO <sub>2</sub> conc., 65% RH,	2.3	1.8	1.8	1.5	1.2
iii) 2 vol.% CO <sub>2</sub> , 65% RH	16.7	16.5	15.7	15.5	12.0

The effect of carbonation on Ca availability is shown in Fig. 2a where the marked decrease in Ca availability is obviously due to the formation of CaCO<sub>3</sub> which has a low solubility at high pH; in fact the availability of Ca observed at pH ≥ 9.8 was negligible. A similar decrease in Ca availability was observed by Van Gerven et al. [5] on carbonating mortar with super critical CO<sub>2</sub>. In Fig. 2b, the cumulative release of Ca determined from the tank leach test is compared with the corresponding depths of carbonation. A similar dependence of release on carbonation was also observed for mortar by Van Gerven et al. [5, 6] who attributed the reduction in Ca release from slightly carbonated specimens to precipitation of CaCO<sub>3</sub> at the higher pH values of the eluate and the increase in Ca release from strongly carbonated specimens to the domination of bicarbonate at lower pH. Since CaCO<sub>3</sub> is relatively insoluble at the pH of the eluate, Fig. 3b, the higher Ca release produced by accelerated carbonation is probably connected with the dissolution of C-S-H; portlandite having already been converted to CaCO<sub>3</sub>.

Fig. 2: Effect of carbonation and fly ash content on a) availability and b) cumulative release of calcium

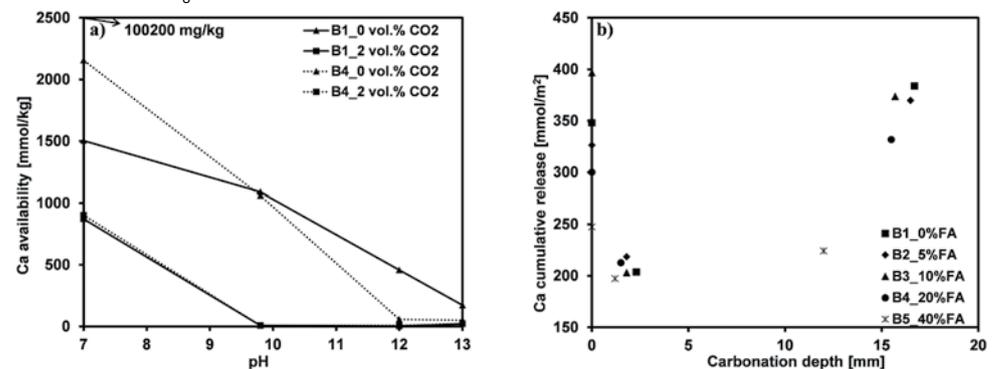


Fig. 3a shows the effect of carbonation on the cumulative release of K. Similar results were obtained for Na. As also observed by Van Gerven et al. [5], alkali release tends to decrease with the severity of carbonation. Since alkalis readily dissolve in the pore solution, their release is mainly diffusion-controlled. Thus fewer alkalis are released from carbonated concrete owing to its denser microstructure. The replacement of cement by fly ash also reduces alkali release systematically according to the concentration of alkalis in the pore solution for the cement/fly ash combination and the denser microstructure produced by fly ash. Since storage in a foil provides good reaction conditions for fly ash, most of the fly ash will have reacted after 90 d producing capillary pore systems equivalent to the w/b ratios in Tab. 2 rather than the equivalent ratio 0.6. In Fig. 3b, the pH of the eluate at the end of each elution step of the tank leach test results mainly from released alkalis where the particular value is determined by the duration of the elution step and the alkali concentration in the concrete pore solution, i.e. the concentration gradient for diffusion flux. Alkali release should therefore affect the release of elements whose solubility depends strongly on pH, e.g. Al and V.

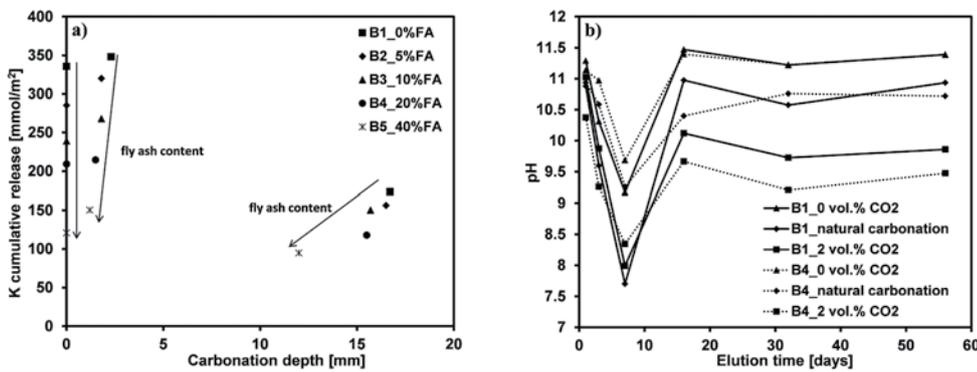


Fig. 3: Effect of carbonation and fly ash content on a) cumulative release of potassium and b) eluate pH during the tank leach test

Carbonation has a pronounced effect on the availability of Si in dependence of pH, Fig. 4a. The availability of Si for non-carbonated specimens increases towards lower pH as more Si in C-S-H dissolves. Decalcification of C-S-H during carbonation lowers its Ca/Si ratio resulting in a highly porous, hydrous form of silica, [14]. Thus the availability of Si at pH > 10 increases for carbonated samples owing to higher solubility of the amorphous silica phase in comparison to Si bound in C-S-H.

The release of Si from non-carbonated fly ash concrete, Fig. 4b, exhibits no systematic dependence on fly ash content which indicates that the release of Si in the tank leach test is primarily controlled by C-S-H dissolution in the surface region rather than diffusion from inside the concrete. In contrast, larger quantities of fly ash systematically reduce the amount of Si released from carbonated concrete despite the larger Si content of the fly ash. This suggests that diffusion of Si from inside carbonated concrete also contributes to Si release. Moreover, the increase in Si solubility at high pH produced by carbonation, Fig. 4a, will also enhance the surface dissolution of Si explaining why Si release is similar for natural and accelerated carbonation, Fig. 4b.

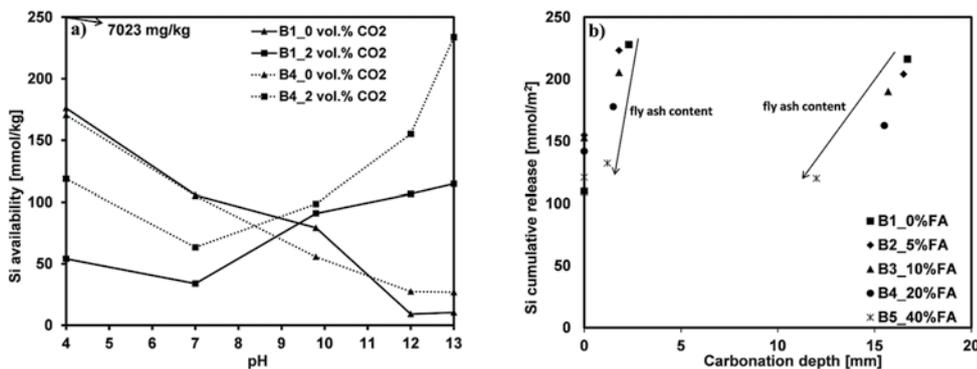


Fig. 4: Effect of carbonation and fly ash content on a) availability and b) cumulative release of silicon

The pH dependence of Al in Fig. 5a is characteristic of its amphoteric solubility behaviour and solubility control by, in general, AFt and AFm at high pH, and the hydroxide towards low pH. For carbonated specimens an increase in the availability of Al at pH > 9.8 was observed. However, in the tank leach test a distinct decrease in Al release occurred for larger carbonation depths, Fig. 5b. This is presumably due to the reduction of the pH of the pore solution which lowers the solubility of Al in the eluate and, most likely, the exertion of solubility control by  $Al(OH)_3$  derived from AFt and AFm dissolution. A systematic dependence of Al release on fly ash content was observed neither for non-carbonated nor for carbonated concrete.

Fig. 5: Effect of carbonation and fly ash content on a) availability and b) cumulative release of aluminium

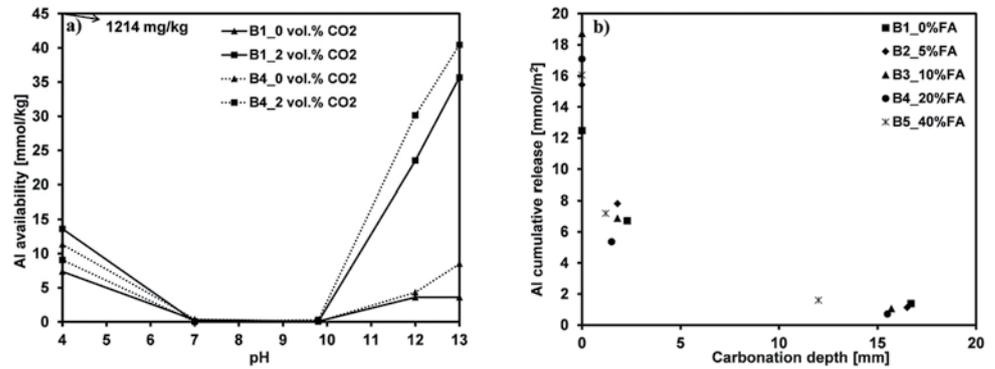
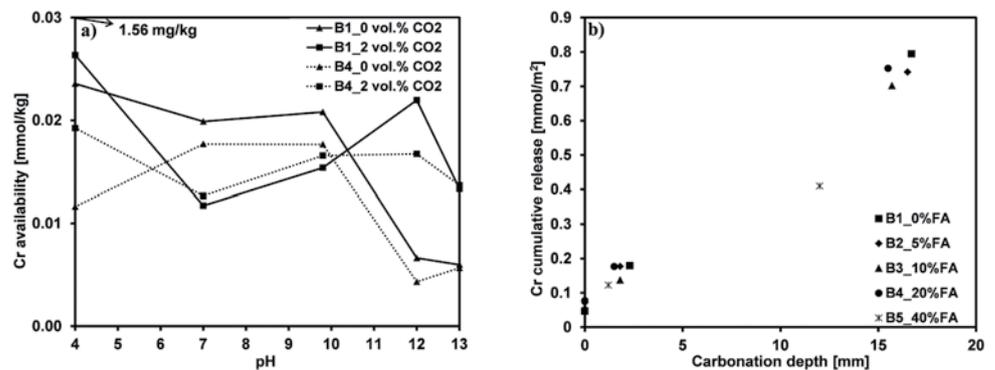


Fig. 6: Effect of carbonation and fly ash content on a) availability and b) cumulative release of chromium



The availability of Cr as a function of pH and the cumulative release of Cr in dependence of carbonation depth are shown in Fig. 6. The availability of Cr at pH > 10 is increased by carbonation. A well-defined correlation between the cumulative release of Cr and carbonation depth is apparent where, for all concretes, carbonation increases the release of Cr by as much as a factor of 8. There is much evidence [8, 15, 16] supporting the substitution of  $\text{SO}_4^{2-}$  by  $\text{CrO}_4^{2-}$  in AFt and AFm at high pH. Thus the decomposition of these phases explains the observed effect of carbonation on Cr availability and leaching. Based on the data in Table 1, replacement of 20% cement by fly ash increases the total amount of Cr in concrete B4 by 50%. It is apparent that this does not increase the availability of Cr in either carbonated or non-carbonated concrete, Fig. 6a. Correspondingly, fly ash content has no significant effect on the release of Cr, Fig. 6b.

The effect of carbonation on the availability and release of sulfate as S, Fig. 7, is very similar to that of Cr indicating that their release is controlled by common mechanisms and phases.

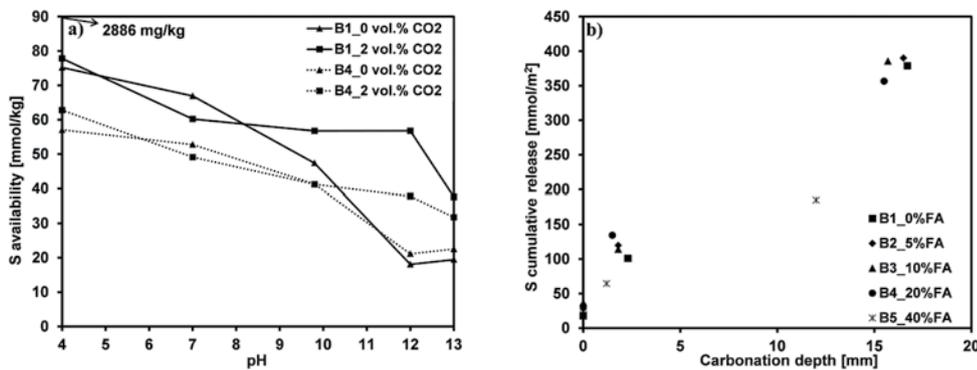


Fig. 7: Effect of carbonation and fly ash content on a) availability and b) cumulative release of sulfate as sulphur

As already known from earlier studies with concrete [17] and mortar [1], the availability of V is pH-dependent with a maximum near pH 9, Fig. 8a, suggesting solubility control by different calcium vanadates in dependence of the predominant aqueous V complex. However, low availability of V is expected at pH 11 while ettringite is still present because  $\text{VO}_4^{3-}$  may well substitute  $\text{SO}_4^{2-}$  in ettringite, see Kumarathasan et al. [16] and Gougar et al. [18]. Thus the large increase in V availability produced by carbonation at pH 11 in Fig. 8a is explained by the decomposition of  $\text{VO}_4^{3-}$  substituted ettringite. This is supported by the results of availability tests performed by Engelsen et al. [19] with recycled concrete aggregates in different states of natural carbonation where a similar increase in V availability at high pH was observed. Based on the data in Table 1, replacement of 20% cement by fly ash increased the total amount of V in concrete B4 by a factor of 2.4. The additional V from the fly ash raised the overall availability of V observed for both carbonated and non-carbonated concretes, Fig. 8a.

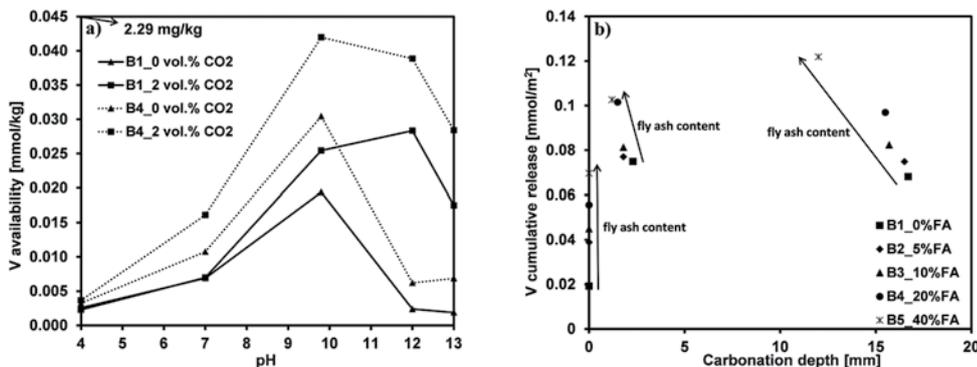


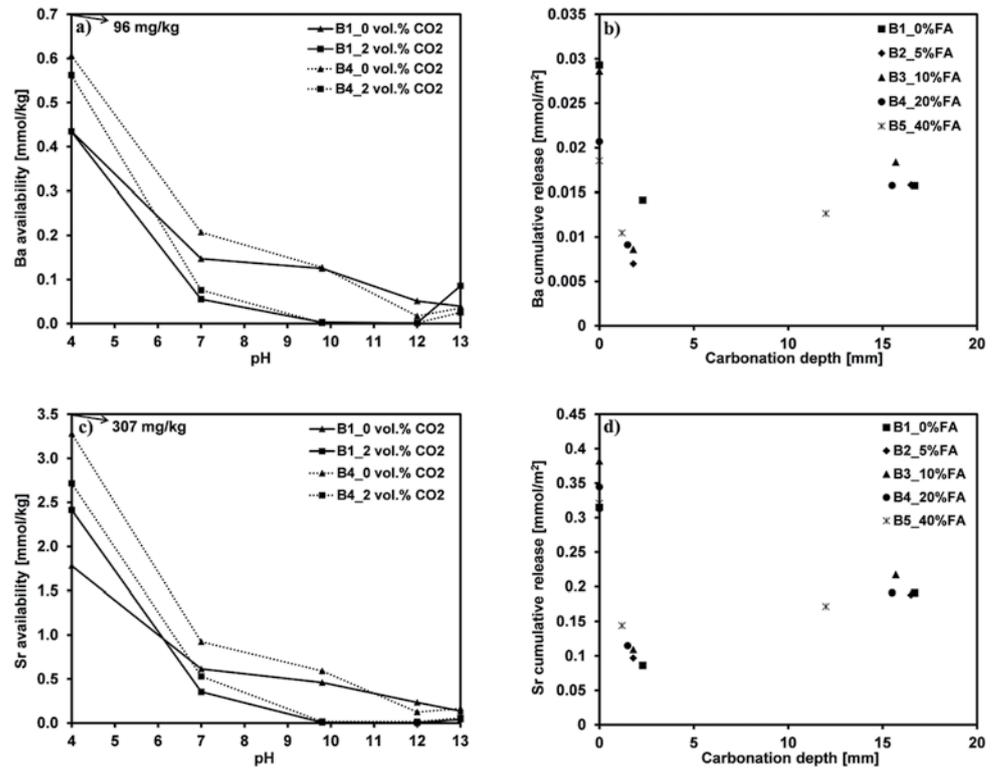
Fig. 8: Effect of carbonation and fly ash content on a) availability and b) cumulative release of vanadium

The release of V in the tank leach test is enhanced by both carbonation and, irrespective of carbonation depth, replacement of cement by fly ash, Fig. 8b. Thus higher levels of cement replacement by fly ash increase the amount of leachable V. Carbonation reduces the pH of the pore solution promoting ettringite dissolution and higher V solubility. V release does not increase strongly with carbonation depth which points to V leaching by surface dissolution processes rather than diffusion.

The dependence of Ba and Sr availability on pH is very similar, whether for carbonated, non-carbonated concrete or concrete with or without fly ash, Figs 9a and 9c. Such behaviour is expected if Ba and Sr carbonates control Ba and Sr dissolution in carbonated concrete since the carbonates are less soluble than the corresponding sulfates, the latter probably determining Ba and Sr solubility in non-carbonated concrete. The dependence of

Ba and Sr release in the tank leach test on the degree of carbonation is also very similar and, moreover, is also similar to Ca, Fig. 2b. This provides further evidence that carbonates controls the release of Ba and Sr from carbonated concrete.

Fig. 9: Effect of carbonation and fly ash content on availability of a) barium, c) strontium and cumulative release of b) barium and d) strontium



### 3.2 Chloride and external sulfate

The cumulative release of Ca, Ba and Sr in distilled water measured in this series of experiments (Figs 10b, 12a, 12b, respectively) is generally above that for the equivalent specimens stored in argon in the above carbonation investigations (Figs 2a, 9b, 9d, respectively). The opposite is true for V (Figs 8b and 11b). In addition, the pH of eluate was about 0.5 above the value measured for the argon-stored specimens. These differences are probably due to higher age of the argon-stored specimens and thus their denser microstructure as well as a small degree of surface carbonation not registered by the phenolphthalein test.

Fig. 10 shows the cumulative release of Si, Ca and Al during exposure of concrete B1 to NaCl and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions in the tank leach test. The presence of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in the eluent enhances the release of Si markedly; by up to 5 times compared with storage in distilled water. Now, when external sulfate ions penetrate concrete AFm is converted into ettringite, see for example Müllauer et al. [10, 11], the reaction requiring additional Ca which is supplied by portlandite and, at pH 12.6, C-S-H dissolution. This reaction tends to increase pH (for distilled water: pHi=6 = 12.04; for 30 g SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L: pHi=6 = 12.11) as observed, by Müllauer et al. [11] in experiments with powdered hardened cement paste in sulfate solutions. The observed increase in Si release cannot be explained by the equilibrium solubility behaviour of C-S-H with regard to pH and the total amounts of dissolved Si and Ca, [20, 21]. Thus it is unlikely that ettringite precipitation affects Si release. It is suggested that by supplying Ca

from C-S-H for ettringite and gypsum formation in the surface regions of the concretes C-S-H is decalcified, decomposing towards hydrous silica. Thus as considered above for carbonated concrete, more Si is available for surface dissolution which increases Si leaching as shown in Fig. 10a. Addition of NaCl to the eluate had no discernible effect on Si release.

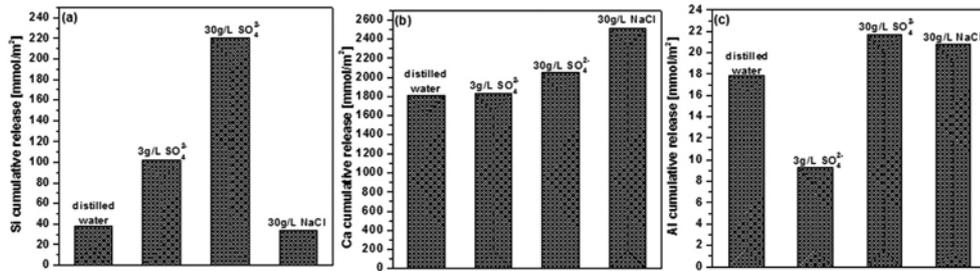


Fig. 10: Cumulative release of a) silicon, b) calcium and c) aluminium from concrete B1 (OPC without fly ash) exposed to sulfate and chloride solutions

Apart from a reduction in the cumulative release of Al from specimens leached in 3 g  $\text{SO}_4^{2-}$ /L, the effect of sulfate or chloride in the eluent on Ca and Al release is not large, Figs 10b and 10c. An increase in Ca and Al leaching on addition of NaCl to the eluent may be due to the decrease in pH of the eluate (for distilled water:  $\text{pH}_{i=6} = 12.04$ ; 30g/L NaCl:  $\text{pH}_{i=6} = 11.58$ ).

Exposure of the concretes to sulfate or chloride solutions was found to increase the release of Cr to a large extent, Fig. 11a. Apparently, high sulfate concentrations disturb the solubility equilibrium of  $\text{CrO}_4^{2-}$  substituted ettringite and AFm.  $\text{SO}_4^{2-}$  replaces  $\text{CrO}_4^{2-}$  which then enters the pore solution. XRD measurements revealed the presence of Friedel's salt in the specimens eluated in the chloride solutions. This phase is known to form at the expense of the AFt and AFm phases and is frequently observed in concrete structures subjected to chloride ingress. It is concluded that more Cr is released from concrete exposed to NaCl solutions because  $\text{CrO}_4^{2-}$  incorporated in AFt and AFm dissolves in the pore solution when Friedel's salt forms. Moreover, the lower pH of the eluate with NaCl also favours Cr dissolution. Although evidence exists for the fixation of  $\text{CrO}_4^{2-}$  in AFm as  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCrO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  at  $4 < \text{pH} < 10$  as observed by Dai et al. [9], the present results indicate that this phase is less stable at the higher pH values of the eluate in these investigations.

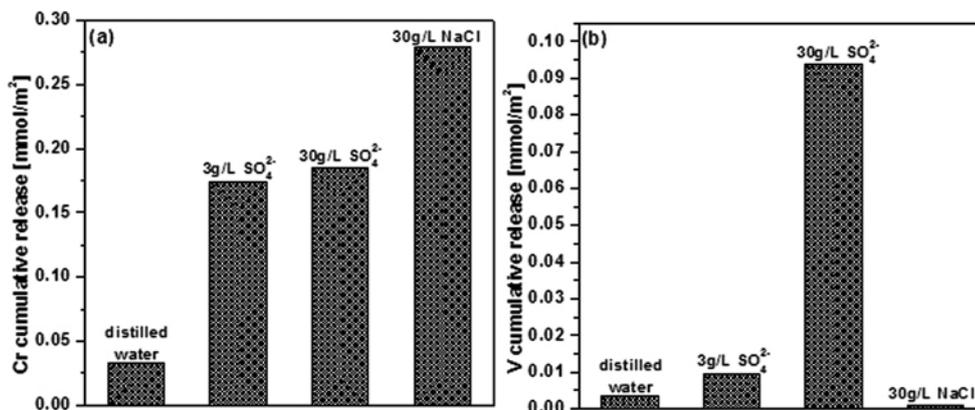


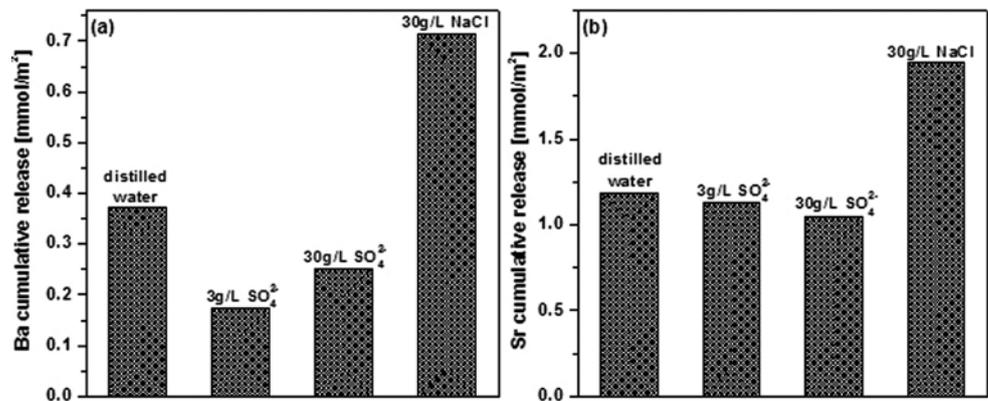
Fig. 11: Cumulative release of a) chromium and b) vanadium from concrete B1 (OPC without fly ash) exposed to sulfate and chloride solutions

Whereas NaCl had no discernable effect on the release of V, high sulfate concentrations increased V leaching considerably; the addition of 30 g  $\text{SO}_4^{2-}$ /L to the eluent increased the cumulative release of V by a factor of about 30, Fig 11b. In this case, the introduction of

more  $\text{SO}_4^{2-}$  into the pore solution causes  $\text{VO}_4^{3-}$  in ettringite to be displaced by  $\text{SO}_4^{2-}$  thus enhancing the release of V.

Exposure to external sulfate was observed to lower Ba release in the tank leach test, Fig. 12a. This is explained by the precipitation of  $\text{SO}_4^{2-}$  as scarcely soluble barium sulfate which removes Ba from the pore solution. This effect will be less for strontium sulfate which is more soluble than barium sulfate, Fig. 12b. Opposed to this behaviour, more Ba and Sr are released in the presence of NaCl. This may be due to the reduction in pH of the eluate mentioned above which tends to enhance the solubility of Ba and Sr, Figs 9a and 9c, and thus their cumulative release.

Fig. 12: Cumulative release of a) barium and b) strontium from concrete B1 (OPC without fly ash) exposed to sulfate and chloride solutions



#### 4. Conclusions

Tank leach tests (56d: duration, ratio of eluent volume to concrete surface: 90 L/m<sup>2</sup>) were performed to determine the effect of carbonation depth and NaCl or  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  in the eluent on the release of Al, Ca, K, Na, S, Si, Ba, Sr, Cr and V from concretes made with OPC and fly ash. The availability of the elements was determined between pH 4 and 13 following the Dutch standard test NEN 7341. The results show that the leaching behaviour of major and trace elements from concrete depends significantly on the environmental factors carbonation, exposure to deicing salt (sodium chloride) or external sulfates. This is not taken into account by contemporary tank leach tests used to assess the environmental impact of concrete.

The cumulative release of Cr increased proportionally to carbonation depth from about 0.05 to 0.8 mmol/m<sup>2</sup> for a carbonation depth of 16 mm. Replacement of the cement by fly ash with a higher Cr content had no discernible effect on Cr release. The leaching behaviour of  $\text{SO}_4^{2-}$  (as S) was analogous to Cr suggesting that  $\text{CrO}_4^{2-}$  partly substituted for  $\text{SO}_4^{2-}$  in AFt and/or AFm dissolves when these phases decompose during carbonation.

More V was released from carbonated concrete, the amount increasing from 0.02 to 0.07 mmol/m<sup>2</sup> for carbonation depths of 3 mm and above. Replacement of the cement by fly ash with a higher V content resulted in additional release of V in proportion to replacement level (0.05 mmol/m<sup>2</sup> for 40% fly ash). It is suggested that V release is mainly due to surface dissolution processes involving  $\text{VO}_4^{3-}$  substituted ettringite.

Like Ca, smaller amounts of Ba and Sr were released from carbonated concrete. This is explained by the formation of the corresponding low-solubility carbonates.

Elution of the concrete specimens in 30 g/L NaCl increased the release of Cr from 0.03 to 0.28 mmol/m<sup>2</sup>. This is attributed to the dissolution of CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup> predominantly incorporated in AFt/AFm which forms Friedel's salt thus enhancing Cr release. V release was not significantly affected by penetrating chloride. Exposure to chloride increased both Ba and Sr release (0.38 to 0.71 mmol/m<sup>2</sup> and 1.4 to 1.9 mmol/m<sup>2</sup>, respectively).

Elution in 3 g SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L (external sulfates) increased both Cr and V release considerably (0.03 to 0.17 mmol/m<sup>2</sup> and 0.004 to 0.01 mmol/m<sup>2</sup>, respectively). This is attributed to CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup> or VO<sub>4</sub><sup>3-</sup> mainly in AFt and AFm which are displaced by SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> thus becoming mobile for leaching. In contrast, Ba and, to some extent, Sr leaching was reduced by sulfates in the eluent. BaSO<sub>4</sub> precipitation is expected to remove Ba from the concrete pore solution.

### Acknowledgements

The authors express their thanks to the German Research Foundation (DFG) for supporting this project financially.

### References

- [1] van der Sloot HA. Characterization of the leaching behaviour of concrete mortars and of cement-stabilized wastes with different waste loading for long term environmental assessment. *Waste Management* 2002; 22: 181-6
- [2] NEN 7341, Leaching characteristics of solid (earthy and stoney) building and waste materials. Leaching tests. Determination of the availability of inorganic components for leaching. Delft, Netherlands, 1995.
- [3] Andac M, Glasser FP. Long-term leaching mechanisms of Portland cement-stabilized municipal solid waste fly ash in carbonated water. *Cem Concr Res* 1999; 29 179-86
- [4] Van Gerven T, Moors J, Dutré V, Vandecasteele C. Effect of CO<sub>2</sub> on leaching from a cement-stabilized MSWI fly ash. *Cem Concr Res* 2004; 34 1103-9
- [5] Van Gerven T, Van Baelen D, Dutré V, Vandecasteele C. Influence of carbonation and carbonation methods on leaching of metals from mortars. *Cem Concr Res* 2004; 34: 149-56
- [6] Van Gerven T, Cornelis G, Vandoren E, Vandecasteele C, Garrabrants AC, Sanchez F, Kosson DS. Effect of progressive carbonation on heavy metal leaching from cement-bound waste. *American Institute of Chemical Engineers* 2006; 52(2), 826-37
- [7] Gervais C, Garrabrants AC, Sanchez F, Barna R, Moszkowicz P, Kosson DS. The effect of carbonation and drying during intermittent leaching on the release of inorganic constituents from a cement-based matrix. *Cem Concr Res* 2004 ; 34 : 119-31
- [8] You KS, Ahn JW, Cho HC, Han GC, Han DY, Cho KH. Competing ion effect of stabilization by Cr(III) & Cr(VI) in ettringite crystal structure. *Solid State Phenomena* 2007;124-126 : 1629-32
- [9] Dai Y, Qian G, Cao Y, Chi Y, Xu Y, Zhou J, Liu Q, Xu ZP, Qiao S. Effective removal and fixation of Cr(VI) from aqueous solution with Friedel's salt. *J Hazard Mater* 2009; 170 1086-92
- [10] Müllauer W, Beddoe RE, Hilbig H, Heinz D. Effect of phases and microstructural development on expansion and damage by sulfate attack. *International Congress on the Chemistry of Cement Madrid, 2011*, 435
- [11] Müllauer W, Beddoe RE, Heinz D. Sulfate attack on concrete – solution concentration and phase stability. *Proc. Intern. RILEM TC 211-PAE final conference, Toulouse 2009*, pp 18-27

- [12] DAfStB-Richtlinie, Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen, 2005
- [13] DIN 1045-2, Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 2: Concrete - specification, properties, production and conformity - application rules for DIN EN 206-1. 2008
- [14] Taylor, HFW. Cement chemistry. Academic Press, 1990
- [15] Schiopu N, Tiruta-Barna L, Jayr E, Méhu J, Moszkowicz P. Modelling and simulation of concrete leaching under outdoor exposure conditions. *Sci Total Environ* 2009; 407: 1613-30
- [16] Kumarathasan P, McCarthy GJ, Hassett DJ, Pflughoeft-Hassett DF. Oxyanion substituted ettringites: synthesis and characterization and their potential role in immobilization of As, B, Cr, Se and V. *Mat Res Soc Symp Proc.* 1990; 178: 83-104.
- [17] Jungermann W, Hecht M, Beddoe RE. Elutionsverhalten von Betonbauteilen - Szenarien und Mechanismen. 16. *ibausil*, Weimar, 2006, pp. 1/1337-1/1345
- [18] Gougar MLD, Scheetz BE, Roy DM. Ettringite and C-S-H Portland cement phases for waste ion immobilization: A review. *Waste Management* 1996;16: 295-303
- [19] Engelsen CJ, van der Sloot HA, Wibetoe G, Justnes H, Lund W, Stoltenberg-Hansson E. Leaching characterisation and geochemical modelling of minor and trace elements released from recycled concrete aggregates. *Cem Concr Res* 2010; 40: 1639-49
- [20] Greenberg SA, Chang TN. Investigation of the colloidal hydrated calcium silicates. II. Solubility relationships in the calcium oxide-silica-water system at 25°. *J Phys Chem* 1965; 69: 182-188
- [21] Chen JJ, Thomas JJ, Taylor HFW, Jennings HM. Solubility and structure of calcium silicate hydrate. *Cem Concr Res* 2004; 34 :1499-1519

**In: Proceedings of the International Conference on Advances in Cement and Concrete Technology in Africa (ACCTA). Johannesburg 2013. S.95**

## **10.2. Deaeration and segregation tendencies of highly flowable concrete owing to vibration**

Thomas Kränkel, Dirk Lowke, Simina Oana Rosa, Christoph Gehlen  
Technische Universität München, centre for building materials (cbm), Munich, Germany

Highly flowable concrete possesses excellent workability and therefore enables the production of high quality concrete elements within very short times. For that reason it is increasingly used in building practice. Compared to conventional vibrated concrete, highly flowable concrete needs little compaction energy for deaeration which reduces the risk of material defects caused by insufficient vibration. On the other hand, applying too much compaction energy can lead to segregation of the coarse aggregate. The choice of the correct compaction energy, adjusted to the workability of the highly flowable concrete, which ensures adequate deaeration while avoiding coarse aggregate segregation, is complicated. On the construction site, the slump flow of the concrete as determined with the flow table test is often used for this purpose. From a rheological point of view, the slump flow is related to the yield stress of the concrete, whereas little information is obtained on concrete viscosity. During vibration, the applied compaction energy is above the yield stress of the concrete. Thus, viscosity and not yield stress mainly determines the deaeration and segregation behaviour of the concrete during vibration. This paper considers the basic relationships between the viscosity of highly flowable mortars and concretes and deaeration and segregation tendencies during vibration. The investigations with highly flowable mortars of similar yield stress shows that without external compaction and in dependence of the plastic viscosity air void contents from around 1 % ( $\eta_{pl} = 1.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) to 13 % ( $\eta_{pl} = 13.7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) can occur. Compaction reduces the effect of viscosity minimally.

The investigations also show that highly viscous mix compositions are very robust with respect to over-compaction whereas low-viscosity mixes of similar consistency segregate strongly even after the application of a small amount of compaction energy. These relationships were also confirmed in tests with highly flowable concrete. Consequently, it is insufficient to define the correct compaction energy for this type of concrete based on the result of the flow table test alone.

Keywords: highly flowable concrete, viscosity, vibration, compaction, deaeration, segregation

### **Motivation**

Owing to its excellent workability, highly flowable concrete (HFC) is being used more and more in civil engineering [1,2]. Time-consuming processes such as the distribution of the fresh concrete in the formwork and finishing the concrete surface after placement, i.e. levelling and smoothing, are reduced to a minimum [2]. Another favourable effect is that the external application of only a small amount of compaction energy is sufficient for deaeration of the fresh concrete [3]. If the compaction intensity is tailored to a particular HFC composition, the danger of compaction defects can be significantly reduced compared with conventionally vibrated concretes.

The basic requirement for producing highly stable and easily workable concrete with sufficient deaeration is the application of the correct compaction energy. This depends especially on the geometry of the structural component, fresh concrete consistency and concrete composition [4-8]. If these factors are not sufficiently taken into account, concrete components are produced with poor quality surfaces [9] as well as reduced load-bearing ability and durability. The quality of the structure as a whole is worse. Insufficient compaction energy results in air inclusions, cavities and honeycombing [10-12]. Too much compaction energy (over-compaction) leads to microstructural faults due to segregation of the coarse aggregate [4,11,12].

The choice of the correct compaction energy is difficult to achieve in field practice. Thus recommendations are available for the choice of compaction equipment in dependence of the geometry of the structural component (horizontal or vertical component). Several imprecise specifications state that less compaction energy is necessary for mixes which are more flow-able and possess a low yield stress [13]. However, plastic viscosity, which is determined by the actual fresh concrete composition, is not considered at all, although this property is decisive for deaeration and segregation during compaction. This becomes clear when considering the compaction mechanism itself. Concrete is compacted by vibrations which reduce yield stress and viscosity [5] enabling the entrapped air to rise and escape. Over-compaction can reduce the yield stress and viscosity so strongly that the coarse aggregate segregates. In order to obtain a stable mix with sufficient deaeration, it is not enough to base the choice of compaction energy on just the geometry of the structural component and the consistency (yield stress) of the fresh concrete. The plastic viscosity of the mix should also be taken into account.

### **Objectives**

This contribution aims at establishing relationships between the plastic viscosity of fresh HFC and its deaeration and segregation behaviour during compaction. The results provide the base of precise recommendations for the choice of the correct compaction energy for HFC. In the future, these recommendations should take both constructive and concrete technological conditions (yield stress and viscosity of concrete) into account. This guarantees sufficient deaeration of the HFC while excluding segregation of the coarse aggregate through over-compaction.

### **Materials and methods**

#### **Mortar and concrete mixture design**

Investigations were performed with highly flowable mortars (HFM) and the corresponding concretes based on these (HFC). A Portland cement CEM I 32.5 R was used with fly ash, natural 0/4 mm sand and 4/16 mm crushed basalt for the concretes. The consistency of the mortars and concretes was adjusted with a polycarboxylate ether (PCE) based superplasticizer. The compositions are listed in Table 1. The amount of the mix constituents for the HFM in Table 1 is given for a total mix volume of 0.63 m<sup>3</sup>. The remaining volume (up to 1.00 m<sup>3</sup>) corresponds to the volume of coarse aggregate in the HFC.

Table 1: Mortar and concrete mixture design

	HFM	HFC	HFM	HFM	HFC	HFM	HFM	HFM	HFC
	0.80	0.80	1.00	1.25	1.25	1.40	1.50	1.60	1.60
Cement [kg/m <sup>3</sup> ]*	478	478	429	380	380	356	341	327	327
Fly ash [kg/m <sup>3</sup> ]*	62	62	56	50	50	46	45	43	43
Water [kg/m <sup>3</sup> ]*	147	147	165	183	184	193	198	203	203
Sand** [kg/m <sup>3</sup> ]*	752	752	752	752	752	752	752	752	752
Basalt [kg/m <sup>3</sup> ]	-	1079	-	-	1079	-	-	-	1079
PCE [wt. % <sub>CEM</sub> ]	1.07	2.30	0.59	0.38	0.46	0.29	0.21	0.07	0.30
$V_w/V_p$ [-]	0.80	0.80	1.00	1.25	1.25	1.40	1.50	1.60	1.60
w/c [-]	0.31	0.31	0.38	0.48	0.48	0.54	0.58	0.62	0.62

\* For the mortar mixes (HFM) the values are with respect to a total volume of 0.63 m<sup>3</sup>. The remaining volume (up to 1.00 m<sup>3</sup>) corresponds to the coarse aggregate in HFC

\*\* For the mortar mixes the sand was sieved to a maximum size of 2.0 mm (corresponds to maximum particle size for rheometer measurements)

At first mortars were produced from cement, fly ash and sand with different volumetric water/powder ratios  $V_w/V_p$  between 0.80 and 1.60 while keeping the composition of the solid constituents constant (powder = cement, fly ash and sand < 0.125 mm). This enabled systematic variation of the plastic viscosity  $\eta_{pl}$  and quantification of its effect on deaeration and sedimentation behaviour. The consistency of the mortars was adjusted with superplasticizer to a slump flow of 175±10 mm which is similar to that of conventional HFM mixes. HFC mixes corresponding to the HFM were prepared for  $V_w/V_p$  ratios of 0.80, 1.25 and 1.60 where slump flow according to [14] was adjusted to 630±15 mm. This value corresponds to the consistency of HFC with average workability.

### Production of mortars and concretes

To produce the mortar, the mixing water and superplasticizer were weighed and poured into the mixer drum according to [15]. On starting the mixer, the cement, fly ash and sand were added and mixed for four minutes (0.0 – 4.0 min) after which the mixer was switched off for a rest period of three minutes (4.0 – 7.0 min). Following this, the mortar was mixed shortly for 30 s (7.0 – 7.5 min) and the slump flow determined (7.5 – 9.5 min). Finally, the mortar was remixed for 30 s to break down initial hydration structures before the subsequent investigations (9.5 – 10.0 min).

To prepare the concretes, the dry constituents were homogenized for a short time in a laboratory compulsory mixer, the water and superplasticizer added within 30 s and the concrete mixed for four minutes (0.0 – 4.0 min). As in the mortar investigations, the concrete rested for three minutes (4.0 – 7.0 min) before being mixed again for 30 s (7.0 – 7.5 min). Then the slump flow was determined (7.5 – 14.5 min). Following a short 30 s remix (14.5 – 15.0 min), the subsequent investigations began 15 min after water addition.

### Types of vibration

Mortar tests were performed with three different compaction methods (Table 2). In the case of Vibration 0, no compaction was performed. A vibrating table was used for Vibration A and B. Vibration A was a very light compaction as commonly applied to HFM in practice. Vibration B was intensive using higher amplitude (Table 2) to investigate the behaviour of HFM on over-compaction. The concretes remained either non-compacted (Vibration 0) or were compacted externally by Vibration C which corresponds to the usual compaction energy for HFC. In this case, the amplitude was smaller than for mortar (Vibration A) because compaction intensity is increased in concrete by the oscillation of the coarse aggregate particles.

Table 2: Types of vibration for the highly flowable mortars and concretes

	HFM			HFC	
	Vibration 0	Vibration A	Vibration B	Vibration 0	Vibration C
Time [s]	0	30	30	0	60
Frequency [Hz]	0	50	50	0	25
Number of oscillations	0	1500	1500	0	1500
Amplitude [mm]	0	0.6	0.9	0	0.4

Figure 1: Double annular gap cell according to Vogel [19]



### Tests on mortars

A rotation rheometer with a double annular gap cell according to [16], Figure 1, was used to determine the yield and plastic viscosity of the mortars. The mortar was poured into the cell and steps in controlled rotational velocity applied according to [17]. At first, a shear rate of  $10 \text{ s}^{-1}$  was applied for 30 s to reduce initial hydration structures to a minimum.

Afterwards, the shear rate was reduced to standstill in steps of 5.00, 1.00, 0.50, 0.25, 0.10 and  $0.05 \text{ s}^{-1}$ . The yield and plastic viscosity were determined by assuming Bingham behaviour between 10.00 and  $1.00 \text{ s}^{-1}$ .

A pressure method following [18] was applied to determine the deaeration behaviour of the mortars. The apparatus was filled with mortar in one layer which was then compacted by one of the methods in Table 2 and the air void content was determined.

The ball penetration test following [19,20] was applied to obtain quantitative values on the robustness of the mortars with respect to over-compaction in dependence of their viscosity. A hollow cylinder ( $\varnothing = 80 \text{ mm}$ ;  $H = 330 \text{ mm}$ ) was filled with mortar and the initial hydration structure broken by pressing a perforated disk through the mortar to the bottom of the cylinder twice within 15 s. A ball with a density of  $2.7 \text{ g/cm}^3$  and a diameter of 30 mm was inserted vertically and completely into the mortar during a rest period of 120 s.

The density and size of the ball simulates a coarse aggregate particle. Thus information is obtained on the segregation behaviour of the coarse aggregate in the mortar matrix during testing. Following the rest period, the ball was released and, at the same time, compaction (according to Table 2) started. The sink velocity of the ball was measured.

### Tests on concretes

In order to assess concrete consistency, slump flow was measured according to [14]. At the same time, the flow cone test was performed according to [21] to characterize the plastic viscosity. Fresh concrete was poured into the flow cone, the shutter opened immediately and the flow time recorded as a measure of plastic viscosity.

The deaeration behaviour of the concretes was determined using the pressure method [22]. Like the mortar, the apparatus was filled with concrete in one layer, compaction performed

with one of the methods in Table 2 and the air void content was determined. The robustness of the concrete with respect to over-compaction in dependence of viscosity was assessed by performing the cylinder segregation test following [19,20].

The concrete was poured into a mould ( $\varnothing = 150$  mm;  $H = 450$  mm), consisting of three stacked cylinders of the same length. A 1.00 m long slide inclined at  $20^\circ$  was used for this purpose. Directly after pouring, the concrete was compacted by one of the two vibration methods shown in Table 2. After a rest period of 30 min, the mould was split into its three cylindrical parts and the coarse aggregate in each cylinder washed out of the mixture on an 8 mm sieve, dried and weighed. The degree of segregation, given by the maximum deviation of the coarse aggregate  $\Delta m_{max}$  in the cylinders from the average values, was determined to indicate segregation tendency.

## Results and discussion

### Results on mortars

The yield stresses  $\tau_0$  and plastic viscosities  $\eta_{pl}$  measured for HFM are listed in Table 3 and represent averages over three individual measurements with at least three separately produced mortar mixes. Since the slump flow of the mortars was adjusted to  $175 \pm 10$  mm, the yield stresses were similar, ranging from 31 to 42 Pa. Consequently, changes in deaeration and segregation behaviour of the HFM are mainly due to variation in plastic viscosity. Moreover, the plastic viscosity is inversely proportional to volumetric water/powder ratio  $V_w/V_p$  of the mortars as shown in Figure 2a.

Regarding the deaeration behaviour, the air void content decreased, as expected, as more compaction energy was applied (Figure 2b). Moreover, a direct relationship was observed

$V_w/V_p$ [-]	HFM					
	0.80	1.00	1.25	1.40	1.50	1.60
Vibration 0 (without external vibration, Table 2)						
Slump flow [mm]	178	175	177	175	169	172
Yield stress $\tau_0$ [Pa]	42	42	38	32	33	31
Plast. viscosity $\eta_{pl}$ [Pa·s]	13.7	7.0	2.4	1.8	1.7	1.5
Air void content [%]	13.0	10.0	7.1	3.2	2.9	0.9
Extrapol. penetration depth $e_{ex}$ [mm]	0	0	0	0	0	0
Penetration velocity $v$ [mm/s]	0	0	0	0	0	0
Vibration A (30 s, 50 Hz, 0.6 mm, Table 2)						
Air void content [%]	12.0	9.0	6.0	3.1	2.0	0.8
Extrapol. penetration depth $e_{ex}$ [mm]	34	34	62	72	114	600
Penetration velocity $v$ [mm/s]	1.1	1.1	2.1	2.4	3.8	20.0
Vibration B (30 s, 50 Hz, 0.9 mm, Table 2)						
Air void content [%]	10.0	8.0	5.3	3.0	2.0	0.7
Extrapol. penetration depth $e_{ex}$ [mm]	86	120	180	240	363	750
Penetration velocity $v$ [mm/s]	2.9	4.0	6.0	8.0	12.1	25.0

Table 3: Results of the mortar investigations

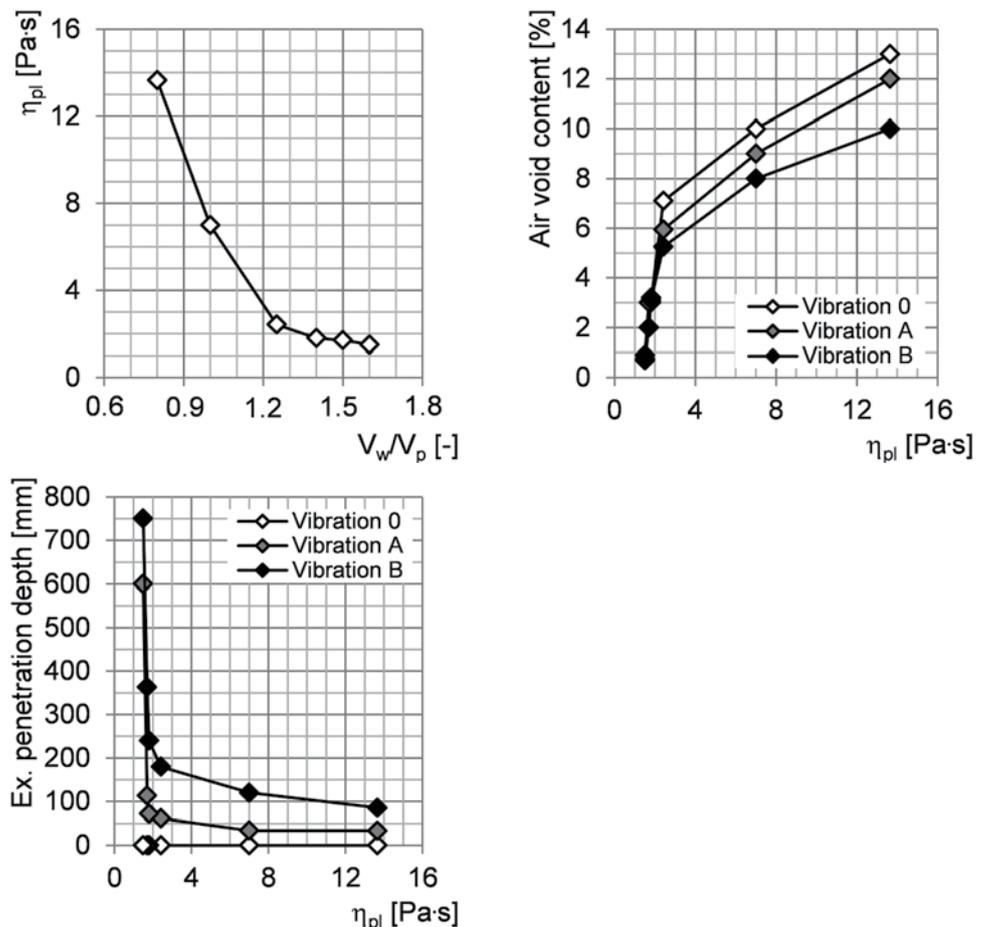
between air void content and plastic viscosity of the mortar which was evident in tests without compaction (Vibration 0) as well as with the application of a large amount of compaction energy (Vibration B). This implies that mortar which was highly viscous before compaction also possesses a higher viscosity during compaction compared with mortar which possesses a low viscosity before compaction. The upward movement of the air voids, and thus deaeration capacity, diminishes with increasing viscosity. In the ball penetration test without compaction (Vibration 0), all HFM mixes were stable with regard to segregation -

irrespective of their plastic viscosity. Owing to the high yield stress (31 to 42 Pa), the ball remained motionless.

The energy applied during compaction (Vibration A and B) always overcomes the yield stress of the HFM [6]. Thus yield stress cannot contribute to the stability of the fresh mortar; the coarse aggregate segregates [6, 8]. This is clearly shown by the sink rate of the ball in the ball penetration test (Figure 2c, grey and black symbols). Lower viscosities result in faster sink rates of the ball and therefore coarse aggregate particles. Particularly in the case of the low-viscosity mortars with intense compaction (Vibration B), the ball reached the bottom of the cylindrical mould before compaction was completed.

Nevertheless, in order to quantify the segregation of all the HFM mixes, the expected penetration depth  $e_{ex}$  was extrapolated. This was done by multiplying the measured penetration velocity  $v$  [mm/s] by the duration of compaction  $t = 30$  [s], i.e.  $e_{ex} = v \cdot t$  [mm]. Figure 2c compares the extrapolated penetration depths with the corresponding plastic viscosities. As expected, the penetration depth increases with compaction energy for every plastic viscosity. Moreover, the depth of penetration increases disproportionately with reduced plastic viscosity.

Figure 2a) Effect of volumetric water/powder ratio on plastic viscosity. Effect of plastic viscosity on b) air void content and c) extrapolated penetration depth



## Results on concretes

The values measured for slump flow and cone flow time are listed in Table 4 for the HFC mixes investigated. It is apparent that the flow time ranges from 5 ( $V_w/V_p = 1.60$ ) to 155 s ( $V_w/V_p = 0.80$ ) although the slump flow values were similar. This is because the plastic viscosities of the concretes are different whereas the yield stresses are almost the same.

The tests with concrete confirmed the results obtained with mortar with regard to deaeration and segregation behaviour; the air void content of the HFC mix is lower at lower plastic viscosity or cone flow time - irrespective of compaction energy, Table 4.

In the case of the cylinder segregation test, the values for maximum coarse aggregate segregation increased with decreasing viscosity. In addition, application of the conventional amount of compaction energy for HFC (Vibration C) led, as expected, to an increase in the value of maximum coarse aggregate segregation (Table 4).

	HFC		
	0,80	1,25	1,60
$V_w/V_p$ [-]	0,80	1,25	1,60
Slump flow [mm]	644	619	630
Cone flow time [s]	155	14	5
Air void content [%]	3.4	2.5	1.2
Coarse aggregate segregation $\Delta m_{max}$ [%]	2	4	9
Air void content [%]	2.6	2.0	1.1
Coarse aggregate segregation $\Delta m_{max}$ [%]	9	13	30

Table 4: Results of the concrete investigations

## HFM and HFC mixes for field application

The results of the investigations with HFM and HFC mixes clearly reveal the presence of two opposed effects. Whereas low-viscosity mix compositions are favourable for sufficient deaeration because less compaction energy is required, high-viscosity HFM and HFC mixes are more robust with respect to over-compaction. To consider these effects in more detail, Figures 3 and 4 compare the air void contents of the HFM and HFC mixes with the values measured in both segregation tests. Sufficient deaeration was specified by a maximum air void content of 5.5 % and 2.0 % for the HFM and HFC mixes, respectively. A limiting value of 100 mm ball penetration was, as according to [19], assumed to be sufficient for sufficient stability of the mortar mixes. The limiting value for coarse aggregate segregation in the cylinder segregation test was set to 20% according to [23].

Figures 3 and 4 show clearly that some of the HFM and HFC mixes are excellently suitable for use in practical construction in the field when produced with the appropriate compaction energy. They exhibit both sufficient deaeration and segregation stability (Figures 3 and 4, region of grey rectangle bottom left).

It would be necessary to optimize the other mixes for field application. Thus convention compaction (Vibration C) was not able to sufficiently deaerate one of the HFC mixes (Figure 4, region of white rectangle top left). In the case of the HFM mixes, even after unusually intense compaction (Vibration B) several mixes still possessed air void contents which were too high (Figure 3, region of white rectangle top left).

Figure 3, li.: Air void contents and extrapolated penetration depths of HFM mixes in dependence of compaction energy

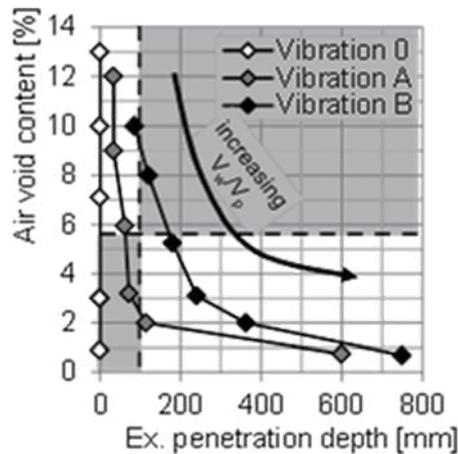
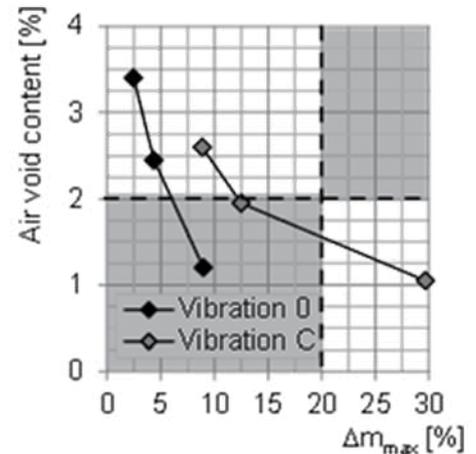


Figure 4, re.: Air void contents and maximum coarse aggregate segregation for HFC mixes in dependence of compaction energy



In contrast, other HFM and HFC mixes were sufficiently deaerated with conventional compaction intensities (Vibration A and C), but segregated (Figures 3 and 4, regions of white rectangles, bottom right). One mortar mix with an air void content of 8 % was not sufficiently deaerated, but exhibited significant segregation tendencies with a penetration depth over 100 mm (Figure 3, region of grey rectangle, top right). The practicality of such a mix composition appears problematic.

### Conclusions and Outlook

The investigations with HFM and HFC of similar yield stress show a direct relationship between air void content and plastic viscosity of the compositions in tests without as well as with external compaction. Low viscosities lead to good deaeration behaviour and therefore low desired air void contents. In contrast segregation tests show that low-viscosity mixes result in an insufficient robustness with respect to over-compaction, whereas high viscosities lead to high robustness. Further investigations are necessary for the optimization HFC mix compositions which can be deaerated using a low conventional compaction intensity while remaining stable with regard to segregation if a high intensity of compaction is applied. This would enable exact recommendations on the minimum compaction energy necessary for deaeration as well as the maximum compaction energy which can be applied without segregation of the HFC mix. Such recommendations would not, as at present, just specify to the consistency of the HFC mix, but also its plastic viscosity. This procedure is indispensable to produce stable highly flowable concrete mixes with sufficient deaeration.

### References

- [1] Boing, R., 2005, "Anteil an leicht zu verarbeitendem Beton steigt" Baugewerbe, 2005 (7), pp. 32-35
- [2] Holcim (Deutschland), 2009, "Betonpraxis. Der Weg zu dauerhaftem Beton" 2009
- [3] Heidelbergcement, 2011, "Betontechnische Daten. Ausgabe 2011" 2011, Heidelberg-Cement AG
- [4] Olbrecht, H. and Moser, K., 2004, "Entmischung von Beton durch Überverdichtung" Tec21, 2004 (44), pp. 13-16
- [5] Petrou, M. F. et al., 2000, "A unique experimental method for monitoring aggregate settlement in concrete" Cement and Concrete Research, 2000 (5), pp. 809-816

- [6] Safawi, M. I.; Iwaki, I. and Miura, T., 2004, "The segregation tendency in the vibration of high fluidity concrete" *Cement and Concrete Research*, 2004 (2), pp. 219-226
- [7] Olbrecht, H., 1997, "Einfluss des Vibrierens auf die Festbetoneigenschaften" *Schweizer Baublatt*, 1997, pp. 4-7
- [8] Safawi, M. I.; Iwaki, I. and Miura, T., 2005, "A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete" *Cement and Concrete Research*, 2005 (9), pp. 1834-1845
- [9] Sonneberg, R., 2009, "Vibrationsgeräte und Methoden zur Verdichtung von Frischbeton" *beton*, 2009 (10), pp. 448-451
- [10] Leemann, A. and Germann, A., 2006, "Massvolles Verdichten" *Der Bauingenieur*, 2006 (2), pp. 34-40
- [11] Cemex, 2012, "Rund um den Beton. Wissenswertes über Transportbeton" [www.cemex.de](http://www.cemex.de)
- [12] Bauverlag BV GmbH, 2009, "Gerüttelt, nicht geschüttelt! Fehler bei der Betonverdichtung vermeiden" *Baumarkt + Bauwirtschaft*, 2009 (7/8), pp. 33-35
- [13] Kampen R., 2011, "Bereiten und Verarbeiten von Beton, Zement-Merkblatt B7" *Zement-Merkblatt Betontechnik*, 2011
- [14] EN 12350-5, 2009, "Testing fresh concrete - Part 5: Flow table test" 2009,
- [15] EN 196-1, 2005, "Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength" 2005
- [16] Vogel, R., 2012, "Eine Messzelle für Spezialmörtel" [www.vogel-labor.de](http://www.vogel-labor.de)
- [17] Kränkel, T.; Lowke, D. and Gehlen, C., 2010, "Optimization of a Semi-Flowable SCC for the Application in horizontal Slipform Constructions" *Proceedings of SCC2010, Montreal, Canada, September 26-29, 2010*, K. H. Khayat, and D. Feys, eds., Springer, pp. 479-489
- [18] EN 1015-7, 1998, "Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar" 1998
- [19] Lowke, D. and Schießl, P., 2007, "Schnelltest zur Bestimmung der Sedimentationsneigung selbstverdichtender Betone" *beton*, 2007 (3), pp. 86-90
- [20] Kränkel, T.; Lowke, D. and Gehlen, C., 2010, "Direct and Indirect Determination of the Segregation Resistance of SCC" *Proceedings of SCC2010, Montreal, Canada, September 26-29, 2010*, K. H. Khayat, and D. Feys, eds., Springer, pp. 603-610
- [21] Kordts, S. and Breit, W., 2007, "Combined test method for assessing the workability of SCC – flow cone" *Concrete Technology Reports 2004-2006*, 2007 (30), pp.7-15
- [22] EN 12350-7, 2009, "Testing fresh concrete – Part 7: Air content Pressure methods" 2009
- [23] DAfStb, 2003, "DAfStb-Richtlinie - Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie)" 2003

**In: Beton und Stahlbetonbau 1/2014, S. 3 - 14, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin**

### **10.3. Epoxidharzbeschichtete Bewehrung – Neue Erkenntnisse nach zwei Jahrzehnten Praxiserfahrung**

Marc Zintel, Ueli Angst, Sylvia Keßler, Christoph Gehlen

#### **Abstract**

Um die Korrosion von Stahl in Beton infolge Chlorideinwirkung zu ver- oder zumindest zu behindern, werden bisher vornehmlich in Nordamerika beachtliche Mengen epoxidharzbeschichteter Bewehrung (ECR) eingesetzt. Die Wirkungsweise und damit das Korrosionsschutzpotential von ECR werden in der Wissenschaft jedoch zum Teil kontrovers diskutiert. Nicht zuletzt aufgrund fehlender Informationen über das Langzeitverhalten von ECR fand bisher kein nachhaltiger Technologietransfer nach Deutschland bzw. Europa statt. Nichtsdestotrotz wurde in den Jahren 1989 und 1991 diese Art des Korrosionsschutzes erstmalig in zwei Pilotprojekten (Brückenbauwerke) in der Schweiz und Deutschland eingesetzt. Die dargestellten Untersuchungsergebnisse im Zuge einer Bauwerksinspektion nach über zwei Jahrzehnten Nutzungsdauer liefern einen entscheidenden Baustein zur quantitativen Bewertung des Korrosionsschutzpotentials epoxidharzbeschichteter Bewehrung. Die Resultate zeigen, dass sich die Epoxidharzbeschichtung auch nach mehr als 20 Jahren im Beton in einem guten, funktionsfähigen Zustand befindet. Zusätzlich wird anhand von Laborversuchen der mögliche Effekt eines erhöhten kritischen Chloridgehalts bei ECR-Einsatz (an Fehlstellen  $< 50 \text{ mm}^2$ ) erstmals nachgewiesen. Eine hierdurch resultierende Lebensdauerverlängerung wird über eine erste Lebensdauerberechnung abgeschätzt.

#### **1 Einleitung**

Die Korrosion der Bewehrung ist weltweit eine der Hauptursachen für Schäden an Stahlbetonbauwerken. Die Bestrebungen, Bauwerke mehr und mehr dauerhaft und zugleich nachhaltig zu gestalten sowie gleichzeitig umweltverträglich und kostenoptimiert zu betreiben, stellt Eigentümer/Betreiber vor große Herausforderungen [1]. In dieser Hinsicht könnte der Einsatz epoxidharzbeschichteter Bewehrung eine vielversprechende Option sein [2].

Seit Anfang der siebziger Jahre werden in den USA in großem Umfang epoxidharzbeschichtete Bewehrungsstähle eingesetzt, um einen verbesserten Korrosionsschutz der Bewehrung bei aggressiven Umgebungsbedingungen, insbesondere bei Chlorideinwirkung, zu erreichen [3]. Mitte der achtziger Jahre begann man auch in der Schweiz und in Deutschland damit, Richtlinien zu erarbeiten, in denen der Umgang mit diesem Produkt geregelt werden sollte. Ende der achtziger Jahre wurden jedoch Schäden an Brückenbauten in Florida, USA, (Florida Key Bridges [4]) bekannt, bei denen epoxidharzbeschichtete Bewehrungen in Pfeilern in der Wasserwechsel- und Spritzwasserzone Korrosionsschäden in weniger als zehn Jahren nach der Herstellung gezeigt haben.

Nicht zuletzt wegen dieser Schäden und damit zusammenhängender Fragen zur generellen Dauerhaftigkeit beschichteter Bewehrungen kam die Anwendung epoxidharzbeschichteter Bewehrungen in der Schweiz und in Deutschland quasi vor dem Start zum Erliegen. Auch die Gültigkeit zweier Richtlinien aus Deutschland [5] und der Schweiz [6] mit weit über dem Niveau der damaligen in den USA gültigen Regelwerke (ASTM A775 [7], 1. Ausgabe von 1981) liegenden Qualitätsanforderungen für epoxidharzbeschichtete Betonstähle änderte

daran nichts. Die Anwendung in der Schweiz und Deutschland beschränkte sich deshalb nur auf wenige, bereits geplante Pilotprojekte. Erstmals in Deutschland wurde ECR 1987 in einer Rückkühlanlage der BASF SE eingesetzt [8]. Eine in der Schweiz vor rund 10 Jahren durchgeführte Umfrage unter Ingenieurbüros und Tiefbauämtern [9] zeigte, dass ein Großteil über wenig bzw. keine Erfahrung mit epoxidharzbeschichteter Bewehrung verfügt. Die verbreitete Skepsis gegenüber der Anwendung von ECR ist primär auf die mangelnde Langzeiterfahrung, der Empfindlichkeit gegenüber Transport und Handhabung (Bildung von Fehlstellen in der Beschichtung) und der falschen Vorstellung eines mangelhaften Verbunds von Epoxidharzbeschichtung und Beton zurückzuführen [10].

In den USA wurde das Produkt aufgrund des Negativbeispiels jedoch nur in einzelnen Bundesstaaten vom Markt genommen. In allen anderen Staaten wurde es weiter, in den meisten Staaten bis heute verwendet. Auch im Nahen Osten und vereinzelt in Asien fand die epoxidharzbeschichtete Bewehrung zunehmend Eingang in die Märkte [11]. Die aktuellen Produktionszahlen sind nicht unerheblich:

- Nordamerika: 600.000 t/Jahr (Anteil von ECR an gesamter Betonstahlproduktion: ca. 10-15%)
- Mittlerer Osten: 150.000 t/Jahr

Um den in Europa nach dem Negativbeispiel aufgeworfenen Fragen zur generellen Korrosionsschutzwirkung begegnen zu können, wurden in den neunziger Jahren von der europäischen Beschichtungsindustrie (Pulverhersteller und Betonstahlbeschichtungsbetriebe) erhebliche Anstrengungen unternommen, verloren gegangenes Vertrauen durch eine verbesserte Beschichtungstechnologie wieder herzustellen. Durch diese Anstrengungen entstanden verbesserte Beschichtungsstoffe und -verfahren, die deutlich höhere Korrosionswiderstände garantieren, als die Beschichtungen der alten Generation [12].

Neben der Verbesserung der Beschichtungstechnologie war aber auch die Entwicklung von Prüftechniken erforderlich, die eine quantitative Bewertung der Beschichtungsqualität bezüglich der erreichbaren Lebensdauererweiterung von Bauwerken durch den Einsatz beschichteter Bewehrung ermöglichen. Über erste Ansätze wurde in den neunziger Jahren berichtet [13; 14]. Aufgrund der in Europa nie richtig entwickelten Nachfrage, verlagerte sich auch auf Seiten der Hersteller das wirtschaftliche Interesse an dem Produkt in Richtung anderer Anwendungsbereiche (z.B. Pipeline-Beschichtung), so dass solche Ansätze im Bewehrungsbereich in den letzten zwei Jahrzehnten zunächst nicht weiter verfolgt wurden.

Inzwischen haben die wenigen damals in Europa ausgeführten Pilotprojekte ein Alter von gut 20 Jahren erreicht. Diese Objekte konnten jetzt intensiv untersucht werden. Unter Nutzung der Erkenntnisse aus zwei Praxisprojekten (Brücke in Leverkusen, Deutschland, und Brücke in Spiez, Schweiz) und mit Hilfe der deutlich gesteigerten allgemeinen Wissensbasis in Sachen Korrosionsmechanismen an in Beton eingebetteten Stählen [15; 16] soll nun ein erstes Konzept zur quantitativen Bewertung der Korrosionsschutzwirkung im Vergleich zu unbeschichtetem Betonstahl erarbeitet werden. Dieser Beitrag berichtet über die ersten Ergebnisse.

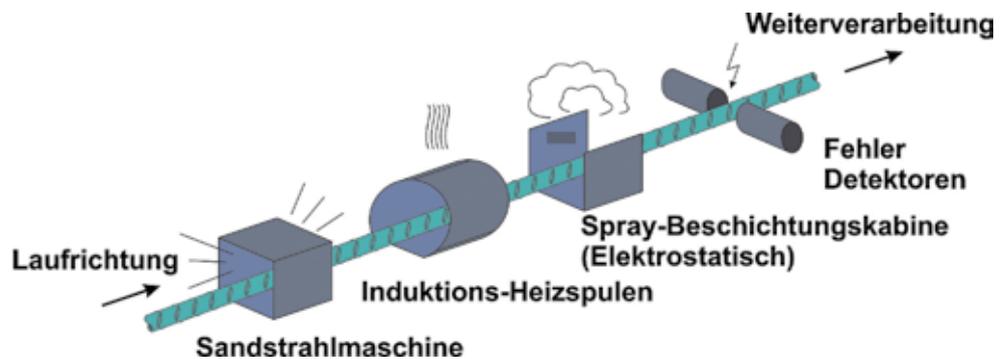
## 2 Epoxidharzbeschichtete Bewehrung (ECR)

### 2.1 Herstellungsprozess

Epoxidharzbeschichtungen werden aus einem Epoxidharz (meist Bisphenol-A-Epoxidharz) und einem Härter hergestellt. Für zahlreiche Anwendungsfälle können die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften der reinen Polymere durch Hilfs- und Füllstoffe (z.B. Pigment, Füllstoffe, Additive) maßgeblich beeinflusst werden.

Vor der eigentlichen Applikation der Beschichtung wird die Stahloberfläche durch Sandstrahlen gereinigt und angeraut. Danach wird die Bewehrung durch Induktions-Heizspulen auf rd. 250°C erhitzt und in die Beschichtungskabine transportiert. Das elektrostatisch aufgeladene Pulver setzt sich auf der Bewehrung ab, schmilzt, fließt und bildet eine gleichmäßige Schicht. Nach Abkühlung der Beschichtung wird diese mittels Detektoren auf Fehlstellen untersucht. Eine schematische Darstellung der Applikationsanlage ist in Bild 1 dargestellt.

Bild 1 Schematische Darstellung einer Applikationsanlage



Im Herstellungsprozess werden mittlere Beschichtungsdicken von ca. 300 µm eingestellt. Typische Abweichungen vom Mittelwert liegen bei ca. 10% (Variationskoeffizient).

### 2.2 Korrosionsschutzpotential

Mit der Anwendung von ECR sollen mindestens eine, besser gleich mehrere Voraussetzungen zur Bewehrungskorrosion ausgeschaltet werden:

- Depassivierende Medien sollen vom Stahl ferngehalten werden (speziell Chloride)
- Das Sauerstoffangebot an der Kathode soll minimiert bzw. nahezu eliminiert werden
- Der wässrige Elektrolyt (Beton) soll vom Stahl ferngehalten werden
- Die Ausbildung von Potentialdifferenzen auf der Stahloberfläche soll minimiert werden

Alle zuvor genannten Effekte sind eng mit der Dichtigkeit und nicht zuletzt mit dem Beschichtungswiderstand der Epoxidharzbeschichtung selbst verknüpft. Jedoch sind Epoxidharzbeschichtungen, wie auch alle anderen organischen Beschichtungen nur begrenzt undurchlässig gegen Wasser und Sauerstoff. Aus diesem Grund können Korrosionsprozesse unterhalb solcher Beschichtungen nicht komplett ausgeschlossen werden. Die dazugehörigen Transportprozesse sind in der Regel diffusionskontrolliert. Neben den Transportprozessen haben Informationen über die Speichermechanismen von eingeschlossenem Wasser eine wesentliche Bedeutung zur Dauerhaftigkeitsbewertung von Epoxidharzbeschichtungen.

Hieraus können wichtige Voraussetzungen zur Garantie eines Korrosionsschutzes gefolgert werden:

- Qualität des Materials (Wasserabsorption, Diffusionseigenschaften usw.)
- Herstellungsqualität (Beschichtungsdicke; Anzahl, Verteilung und Größe von Fehlstellen usw.)
- Qualität der Adhäsion (Verbundfestigkeit zwischen Betonstahl und Beschichtung)

Hinsichtlich Verarbeitung und Beständigkeit epoxidharzbeschichteter Bewehrung sind zusätzliche Anforderungen für den praktischen Einsatz unerlässlich:

- Alkalibeständigkeit (Betonporenlösung:  $\text{pH} > 13$  möglich)
- Biegefähigkeit (keine Risse, Enthftung oder Quetschungen)
- Verbund (ausreichende Verbundfestigkeit: Betonstahl/Beschichtung und Beschichtung/Beton)
- Lagerungsstabilität (Wetter, UV-Strahlung)
- Vorschriften zur Handhabung von ECR (im Baustelleneinsatz: z.B. Transport, Lagerung und Installation)
- Dynamische Beanspruchung (keine Risse, Schäden)
- Alterung (lastabhängig und lastunabhängig)
- Möglichkeit zur Inspektion und Instandsetzung (geeignetes Ausbesserungsmaterial)

Trotz aller möglichen gemeisterten Herausforderungen kann für einen erfolgreichen Applikationsprozess und der späteren Baustelleninstallation kein komplett fehlerstellenfreies Produkt garantiert werden. Die Fragestellung des Korrosionsfortschritts eines Systems mit keinen oder gerade noch tolerierbaren Fehlstellen ist derzeit Gegenstand aktueller Forschung. In Bild 2 ist der mögliche Korrosionsschutzeffekt (ESL: engl. Extra-Service-Life, INI: engl. Initiation, PROP: engl. Propagation) von ECR im Vergleich zu unbeschichtetem Betonstahl (BSt) über die Lebensdauer schematisch dargestellt.



Bild 2 Möglicher Korrosionsschutzeffekt epoxidharzbeschichteter Bewehrung (ECR) im Vergleich zu unbeschichtetem Betonstahl (BSt)

Im Unterschied zu BSt beschreibt die Einleitungsphase (engl. Initiation phase) bei ECR ein fehlerstellenfreies Beschichtungssystem, bei dem sich je nach Expositionsbedingung (z.B. infolge Temperatur/ -feuchte und Art des umgebenden Betons) unterschiedliche Feuchtegehalte innerhalb der Beschichtung einstellen. Eine Wasseraufnahme über die Zeit ist eng mit dem Rückgang der elektrisch-isolierenden Wirkung der Beschichtung (Beschichtungswiderstand) verknüpft. Die Einleitungsphase endet, sobald sich eine Fehlstelle entwickelt und an dieser Stelle Korrosion initiiert bzw. dies bei einer bereits bestehenden Fehlstelle geschieht. Der an der Fehlstelle freiliegende Stahl wirkt sodann als Anode. Zwei mögliche Vorteile für ECR hinsichtlich einer verspäteten Korrosionsinitiation sind:

- (1) Keine bzw. sehr späte Fehlstellenentwicklung in der Nutzungsphase (Beschichtungsfilm bleibt intakt und garantiert ausreichend hohe Beschichtungswiderstände über die Zeit, um Korrosion zu verhindern), siehe Kapitel 3)

- (2) Erhöhter wirksamer kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt bei vorhandenen Fehlstellen (siehe Kapitel 4)

Beide genannten Vorteile wirken sich direkt auf die Größe des in Bild 2 dargestellten  $ESL_{INI}$  (Zeitraum) aus. Der Sonderfall unter Punkt (1) „Keine Fehlstellenentwicklung“ würde sogar  $ESL_{INI} \rightarrow \infty$  bedeuten und somit niemals zu Korrosion führen. Die komplette Abwesenheit von Fehlstellen in der Beschichtung ist in der Realität jedoch nicht zu erwarten.

Die Korrosionsgeschwindigkeit in der nachfolgenden Schädigungsphase (engl. Propagation phase) wird maßgeblich von der Fehlstellengröße, umso mehr aber vom Ausmaß einer möglichen Fehlstelleninteraktion mit anderen benachbarten Defekten (Makrokorrosionselementbildung bei vollflächiger Beschichtung) bestimmt. Dabei führen hauptsächlich die folgenden zwei Faktoren zu einer im Vergleich zu normalem Betonstahl tendenziell geringeren Korrosionsgeschwindigkeit:

- Die zur Verfügung stehende Kathodenfläche ist begrenzt
- Die Distanz zu vorhandenen Kathoden (i.d.R. andere Fehlstellen) ist größer und somit die elektrolytische Leitung der OH--Ionen erschwert

Eine detaillierte Beleuchtung dieser Mechanismen ist jedoch nicht Gegenstand dieser Publikation. Eine verringerte Korrosionsgeschwindigkeit durch Einsatz von ECR wird in Bild 2 schematisch als ESLPROP angegeben. Die Summe aus ESLINI und ESLPROP stellt das insgesamt mögliche Korrosionsschutzpotential (Angabe z.B. in Jahren) von ECR gegenüber BSt dar.

### 2.3 Bestehende Normen und Richtlinien

Die erste (Prüf-)norm, die in Zusammenhang mit epoxidharzbeschichteter Bewehrung im Jahr 1981 in Kraft trat, war die amerikanische Norm ASTM A 775 - 81. Die aktuelle Version stellt die Norm ASTM A 775/A 775M - 07b [7] aus dem Jahr 2007 dar. Die in der ASTM A775 festgelegten Qualitätsstandards wurden über die Zeit laufend verschärft, siehe Tab. 1.

Tab. 1 Chronologie der Änderungen an der ASTM A775 [7]

Jahr	Änderung in ASTM A775	Vorversion
1981	Erste Einführung der ASTM-Norm	-
1989	Reduzierung zulässiger Beschichtungsschäden auf 1% (Stablänge: 0,3 m)	2%
1990	Alle Schäden müssen repariert werden	Reparatur von Schäden > 0,1 in <sup>2</sup>
1993	Erhöhung der Beschichtungsdicke 7 - 12 mil (~ 178 - 305 µm)	90 % zwischen 5 und 12 mil
1994	Erhöhung des Biegewinkels im Biegeversuch auf 180°	120°
1995	Reduzierung der zulässigen Fehlstellen auf 3 pro Meter (1 pro Fuß)	2 pro Fuß
1995	Verkürzung der Zeit zwischen Vorbehandlung und Beschichtung auf 3 h	8 h
1997	Einführung des "Cathodic Disbondment Test" (Überprüfung der Adhäsion)	-
1997	Stäbe sind mit Folie vor Umgebungsbedingungen (Sonnenlicht, Wetter, Spritzwasser) zu schützen, wenn die Außenlagerungsdauer > 2 Monate	-
2004	Für Stäbe mit Durchmesser 19,05 - 57,3 mm (Nos. 6-18) sind erhöhte Beschichtungsdicken erlaubt: 7 - 16 mil (~ 178 - 406 µm)	7 - 12 mil für alle Stäbe
2004	Neue Anforderungen zur Schichtdickenmessung: Keine Einzelmessung < 80% der Minimal- bzw. > 120% der Maximalanforderungen	-
2007	Einführung separater Anforderungen für das Reparaturmaterial	-

In Großbritannien wurde erstmalig im Jahre 1990 eine Norm BS 7295:1990 eingeführt, die neun Jahre später durch die heute gültige Norm BS ISO 14654 [18] ersetzt wurde. In anderen europäischen Ländern wurden bisher nur Richtlinien eingeführt:

- Deutschland, Institut für Bautechnik (DIBt), 1990 [5]
- Schweiz, Bundesamt für Straßen (ASTRA), 1991 [6]
- Niederlande, CUR Recommendation 29, 1992 [19]

### 3 Laborversuche zur Wasseraufnahme von epoxidharzbeschichteten Edelstahlplatten

Der Zusammenhang von Beschichtungswiderstand und Wasseraufnahme wurde vorab unter Laborbedingungen untersucht. Hierzu wurden drei einseitig mit Epoxidharz beschichtete Edelstahlplatten in einer künstlichen Betonporenlösung (pH=13 und 3% Chlorid) bei 20°C gelagert.

Die Beschichtungsdicke, das Gewicht des reinen Beschichtungsmaterials sowie das Gesamtgewicht der Platten wurden vor Versuchsbeginn bestimmt. Der Verlauf der gravimetrischen Gewichtszunahme sowie des Beschichtungswiderstands wurden zyklisch erfasst. Der Versuchsaufbau zur Ermittlung des Beschichtungswiderstands ist in Bild 3 dargestellt.



Bild 3 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des Beschichtungswiderstands

Zur Messung wurde ein durchfeuchtetes Filterpapier (d = 8 cm) mittels des Eigengewichts eines Metallstempels vollständig auf die zu untersuchende Beschichtung gepresst. Über ein LCR-Meter wurde der Stempel und die Plattenunterseite elektrisch kontaktiert und so der Beschichtungswiderstand mit einer Wechselstrommessung (f = 120 Hz) bestimmt. Die Mittelwerte von Gewichtszunahme und Beschichtungswiderstand sind in Bild 4 über die Zeit aufgetragen (inkl. Angabe der mittleren Standardabweichung  $\sigma_{\text{mittel}}$ ).

Bereits nach ca. 20 Tagen wurde eine relative Feuchtesättigung von ca. 2,7 M.-% bezogen auf das Anfangsgewicht der Beschichtung festgestellt. Parallel hierzu entwickelte sich der Beschichtungswiderstand. Der Widerstand sank bis zum 20. Tag von ca. 4,8 auf 2,4 M $\Omega$  ab. Eine weitere signifikante Wasseraufnahme bzw. Widerstandsänderung erfolgte bis zum Versuchsende nach ca. vier Monaten nicht.

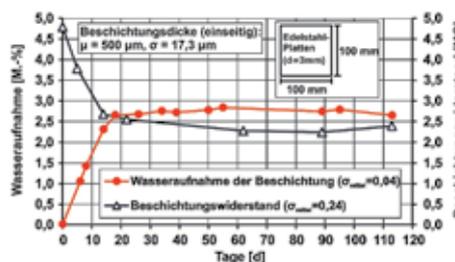


Bild 4 Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme bzw. des Beschichtungswiderstands von epoxidharzbeschichteten Edelstahlplatten

Die Ergebnisse zeigen, dass auch noch nach einer Einlagerungsdauer von ca. vier Monaten sehr hohe Beschichtungswiderstände vorherrschen (> 24 M $\Omega$ m, vgl. Normalbeton: ca. 100 – 1.000  $\Omega$ m), die den Stahl von einem wässrigen Elektrolyten praktisch elektrisch isolieren.

#### 4 Der kritische Chloridgehalt als entscheidender Parameter zur Korrosionsinitiation

Der kritische Chloridgehalt kann vereinfacht als der Chloridgehalt definiert werden, unterhalb welchem der Bewehrungsstahl im Beton weiterhin passiv vorliegt und oberhalb welchem Korrosion einsetzt. Über den Grenzwert für gewöhnlichen Bewehrungsstahl im Beton herrscht in der Literatur Uneinigkeit [20; 21; 22]; als akzeptiert gilt jedoch, dass er in erster Linie vom pH Wert der Betonporenlösung, vom Stahlpotential, und von den Bedingungen an der Stahl/Beton-Grenzfläche abhängt. Um dem Einfluss der schützenden Alkalität der Betonporenlösung Rechnung zu tragen, wird er gelegentlich als Verhältnis der Konzentrationen von Chlorid- zu Hydroxidionen ausgedrückt, kurz  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ . Auch wenn die entsprechenden Literaturwerte über einen weiten Bereich streuen, dürfte das kritische Verhältnis  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  für gewöhnlichen Bewehrungsstahl in einer alkalischen Lösung in der Größenordnung 0,1 bis 2 liegen. Ausgedrückt als totaler Chloridgehalt im Beton bezogen auf das Zementgewicht liegen in der Praxis übliche Werte für den kritischen Chloridgehalt in einem Bereich von 0,2 bis 1,0 M.-%.

Zur Beurteilung des Korrosionsschutzpotenzials von ECR im Vergleich zu herkömmlicher Bewehrung (BSt) ist der kritische Chloridgehalt ein zentraler Parameter, da dieser die Dauer der Initiierungsphase bestimmt (Bild 2). Für den Fall einer beschichteten Bewehrung ist schließlich der kritische Chloridgehalt an etwaig vorhandenen Fehlstellen maßgebend. Dieser dürfte vom Grenzwert für herkömmlichen Bewehrungsstahl aus folgenden Gründen abweichen:

- Der an der Fehlstelle freiliegende Stahl weist aufgrund des Herstellungsprozesses eine sandgestrahlte Oberfläche auf. Die Stahloberfläche normalen Betonstahls besteht üblicherweise aus einer Walzhaut sowie allenfalls vorhandener Korrosionsprodukte. Diverse Studien [23; 24] haben gezeigt, dass der kritische Chloridgehalt polierter bzw. sandgestrahlter Oberflächen höher liegt als jener im „Anlieferungszustand“.
- Es ist bekannt, dass der Korrosionswiderstand von Stahl gegenüber chloridinduzierter Korrosion bei Prüfkörpern umso höher ist, je kleiner die exponierte Oberfläche. Dies kann damit begründet werden, dass Lochfraßkorrosion bevorzugt an Schwachstellen im Mikrogefüge einsetzt. Die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein solcher Schwachstellen nimmt mit der Fläche zu. Die Hintergründe für den Fall von Stahl im Beton sind in [25] detailliert beschrieben. Da durch Fehlstellen in der Beschichtung üblicherweise sehr geringe Stahlflächen freiliegen, dürfte der kritische Chloridgehalt dieser Fehlstellen entsprechend hoch sein.

Dies wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit mithilfe des folgenden experimentellen Vorgehens untersucht: Rund 5-10 cm lange Prüfkörper wurden aus in den 80er Jahren kommerziell in der Schweiz vertriebenen ECR hergestellt (identisch mit dem im Fallbeispiel Spiez verbauten ECR). Die Stabsegmente wurden an den Enden mit einem Zwei-Komponenten-Epoxidharz versiegelt, nachdem an einer Seite ein elektrischer Anschluss erstellt wurde. Daraufhin wurden in die ansonsten intakte Epoxidharzbeschichtung absichtlich Fehlstellen der Flächen 0,9 mm<sup>2</sup>, 3,2 mm<sup>2</sup> und 54 mm<sup>2</sup> eingebracht (durch mechanisches Entfernen der Beschichtung). Daraufhin wurden die Stäbe in gesättigte  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  Lösung eingetaucht und die Potentiale gegenüber einer gesättigten Kalomelektrode (SCE) kontinuierlich aufgezeichnet. Die nach mehreren Wochen erreichten Potentiale (Passivzustand) lagen um -120 mV SCE. Schließlich wurde der Chloridgehalt in der Lösung durch Zugabe von NaCl stufenweise erhöht. Die Erhöhung fand jeweils nach zwei bis fünf Tagen statt; der pH der Lösung wurde regelmäßig kontrolliert und lag erwartungsgemäß bei 12,5. Kor-

rosionsinitiiert zeichnete sich jeweils durch einen sprunghaften Abfall des Potentials um 200–400 mV ab. Die Auswertung des kritischen Chloridgehalts in Form des Verhältnis  $Cl^-/OH^-$  ist in Bild 5 dargestellt. Während sich die beiden sehr kleinen Fehlstellen nicht signifikant unterscheiden, liegt der kritische Chloridgehalt der Fehlstelle 54 mm<sup>2</sup> auf einem signifikant tieferen Niveau. Nichtsdestotrotz ist der gemessene Wert noch immer höher als die in der Literatur für gewöhnlichen Bewehrungsstahl angegebenen Werte. Weitere, umfangreichere Versuche zur Beleuchtung dieser Thematik sind in Arbeit.

Aufgrund dieser vorläufigen Ergebnisse darf angenommen werden, dass die Einleitungs- bzw. Initiierungsphase für Korrosion an Fehlstellen in der Beschichtung von ECR tendenziell länger ist, als dies bei BSt der Fall wäre ( $ESLINI > 0$ , siehe Bild 2).

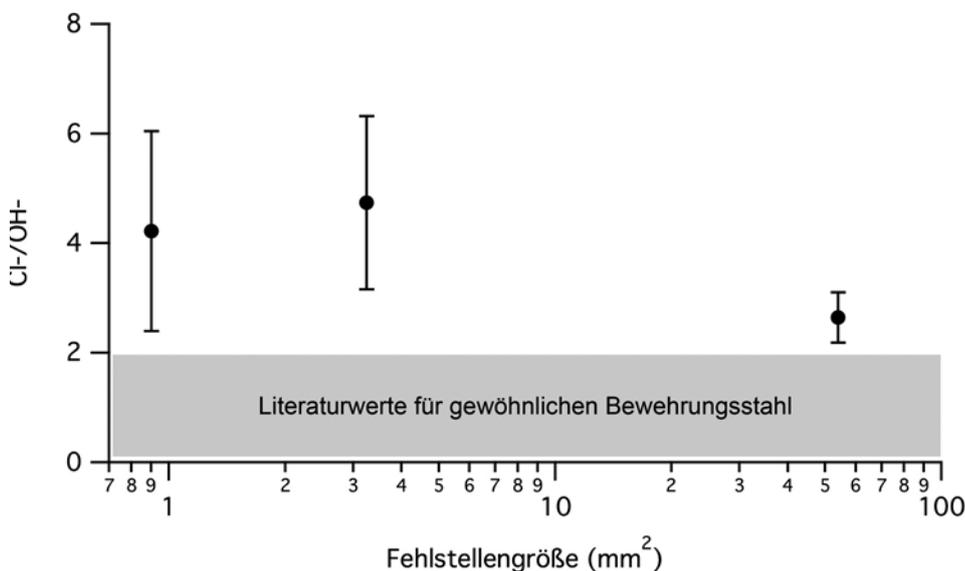


Bild 5 Kritischer Chloridgehalt in Abhängigkeit der Fehlstellengröße von ECR in gesättigter  $Ca(OH)_2$  Lösung (Mittelwerte und Standardabweichung aus jeweils drei parallelen Prüfkörpern).

Aufgrund von Bild 5 kann davon ausgegangen werden, dass die tolerierbare Chloridkonzentration in der Betonporenlösung bei Fehlstellen mit einer Fläche kleiner als ca. 50 mm<sup>2</sup> mindestens um einen Faktor 1,5 höher ist als bei normalem Betonstahl, vermutlich sogar noch höher. Als konservative Annahme könnte man für eine Fehlstellengröße im Bereich einiger weniger mm<sup>2</sup> ein kritisches Verhältnis  $Cl^-/OH^-$  von 2-3 ansetzen. In einem durchschnittlichen Beton würde dies einem kritischen Chloridgehalt der Größenordnung von 1,0 M.-%  $Cl/z$  entsprechen. Für gewöhnlichen Bewehrungsstahl kann demgegenüber in erster Näherung von rund 0,4 M.-%  $Cl/z$  (Betaverteilung:  $\mu = 0,6$ ;  $\sigma = 0,15$ ) ausgegangen werden [26]. In ersten nach [27] durchgeführten Lebensdauerberechnungen hätte ein durch ECR-Einsatz erhöhter kritischer Chloridgehalt (Betaverteilung:  $\mu = 0,9$ ;  $\sigma = 0,15$ ) einen erheblichen Einfluss auf die Einleitungsphase und damit auf ESLINI. Für die Lebensdauerberechnung wurden folgende Modelleingangsparameter verwendet, siehe Tab. 2.

In der durchgeführten Modellrechnung unterschreitet die Variante BSt eine gewählte Zielzuverlässigkeit von  $\beta = 0,5$  (Grenz Zustand der Gebrauchstauglichkeit für den Fall der Depassivierung) bereits nach 14 Jahren. Im angenommenen Fall eines erhöhten kritischen Chloridgehalts durch den Einsatz von ECR verlängert sich der Zeitraum auf 28 Jahre. Im Beispiel würde somit eine Erhöhung des kritischen Chloridgehalts von im Mittel 0,6 auf 0,9 M.-%  $Cl/z$  (siehe Tab. 2) bewirken, dass sich der Zeitraum der Einleitungsphase verdoppelt ( $ESLINI = 14$  Jahre).

Tab. 2 Verwendete Modelleingangsparameter zur Lebensdauerberechnung nach [26]

Nr.	Variable	Bechreibung	Einheit	Verteilung*	Mittelwert m	Standardabweichung s
1	$C_{S,\Delta x}$	Ersatzoberflächenkonzentration bei XD3	[M.-%/z]	LogN	2,6	1,2
2	$\Delta x$	Tiefenlage der Ersatzoberflächenkonzentration	[mm]	BetaD $0 \leq \Delta x \leq 50$	8,9	5,6
3	$T_{IST}(k_e)$	Bauteiltemperatur	[K]	ND	282,0	7,0
4	$D_{RCM,0}$	Chloridmigrationskoeffizient eines CEM I mit w/z = 0,45	[mm <sup>2</sup> /a]	ND	320,0	64,0
5	a	Altersexponent	[-]	BetaD $0 \leq a \leq 1$	0,30	0,12
6	$d_c$	Betondeckung bei XD3	[mm]	ND	55,0	8,0
7	$C_{crit}$	Kritischer Chloridgehalt	[M.-%/z]	BetaD $0,2 \leq C_{crit} \leq 2,0$	BSt : 0,60 bzw. ECR: 0,90	0,15
8	$b_e(k_e)$	Regressionsparameter	[-]	ND	4800	700
9	$T_{ref}(k_e)$	Referenztemperatur	[K]	C	293	-
10	$k_t$	Testparameter	[-]	C	1,0	-
11	t0	Referenzzeitpunkt	[a]	C	0,0767	-

\* LogN: Logarithmische Normalverteilung, ND: Normalverteilung, BetaD: Betaverteilung, C: Konstante

## 5 Praxiserfahrungen an Bauwerken mit ECR

### 5.1 Fallstudie „Brücke Schießbergstraße“ in Leverkusen, Deutschland

#### 5.1.1 Das Bauwerk

Die Brücke Schießbergstraße in Leverkusen ist eine dreifeldrige massive Plattenbrücke mit einer gesamten Spannweite von ca. 53 m (Bild 6). Sie ist 9,70 m breit und die Plattendicke beträgt 1,12 m. Die Brücke ist in Längsrichtung mit nachträglichem Verbund vorgespannt. Die Brücke wurde 1991 hergestellt.

Bild 6 Außenansicht der Brücke Schießbergstraße in Leverkusen im Jahr 2012



Um die nichttragende Bewehrung in den Brückenkappen vor Tausalzen (Chlorideintrag) zu schützen und damit die Dauerhaftigkeit zu erhöhen, wurden beide Brückenkappen vollflächig mit der damals neusten Generation epoxidharzbeschichteter Bewehrung ausgeführt. Hierbei wurde die obere und untere Bewehrungslage vollflächig beschichtet (siehe Bild 7).

Der eingebaute Beton entspricht einem heutigen C30/37 (geplanter w/z-Wert: 0,45). Neuartig für damalige Verhältnisse war der Einsatz von Hochofenzement (CEM III/A: 400 kg/m<sup>3</sup>). [28]

Im Rahmen einer Bauwerksuntersuchung im Mai 2012 wurde die Korrosionsschutzwirkung der eingebauten ECR nach 21 Jahren Nutzungsdauer eingehend untersucht. Neben einer visuellen Begutachtung vor Ort (Rissaufnahme und Kartierung) wurde die Betondeckung zerstörungsfrei gemessen und zahlreiche Bohrkern mit ECR entnommen und für weiterführende Laboruntersuchungen ans Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) zurücktransportiert. Zuvor wurde der Feuchtezustand der Bohrkern sofort vor Ort mittels PE-Folie konserviert. Die in Folie verpackten Bohrkern wurden anschließend am cbm im Laborklima 20°/85% r.F. gelagert. Der Fokus der nachfolgenden Laboruntersuchungen zielte auf Informationen zum Feuchte- und damit zum Beschichtungswiderstand von ECR nach 21 Jahren Praxiseinsatz. Zusätzlich wurden an ausgesuchten Bohrkernen Chloridprofile ermittelt.

### 5.1.2 Ergebnisse am Bauwerk

Die erste visuelle Begutachtung der Brückenkappe war durchweg positiv. Es konnten keinerlei korrosionsbedingte Risse oder Abplatzungen festgestellt werden. Lediglich last- bzw. spannungsinduzierte Risse, welche von den Rissbreiten keine Einschränkungen in der Dauerhaftigkeit erwarten lassen (i.d.R. Rissbreiten kleiner 0,30 mm), wurden registriert. Die gemessenen Betondeckungen (Ergebnisse siehe in Bild 7) waren überdurchschnittlich hoch (i.d.R. immer größer als 50 mm). Zudem konnte eine leichte Zunahme der Betondeckung vom Fahrbahnrand hin zur Kappenaußenseite beobachtet werden (d.h. die Entwässerung verläuft Richtung Fahrbahn). Die zum Teil beim Bohren freigelegten beschichteten Stäbe waren alle in einwandfreiem Zustand. Das heißt, visuell konnten keinerlei Fehlstellen oder Enthaltungen an der Beschichtung bzw. Anzeichen von Korrosion (auch an den Schnittflächen) festgestellt werden. Die ursprünglich glänzend rote Beschichtungsfarbe war auch nach 21 jähriger Einlagerung im alkalischen Milieu des Betons unverändert erhalten. Ein entnommener Bohrkern mit freigelegter ECR ist beispielhaft in Bild 8 dargestellt.

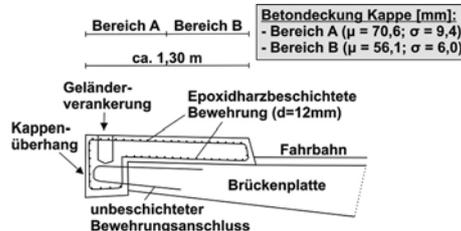


Bild 7 Detail Brückenkappe (Brücke Schießbergstraße) mit Angaben zur Betondeckung



Bild 8 Freigelegte epoxidharzbeschichtete Bewehrung an der Bruchfläche (Unterseite) eines entnommenen Bohrkerns mit D=150 mm

Um in der damaligen Herstellungsphase die Beschichtung möglichst nicht zu beschädigen, wurde zum Verbinden der Stäbe isolierter Bindedraht verwendet, siehe Bild 8.

Ergänzende Untersuchungen zum tiefengestaffelten und damit auf Bewehrungshöhe vorliegenden Chloridgehalt wurden anhand entnommener Bohrmehlproben aus den Bohrkernen durchgeführt. Die relevanten Chloridgehalte auf Bewehrungshöhe (mittlere Betondeckung im Kappenbereich A: ca. 70 mm, siehe Bild 7) liegen alle unter den üblicherweise als kritischer Chloridgehalt herangezogenen Werte [20; 21]. Das heißt, dass beispielsweise eine obere den Chloriden ausgesetzte unbeschichtete Bewehrungslage auch nach 21 Jahren Nutzungsdauer immer noch passiv vorliegen würde. Gemäß Bild 2 befindet sich das Bauwerk hinsichtlich des Schädigungsgrades hierdurch noch eindeutig in der Einleitungsphase.

## 5.2 Fallstudie Brücke Spiez, Schweiz

### 5.2.1 Das Bauwerk

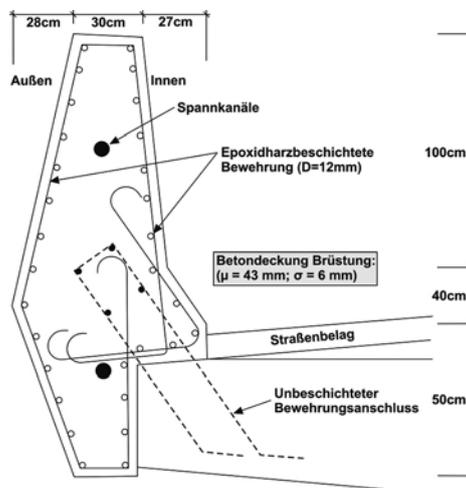
Die Brücke in Spiez („Rampe Frutigen J4c“) ist das erste Bauprojekt in der Schweiz, bei dem in den beiden vorgespannten Brüstungen (Kappen) der vierfeldrigen Brücke (Länge x Breite: 57 m x 11,80 m) epoxidharzbeschichtete Bewehrung verwendet wurde. Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit zwischen dem Bundesamt für Straßenbau, dem Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion der ETH Zürich und der Beschichtungsfirma Ende 1988 fertiggestellt. Ziel des Bauvorhabens war das Sammeln von Erfahrungen bei der Handhabung und dem Einbau von epoxidharzbeschichteter Bewehrung und Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Beschichtung bzw. des ganzen Bauteils.



Bild 9: Außenansicht der Brücke in Spiez im Bauzustand 1988.

Zu Vergleichszwecken wurde je eine Hälfte der beiden Kappen mit beschichteter bzw. unbeschichteter Bewehrung erstellt. In Bild 9 ist die Brücke im Bauzustand abgebildet. An der Betonierfuge im Bildvordergrund sind herausragende rotgefärbte epoxidharzbeschichtete Bewehrungsstähle zu erkennen. Der damals verwendete Beton entspricht einem heutigen C30/37.

Bild 10: Konstruktive Durchbildung der untersuchten Brüstung der Brücke Spiez mit Angaben zur Betondeckung



Im Rahmen einer Bauwerksuntersuchung im Oktober 2012 wurde die Korrosionsschutzwirkung der eingebauten ECR nach 24 Jahren Nutzungsdauer in gleicher Weise wie in Leverkusen (Kapitel 5.1) untersucht. Auch hier wurden neben einer visuellen Begutachtung (Rissaufnahme) auch die Betondeckungen zerstörungsfrei gemessen und zahlreiche Bohrkern mit ECR aus der Brüstung (Innenseite) entnommen und für weiterführende Laboruntersuchungen ans Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) transportiert. Die konstruktive Durchbildung der Brüstung ist schematisch in Bild 10 dargestellt.

Details zum Vorgehen der Entnahme und nachträglichen Lagerung sind Kapitel 5.1.1 zu entnehmen. Der Fokus der nachfolgenden Laboruntersuchungen zielte wiederum speziell auf den Beschichtungswiderstand von ECR nach 24 Jahren Praxiseinsatz. An ausgesuchten Bohrkernen (D = 100 mm) wurden zudem Chloridprofile ermittelt.

### 5.2.2 Ergebnisse am Bauwerk

Im Zuge der visuellen Begutachtung der Brückenbrüstung konnten keinerlei korrosionsbedingte Risse oder Abplatzungen festgestellt werden. Jedoch konnten trotz Vorspannung diverse durchgängige Trennrisse (an der Innen- und Außenseite der Brüstung zu erkennen) mit Rissbreiten von z. T. mehr als 0,8 mm beobachtet werden. Bei solchen Rissbreiten ist im Normalfall (unbeschichtete Bewehrung) mit Einbußen in der Dauerhaftigkeit des Bauteils zu

rechnen. Die gemessenen Betondeckungen lagen über den damaligen Anforderungen und wiesen eine verhältnismäßig geringe Streuung auf, siehe Bild 10.

Die zum Teil beim Bohren freigelegten beschichteten Stäbe waren alle in einwandfreiem Zustand. Das heißt, visuell konnten keinerlei Fehlstellen oder Enthaltungen an der Beschichtung bzw. Anzeichen von Korrosion festgestellt werden.

Die ursprüngliche Beschichtungsfarbe (glänzend rot) war auch nach 24 jähriger Einlagerung im alkalischen Milieu des Betons unverändert erhalten, vgl. Brücke Leverkusen. Ein vor Ort entnommener und gebrochener Bohrkern mit freigelegter ECR ist beispielhaft in Bild 11 dargestellt.

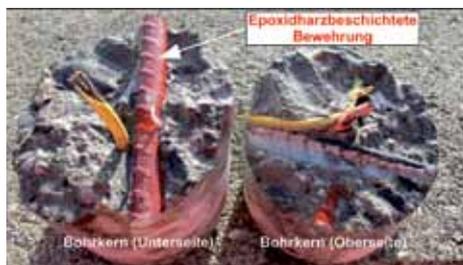


Bild 11 Freigelegte epoxidharzbeschichtete Bewehrung an einem vor Ort entnommenen und gebrochenen Bohrkern mit D = 100 mm

Die ermittelten Chloridgehalte auf Bewehrungshöhe lagen alle unter 0,4 M.-%/z. Das Bauteil befindet sich deshalb hinsichtlich des Schädigungsgrades immer noch in der Einleitungsphase, vgl. Brücke Leverkusen.

## 6 Ergebnisse zu Beschichtungswiderständen: Labor- vs. Praxis

Um die Korrosionsschutzwirkung in der Einleitungsphase dennoch beurteilen zu können, wurden die in den Bohrkernen befindlichen epoxidharzbeschichteten Stähle mit Hilfe der elektrochemischen Impedanz Spektroskopie (EIS) untersucht.

Die EIS ist ein zerstörungsfreies dynamisches Messverfahren zur Analyse elektrischer und elektrochemischer Systeme [29]. Für die Untersuchung wird das System durch eine Wechselspannung ( $\Delta U = 10 \text{ mV}$ ) angeregt, dessen festzulegende Frequenz ( $\omega$ ) innerhalb eines weiten Bereiches variiert wird. Dadurch wird das System aus seiner Gleichgewichtslage gebracht und seine resultierende Reaktion auf diese Auslenkung aufgezeichnet. Die Impedanz  $Z$  (Wechselstromwiderstand) ist frequenzabhängig und entspricht dem Quotienten aus Erregersignal (Spannung) und Systemantwort (Strom).

Zur Bewertung einer intakten organischen Beschichtung mit hoher Schutzwirkung kann ein sogenanntes Randles-Element als Ersatzschaltbild verwendet werden [14]. Die Ergebnisse für den Beschichtungswiderstand entsprechen hier der Impedanz bei einer Frequenz  $f = 0,1 \text{ Hz}$ .

Die experimentelle Durchführung einer Impedanzmessung setzt einen klassischen Drei-Elektroden-Versuchsaufbau voraus.

Im vorliegenden Fall wurde dieser Aufbau gemäß Bild 12 realisiert.

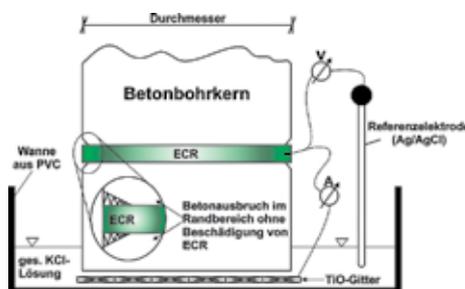


Bild 12 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Durchführung einer elektrochemischen Impedanz Spektroskopie (EIS) an einem Bohrkern

Der zu untersuchende Bohrkern wurde mit der glatten Betonoberfläche auf einem Titanmischoxidgitter (Gegenelektrode) in einem Wasserbad aus gesättigter KCl-Lösung gelagert. Als Referenzelektrode wurde eine Ag/AgCl-Elektrode verwendet. Zur Vermeidung eines elektrolytischen Kontaktes zwischen der Schnittfläche von ECR (Arbeitselektrode) und dem Beton, wurde der Beton im Randbereich vorsichtig entfernt, Bild 12. Um eine

Betonaustrocknung während der Messung zu vermeiden, wurden alle Versuche unter konstanten Klimabedingungen (20°C und 85% r.F.) durchgeführt.

Die Ergebnisse der Beschichtungswiderstände von ECR in Bohrkernen der beiden Fallstudien (Leverkusen und Spiez) sind in Tab. 3 dargestellt. Es bleibt zu bemerken, dass die in diesem Kapitel dargestellten absoluten Ergebnisse zum Beschichtungswiderstand nicht direkt mit denen aus Kapitel 3 zu vergleichen sind (unterschiedliche Messtechnik und Elektrodenoberflächen: LCR vs. EIS).

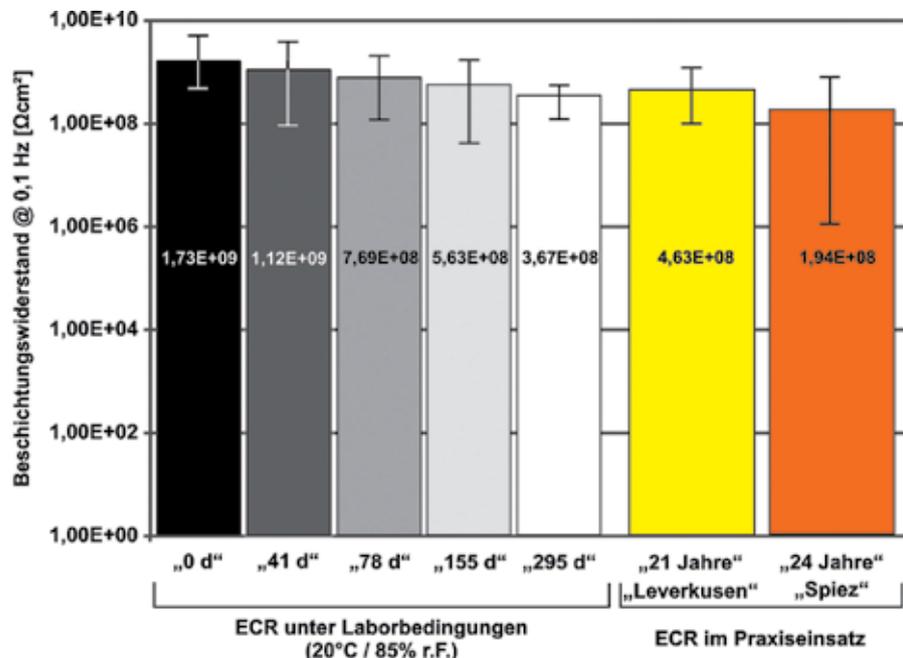
Tab. 3 Ergebnisse der Beschichtungswiderstände von ECR-Proben nach mehr als zwei Jahrzehnten Nutzungsdauer

Bohrkerne	Beschichtungswiderstand mittels EIS @ 0,1 Hz [ $\Omega\text{cm}^2$ ]	
	Brücke Leverkusen	Brücke Spiez
1	2,6364E+08	1,5749E+08
2	1,0183E+08	3,1557E+06
3	1,8808E+08	8,7383E+08
4	7,3686E+08	4,2494E+07
5	6,9780E+08	1,1119E+06
6	2,4677E+08	8,8529E+07
7	1,2228E+09	-
8	2,4561E+08	-
Mittelwert	4,6293E+08	1,9444E+08
MIN	1,0183E+08	1,1119E+06
MAX	1,2228E+09	8,7383E+08

Parallel zu den Bohrkernuntersuchungen wurden sechs neue Betonprobekörper (Betondeckung: 20 mm) mit neuwertigen epoxidharzbeschichteten Bewehrungsstäben hergestellt und ab dem 1. Tag in Klima 20°/85% r.F. gelagert. Am Bauwerk und in den neuen Laborversuchen lagen ähnliche Beschichtungsdicken vor. In vergleichbarer Weise zu den Bohrkernen wurden hier zu verschiedenen Zeitpunkten Impedanzmessungen durchgeführt. Die erste Messung

wurde noch am Tag der Herstellung durchgeführt und mit „0 d“ bezeichnet. Nach 41, 78, 155 und 295 Tagen wurden weitere Messungen durchgeführt. Alle Ergebnisse (Labor und Praxis) sind in Form von Mittel- und MIN/MAX-Werten in Bild 13 im logarithmischen Maßstab zusammengestellt.

Bild 13 Durch EIS ermittelte Beschichtungswiderstände von ECR anhand Laborprobekörper zu verschiedenen Zeitpunkten im Vergleich zu ECR nach über zwei Jahrzehnten Praxiseinsatz



Das Erreichen einer relativen Feuchtesättigung scheint bei ECR unter Laborbedingungen (20°C und 85% r.F.) durch den umgebenden Beton („Pufferwirkung“) verzögert einzutreten. Von einer relativen Sättigung ist hier erst ab ca. 3-4 Monaten auszugehen. Die in Lösung

gelagerten beschichteten Edelstahlplatten (vergleiche Bild 4) erreichten eine Sättigung bereits nach ca. 20 Tagen.

Die Ergebnisse aus den Bauwerken zeigen, dass die Beschichtungswiderstände der entnommenen Bauwerksproben auch nach mehr als 21 Jahren Praxiseinsatz (natürliche, zentraleuropäische Witterungsbedingungen) mit Laborproben, welche lediglich für mehrere Monate in Klima 20°/85% r.F. eingelagert wurden, vergleichbar sind. Selbst die höhere Streuung um den Mittelwert bei „Spiez“ mit einem Minimalwert von  $1,1 \cdot 10^6 \Omega\text{cm}^2$  verspricht noch eine hoch wirksame Abschirmung des Betonstahls vom Elektrolyten. Der hohe auch noch nach zwei Jahrzehnten wirksame mittlere Beschichtungswiderstand im Bereich von  $10^8 \Omega\text{cm}^2$  bedeutet, dass die Beschichtung weder durch den anstehenden pH-Wert des umgebenden Betons, noch durch Enthaltungs- oder Alterungsprozesse wesentlich geschädigt wurde.

Das heißt, die vorgefundene epoxidharzbeschichtete Bewehrung liegt auch nach zwei Jahrzehnten Nutzungsdauer noch nahezu neuwertig im Beton vor. Es ist anzunehmen, dass die Beschichtung auch in Zukunft eine hochwirksame Barriere für auf Bewehrungshöhe ankommende Chloride darstellen wird. Dass das Beschichtungsmaterial fast unverändert im Vergleich zum neuwertigen Ursprungsmaterial vorliegt, bestätigten zusätzliche Untersuchungen zur Glasübergangstemperatur  $T_g$ . Die an Pulverscherben mit Hilfe von DSC (Differential Scanning Calorimetry) ermittelte  $T_g$  stimmte noch mit dem Ursprungsmaterial überein. Eine Verschiebung von  $T_g$  wäre ein Indiz für die Alterung bzw. Degradation des Beschichtungsmaterials gewesen.

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die zum Teil kontroverse Berichterstattung zur Korrosionsschutzwirkung von ECR im Praxiseinsatz stellte die Motivation zur Untersuchung der beiden einzigartigen Pilotprojekte dar. Zum Einsatz kam jeweils die noch heute aktuelle Generation von Epoxidharzbeschichtungen der Fa. Akzo Nobel Powder Coatings GmbH. Die baupraktische Ausführung und Einbaubedingungen (z.B. erhöhte Sicherheitsmaßnahmen zur Fehlstellenvermeidung) beruhten auf der damals gültigen Richtlinie des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), [5] bzw. des Schweizer Bundesamtes für Straßen (ASTRA) [6]. Beide Richtlinien unterscheiden sich nur unerheblich. Die damaligen Voraussetzungen (Material, vollflächige Beschichtung, Einbaubedingungen usw.) sowie die über die Zeit vorherrschenden Klimabedingungen vor Ort, ließen ein bis heute wirksames Korrosionsschutzsystem entstehen. Die Möglichkeit das bestehende Korrosionsschutzsystem nach mehr als zwei Jahrzehnten Nutzungsdauer mit aktuellen Untersuchungsmethoden (hier: Beschichtungswiderstand über EIS) zu vergleichen, lieferte neue Erkenntnisse zum Langzeitverhalten und damit der Langzeitstabilität des Korrosionsschutzpotentials epoxidharzbeschichteter Bewehrung:

Die untersuchte epoxidharzbeschichtete Bewehrung liegt auch noch nach mehr zwei Jahrzehnten Praxiseinsatz „wie neu“ vor!

Aufgrund fehlender bzw. nicht feststellbarer Fehlstellen vor Ort und zugleich niedriger Chloridgehalte auf Bewehrungshöhe können mit den dargestellten Untersuchungen nur Aussagen zur Einleitungsphase getroffen werden. Jedoch bleibt zu bemerken, dass auch in Anwesenheit von kleinen Fehlstellen die untersuchte Beschichtung in beiden Fallstudien bei auf Bewehrungshöhe ankommenden Chloriden Vorteile hinsichtlich des wirksamen kritischen Chloridgehalts gegenüber konventionellem Betonstahl haben dürfte. Die Grö-

Benordnung der Lebensdauererlängerung (ESLINI) konnte überschlägig durch eine Beispielrechnung in Kapitel 4 abgeschätzt werden (hier: Verlängerung der Einleitungsphase um Faktor 2).

Die Korrosionsschutzwirkung von ECR bei vorhandenen Fehlstellen und Chloridgehalten über dem kritischen Chloridgehalt (Schädigungsphase, Bild 4) kann nicht beurteilt werden. Mit dieser Fragestellung und mit dem Gesamtziel das Korrosionsschutzpotential über die gesamte Lebensdauer (Einleitungs- und Schädigungsphase) quantitativ zu bewerten, beschäftigt sich derzeit ein aktuelles Forschungsvorhaben [30] mit einem geplanten Projektende bis März 2014. Etwaige ausstehende positive Ergebnisse hierzu, würden diesem Korrosionsschutzsystem vielseitige Anwendungsfelder in Zukunft eröffnen.

## 8 Literatur

- [1] ANGST, U.; HOOTON, R.D.; MARCHAND, J.; PAGE, C.L.; FLATT, R.J.; ELSENER, B.; GEHLEN, C.; GULIKERS, J.: Present and future durability challenges for reinforced concrete structures. *Materials and Corrosion* 63 (2012), pp.1047–1051.
- [2] ZINTEL, M.; GEHLEN, C.; PRUST, P.: Epoxy-coated reinforcement – Life cycle cost considerations. *Proceedings of Concrete Solutions* (2011), 4th International Conference on Concrete Repair, Dresden, Germany, 26–28 September.
- [3] ISECKE, B.: Praktische Erfahrungen mit epoxidharzbeschichteten Bewehrungsstählen in den USA. *Bautenschutz und Bausanierung*, 10. Jahrgang Heft 2 (1987), S. 72–78.
- [4] SAGÜÉS, A. ET AL.: Corrosion of epoxy coated rebar in Florida Bridges. Final Report to Florida Department of Transportation, WPI 0510603 (1994).
- [5] DIBT: Richtlinie für Prüfungen an Betonstählen mit Epoxidharz-Beschichtung. Deutsches Institut für Bautechnik (1990).
- [6] ASTRA: Richtlinien zur Anwendung von epoxidharzbeschichteten Betonstählen. Schweizer Bundesamt für Straßenbau (1991).
- [7] ASTM A 775/A 775M – 07B: Standard specification for epoxy-coated steel reinforcing bars. American Society for Testing and Materials (2007).
- [8] FEIN, H.-D.; KORMANNSHAUS, A.: Verwendung von epoxidharzbeschichtetem Bewehrungsstahl bei der Erweiterung einer Rückkühlanlage. *Beton- und Stahlbetonbau* Volume 85 (1990), Heft 8, S. 206–209.
- [9] RICHNER, R.; KÜRSTEINER, J.: Einsatz von epoxidharzbeschichteten Bewehrungsstählen im Betonbau. *Astra/AGB Bericht* Nr. 557 (2001).
- [10] SCHIEBL, P.; REUTER, C.: Bond strength of epoxy-coated reinforcing bars. *Proceedings of the International Conference "Bond in Concrete - From Research to Practice"* (1992). Riga, Latvia, 15.-17.10.1992, pp. 511-520.
- [11] MCDONALD, D.: Changes that improve performance—A review of 40 years of development of epoxy-coated reinforcing steel. Paper presented at the ACI 123 Tampa (2011), April 03.-07., Tampa, Florida, USA.
- [12] HARTLEY, J.: Improving the performance of fusion-bonded epoxy-coated reinforcement. *Concrete* (1994), Vol. January/February, pp. 12-15.
- [13] SCHIEBL, P.; BRAUER, N.; GEHLEN, C.: Forschungsvorhaben - Impedanzmessung. Institut für Bauforschung, Forschungsbericht Nr. F360 (1994). RWTH Aachen.
- [14] SCHIEBL, P.; MOERSCH, J.; BRAUER, N.; GEHLEN, C.: Untersuchungen zur Korrosionsschutzwirkung von Epoxidharzbeschichtungen auf Betonstählen. Institut für Bauforschung, Forschungsbericht Nr. F480 (1996). RWTH Aachen.

- [15] SCHIEßL, P. ET AL.: Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen auf Bewehrungskorrosion - Teil 1: Systemparameter der Bewehrungskorrosion. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2012), Heft 601, Berlin: Beuth-Verlag.
- [16] SCHIEßL, P. ET AL.: Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen auf Bewehrungskorrosion: Teil 2: Dauerhaftigkeitsbemessung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2012), Heft 602, Berlin: Beuth-Verlag.
- [17] MCDONALD, D.: Do epoxy-coated bars provide cost-effective corrosion protection? Paper presented at the FHWA Bridge Engineering Conference: Highways for LIFE and Accelerated Bridge Construction (2010), April 08-09, Orlando, Florida, USA.
- [18] BS ISO 14654:1999: Epoxy-coated steel for the reinforcement of concrete. British Standards Institution (1999).
- [19] CUR AANBEVELING 29: Met Epoxy Bekleed Betonstaal. Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (1992).
- [20] BREIT, W.: Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt von Stahl in Beton. Dissertation, Institut für Bauforschung (1997), RWTH Aachen.
- [21] ANGST, U.; ELSENER, B.; LARSEN C.K.; VENNESLAND, Ø.: Critical chloride content in reinforced concrete – A review. Cement and Concrete Research 39 (2009), pp. 1122–1138.
- [22] ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P.: Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. Cement and Concrete Research 30 (2000), pp. 1047–1055.
- [23] MAMMOLITI, L.T. ET AL.: The influence of surface finish of reinforcing steel and pH of the test solution on the chloride threshold concentration for corrosion initiation in synthetic pore solutions. Cement and Concrete Research 26 (1996), pp. 545–550.
- [24] MOHAMMED, T.U.; HAMADA, H.: Corrosion of steel bars in concrete with various steel surface conditions. ACI Materials Journal 103 (2006), pp. 233–242.
- [25] ANGST, U.: Probabilistic considerations on the effect of specimen size on the critical chloride content in reinforced concrete. Corrosion Science 53 (2011), pp. 177–187.
- [26] GEHLEN, C.; SCHIEßL, P.; SCHIEßL-PECKA, A.: Hintergrundinformationen zum Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J. Beton- und Stahlbetonbau (2008), Vol. 103, Heft 12, S. 840-851.
- [27] GEHLEN, C.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2000), Heft 510, Berlin: Beuth-Verlag.
- [28] WOLFF, R.; MIEßELER, H.J.: Die Brücke Schießbergstraße in Leverkusen. Beton 4/91 (1991).
- [29] ENDE, D.; MANGOLD, K.M.: Impedanzspektroskopie. Chemie in unserer Zeit (1993). 27. Jahrg., Nr.3.
- [30] ZINTEL, M.: Zur quantitativen Bewertung des Korrosionsschutzpotentials epoxidharzbeschichteter Bewehrung. Dissertation, TU München, 2014 (In Vorbereitung).

Beitrag zur 1st international conference on the chemistry of construction materials (07.-09.10.2013 in Berlin)

## 10.4. Acid Attack on Concrete – Structure of the Corroded Surface Layer

T. Gutberlet, H. Hilbig, R. E. Beddoe

TU München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Munich, Germany

### Introduction

Aimed at improving acid resistance, concrete is currently produced with increasingly less Portland cement clinker and more additions such as ground granulated blast-furnace slag, silica fume, fly ash or metakaolin /1, 2/. Higher acid resistance and therefore longer service life for concrete in, for example, cooling towers where unprotected concrete can be exposed to a pH below 4, is of considerable economic importance. The effect of additions on acid resistance cannot be understood purely in terms of the criteria of conventional concrete technological, because the properties of the corroded surface layer as a protective barrier - rather than the original concrete - are decisive /3/. The permeability, strength and the structure of the corroded material are determined by the effect of additions on a) the  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content and porosity of the original concrete as well as b) the aluminium content and polymerisation of C S H or C (A) S H (calcium (alumo)silicate hydrate). Among other investigation methods,  $^{29}\text{Si}$  and  $^{27}\text{Al}$  NMR spectroscopy were used to determine the polymerisation and cross-linking of the silicate and aluminium phases in the corroded material.

### Materials and Methods

#### Sample Preparation

Three pastes were prepared at a water to binder ratio (w/b) of 0.4 using a) pure CEM I 42.5R, designated OPC, b) CEM I 42.5R with 10 wt.% metakaolin, designated MK and c) CEM I 42.5R with 35 wt.% ground granulated blast-furnace slag, designated GGBS. Immediately after blending, the pastes were poured into capped cylindrical containers 3 cm in diameter. After 90 days of storage at 20 °C, the samples were cut into disks of 3.00 mm in thickness using a precision saw. To mimic a pH dependent acid attack of hydrochloric acid, an automatic titrator with twelve sample positions was used. One position was for cleaning the pH electrode between the measurements and three for each mixture at pH 2, 3 and 4, respectively. For each sample position, three disks of one mixture were weighed and placed in a special sample holder in a capped beaker which enabled continuous stirring. 150 ml of HCl at the appropriate pH was added. To keep the pH values as constant as possible each sample position was measured every 10 minutes. To readjust the pH, 1 molar HCl was added and the volume documented. After 28 days the samples were removed, dried at 40 °C, weighed and stored in a  $\text{N}_2$  atmosphere.

#### Nuclear Magnetic Resonance

For all pH values and mixtures, as well as references (before acid attack), samples were ground in isopropyl alcohol. The dry fine powders were filled in zirconia rotors (4 mm for Al, 7 mm for Si). Spectra were recorded with a Bruker Avance 300 spectrometer (magnetic field strength 7.0455 T) in MAS mode (magic angle spinning) with single pulse technique.

Table 1: Parameter used for NMR experiments

	Resonance frequency	Rotation speed	Repetition time	Number of scans	Shifts relative to
<sup>27</sup> Al	78.21 MHz	14 kHz	0.5 s	2000	Al(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> <sup>3+</sup>
<sup>29</sup> Si	59.63 MHz	5 kHz	5.0 s	15000	Si(CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>

### X-ray Diffraction

The samples used for NMR were also used for XRD. For quantitative evaluation they were homogenized with 20 wt.% ZnO. The measurements were performed using an XRD 3003 TT diffractometer of GE Sensing & Inspection Technologies with  $\theta$ - $\theta$  configuration and Cu K $\alpha$  radiation ( $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ). Spectra were recorded over scattering angles between 5° and 70° at step widths of 0.02°, with each step measured for 6 s.

### Results and Discussion

The condition, composition and amount of the C (A) S H phases are decisive for the resistance against acid attack and, after corrosion, characterize the degree of damage. The sample GGBS has the highest and MK the lowest C (A) S H content (see Table 2). The mean chain length (CL) of the (alumo)silicate hydrates is given by the distribution of Si in Q1 and Q2 coordination [4]. The effect of pH on the coordination of Si in the C (A) S H is shown in Fig. 1.

Table 2: Characteristics of the reference material by <sup>27</sup>Al/<sup>29</sup>Si NMR and XRD

	Unreacted		C (A) S H		
	Clinker	Addition	Amount	CL	Al/Si
OPC	22 wt. %	-	54 wt. %	3.6	0.06
MK	28 wt. %	2 wt. %	51 wt. %	6.4	0.17
GGBS	22 wt. %	3 wt. %	60 wt. %	4.3	0.08

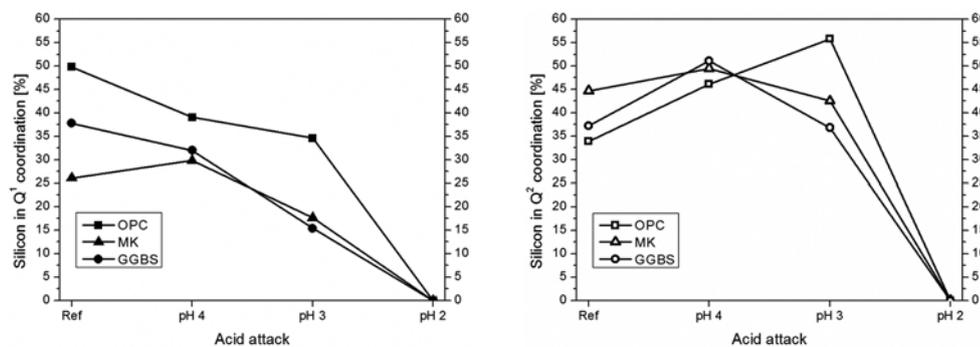


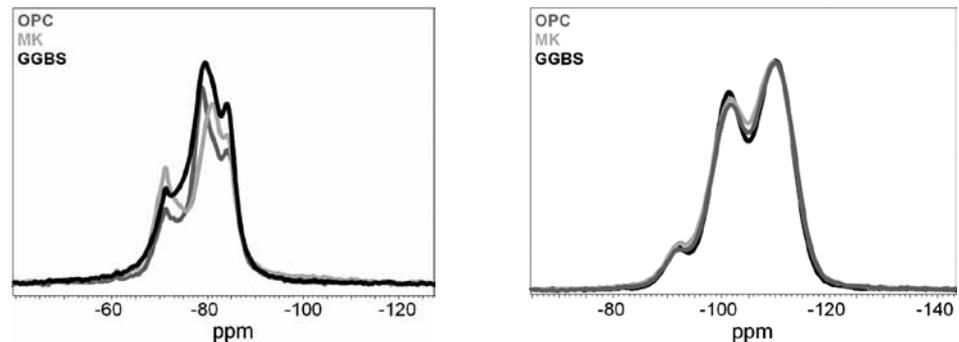
Fig. 1: pH dependence of silicon in Q<sup>1</sup> (left) and Q<sup>2</sup> (right) coordination, representing the condition of C (A) S H after corrosion

Table 3: Composition of the samples before (Ref) and after acid attack at pH 2 and the respective consumption of 1 molar HCl

		OPC	MK	GGBS
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [wt. %]	Ref	5.1	8.8	6.8
	pH 2	0.7	3.3	0.5
CaO [wt. %]	Ref	62.8	56.4	53.4
	pH 2	1.3	1.7	0.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [wt. %]	Ref	3.6	3.3	2.5
	pH 2	7.7	5.9	1.9
SiO <sub>2</sub> [wt. %]	Ref	19.3	22.6	24.9
	pH 2	86.9	80.8	93.1
Acid consumption	pH 2	236 ml	202 ml	207 ml

Taking the complete disintegration of C (A) S H to define the corroded layer, this condition is only reached with pH 2 for all mixtures. Apparently, all the mixtures have the same resistance against HCl attack at pH 2. Although complete corrosion of the OPC sample needed somewhat more acid. Nevertheless, the final corrosion products have a very similar structure (see Fig. 2) and composition (see Table 3). The solid residuals are completely amorphous and the silicon is mainly in Q<sup>3</sup> and Q<sup>4</sup> coordination. Thus the completely corroded layer is probably a silica framework with no long range order containing some foreign ions for reasons of charge equalisation.

Fig. 2: <sup>29</sup>Si NMR spectra of the references (left) and corroded samples after 28 d in HCl at pH 2 (right)



Already at pH 4, all experimental methods revealed for every mixture significant changes compared with the references. The most important aspect is the complete loss of portlandite (XRD). Moreover, the Q<sup>1</sup>/Q<sup>2</sup> ratio changes markedly. These results are being investigated in more detail at the moment.

### Conclusions

The structure and composition of hardened Portland cement paste after corrosion for 28 d in HCl at pH 2 is not significantly affected by the addition of ground granulated blast-furnace slag or metakaolin. The completely corroded product is most likely a silica framework without long range order which contains some incorporated impurities. The definition of the corroded layer in terms of complete C-(A)-S-H disintegration should be reconsidered in view of the results for the pH 3 and pH 4 samples.

## References

- /1/ R. Hüttl, B. Hillemeier:  
"Hochleistungsbeton: Beispiel Säureresistenz"  
Betonwerk und Fertigteile-Technik (2000) 66, 52-60.
- /2/ L. Lohaus, L. Petersen, R. Griese:  
"Beton mit hohem Säurewiderstand für den Kühlturmbau - eine Zwischenbilanz"  
beton (2009) 9, 370-379.
- /3/ R.E. Beddoe, H. Hilbig: "Modelling the evolution of damage to concrete by acid attack", in: Simulation of time dependent degradation of porous materials, Cuvillier Verlag Göttingen, Hamburg, (2008), pp. 275-292.
- /4/ P. Colombet, A.-R. Grimmer, H. Zanni, P. Sozzani: "Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy of Cement-Based Materials", Springer, Berlin Heidelberg, (1998).

**Concrete Solutions, 57. BetonTage, 05.-07. Februar 2013, Neu-Ulm**

### 10.5. Entwicklung und Prüfung von Betonen mit Selbstheilungscharakter

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Große und Fabian Malm, MSc.

Die Entwicklung von Selbstheilungseigenschaften für zementgebundene Baustoffe ist ein aktuelles Forschungsthema. Die autogene Heilung, bei der wasserdurchströmte Trennrisse sich selbst abdichten, ist seit langem bekannt und wurde eingehend untersucht (Yang et al. 2009; Edvardsen 1996; Jooß 1999). Die Ursachen für diesen Vorgang können ein Quellen des Zementsteins, eine Nachhydratisierung oder eine Carbonatisierung durch Bildung von Calciumcarbonat sein. Durch diese Heilungsmechanismen lassen sich allerdings nur kleine Risse schließen. Deswegen wird seit einigen Jahren (Van Tittelboom & De Belie 2010) mit anderen Techniken experimentiert, die jeweils für unterschiedliche Rissarten geeignet sind. Für Risse im noch jungen Beton werden Mikroorganismen untersucht (Jonkers 2011), die Calciumcarbonat ausscheiden, sowie Zemente mit einem Zusatz an Hydrogelen, die die Füllung von Hohlräumen stimulieren können. Für dynamisch belastete Risse können Mikrokapseln mit elastischen Polymeren (Polyurethan oder Epoxidharze) eingesetzt werden (Van Tittelboom 2011). Bei einem Riss bzw. Rissfortschritt zerbrechen diese Kapseln und geben das Polymer frei, das die Risse elastisch verschließt. Die genannten Heilungsmechanismen sind Gegenstand von Untersuchungen im Rahmen des unten beschriebenen Projektes HEALCON.

Für baupraktische Anwendungen der Selbstheilung ist unbedingt der Heilungserfolg sicherzustellen und nachzuweisen. Allerdings ist die zerstörungsfreie Untersuchung des Heilungserfolges und der Heilungseffizienz sowohl für Labor- als auch für Bauwerksanwendungen schwierig. Die meisten in der Literatur erwähnten Verfahren konzentrieren sich auf die Bestimmung der Wiedererlangung der Druckfestigkeit und dabei werden in der Regel zerstörende Verfahren eingesetzt. Zu den offensichtlichen Nachteilen im baupraktischen Einsatz zählt für Laboranwendungen auch, dass das Prüfobjekt nach dem Experiment nicht mehr für weitere Analysen zur Verfügung steht. Deswegen sind zerstörungsfreie Prüfverfahren vorzuziehen.

### Zerstörungsfreie Prüfung

Die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) kann beispielsweise eingesetzt werden, um die Entstehung oder das Fortschreiten von Rissen zu beobachten. Auch die Freisetzung der Heilungsmittel sowie die Veränderung der Materialeigenschaften (Permeabilität von Gasen und Flüssigkeiten) kann untersucht werden. Die Bestimmung der Wirkungsweise von Heilungsmitteln kann danach bei der Wahl der effizientesten Heilungstechnik und zur Optimierung der Rezeptur beitragen. Geeignete zerstörungsfreie Prüfverfahren für diese Aufgabenstellung sind unter anderem die Ultraschalltechnik (in Durchschallung und Reflexion, z. B. In et al. 2013), die Schallemissionsanalyse SEA (Granger et al. 2007), die aktive oder passive Infrarot-Thermographie, Mikrowellen- und RADAR-Techniken, Schwingungs- und Modalanalyse sowie die Computer-Tomographie (für Laboruntersuchungen), Faseroptische Methoden oder das „Displacement Field Mapping“. Bei Dauerüberwachungstechniken können in drahtlose Sensorknoten zudem Sensoren für die Messung von Dehnung, Rissöffnung, Temperatur, Feuchte und elektrische Impedanz integriert werden.

### EU-Projekt HEALCON

In einem Projekt mit dem Akronym HEALCON (Self-healing concrete to create durable and sustainable concrete structures, <http://www.healcon.eu/>), gefördert von der Europäischen Kommission, werden autonome Heilungstechniken entwickelt bzw. weiterentwickelt. Dabei wird die Effizienz der Selbstheilung in Laborexperimenten mit geeigneten zerstörungsfreien Überwachungstechniken beobachtet und anschließend in Verbindung mit Simulationstechniken optimiert. Im Anschluss wird in großen Bauteilexperimenten und an Realbauwerken diese Technik implementiert, gefolgt von einer Lebenszyklusanalyse. Im Rahmen dieser Analyse müssen die ökonomischen, gesellschaftlichen und umweltrelevanten Aspekte im Vergleich zu den traditionellen Bauweisen ausgelotet werden.

Die am besten geeigneten Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung werden ausgewählt, um unter Labor- und Feldbedingungen (Klein- und Großbauteiltests) getestet zu werden. Neben ZfP-Verfahren werden Dauerüberwachungsverfahren (Structural Health Monitoring) untersucht, die eine langfristige Überwachung der Heilungseffizienz und der Materialeigenschaften ermöglichen.

### Erste ZfP-Untersuchungen zur Überprüfung des Heilungserfolgs

In einer ersten Untersuchung wurden an der Universität Stuttgart Schallemissionsexperimente durchgeführt (Van Tittelboom et al. 2012). Die Schallemissionen entstanden dabei während eines Dreipunktbiegeversuchs in Betonbalken, die mit Polymerkapseln ausgestattet waren. Die Daten wurden durch einen 8-Kanal-Transientenrekorder mit ebenso vielen Breitbandsensoren aufgezeichnet. In der Folge wurden im Rahmen des HEALCON-Projektes weitere Experimente durchgeführt, bei denen eine 16-Kanal-Apparatur verwendet wurde (Abb. 1). Die Schallemissionsentwicklung konnte vor und nach der Heilung kontinuierlich beobachtet werden und lässt sich als dreidimensionale Darstellung der Mikrorisse darstellen (Abb. 2). Diese Signale können aufgrund ihrer Amplitudenwerte (Signalenergie) unterschieden werden, wobei wahrscheinlich die größeren Amplituden dem Brechen der Mikrokapseln zuzuordnen sind.

Diese These muss allerdings noch in der laufenden Versuchsserie verifiziert werden und es ist zu erwarten, dass die Signalenergien eine Diskriminierung gegenüber Rissfortschritten

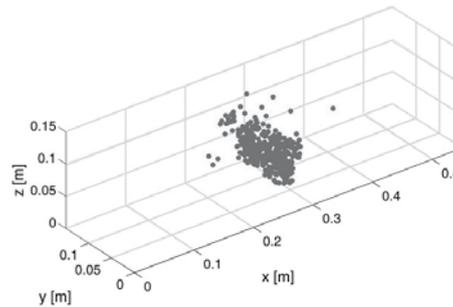
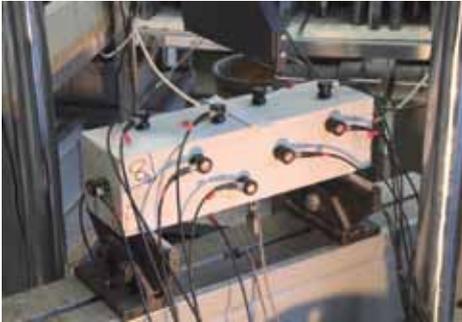


Abb. 1. (li.) Dreipunktbiege-Experimente mit 16 Kanälen (rissöffnungsgesteuert durch Dehnungsaufnehmer) zur Aufzeichnung der Schallemissionen bei Beton mit Selbstheilungscharakter.

Abb. 2: (re.) Schallemissionsaktivität im Prüfkörper aus Abb. 1 aufgezeichnet nach Selbstheilung.

oder dem erneuten Öffnen von Rissen erlauben. Eine genauere Analyse sollte beispielsweise auch die Untersuchung des Frequenzgehalts der aufgezeichneten Signale ermöglichen. Dabei kann die SEA sicherlich nicht alle Fragen klären. Die Bandbreite der Untersuchungen, von kleinskaligen Laborexperimenten zu großskaligen und Feldexperimenten, erfordert die Anwendung verschiedener ZfP-Verfahren im Hinblick auf Verfahrenskombinationen. Generell können ZfP-Verfahren in zweifacher Weise zu den geplanten Untersuchungen beitragen. Zum einen wird die Wirkungsweise der Heilungsmechanismen in klein- und großskaligen Experimenten beobachtet. Zum anderen kann eine Analyse der Materialeigenschaften der Bauteile mit Selbstheilungscharakter unter Realbedingungen durchgeführt werden. Das ist für die erstgenannten Experimente weniger wichtig, da bei den Laborexperimenten diese Eigenschaften weitgehend bekannt sind. Gemessene Daten sind insbesondere für den Abgleich mit der numerischen Simulation notwendig.

Für die Untersuchung auf unterschiedlichen Skalen lassen sich Verfahren wie die Ultraschalltechnik, Mikrowellen oder RADAR und Eigenschwingungstechniken anwenden. Dabei werden Informationen zum E-Modul, den Wellengeschwindigkeiten, der Permittivität und anderen Materialeigenschaften gewonnen, die für die Simulation benötigt werden. Zudem helfen diese Informationen im Hinblick auf eine effizientere Anwendung der ZfP-Verfahren.

Für eine integrale Untersuchung der Materialeigenschaften eignen sich Ultraschall- und Eigenschwingungsmethoden. Insbesondere eignen sich Ultraschallverfahren in Durchschallung und Reflexion zur Beobachtung der Wellengeschwindigkeit (Kompressions- und Scherwellen), der Amplitude und Frequenz in Abhängigkeit vom Heilungserfolg. Ein wesentlicher Materialparameter, der aus diesen physikalischen Messgrößen abgeleitet werden kann, ist der Elastizitätsmodul.

Verfahren auf Basis von elektromagnetischen Wellen wie die Infrarot-Thermographie, Mikrowellen/RADAR liefern zu elastischen Wellenverfahren wie der Schallemissionsanalyse komplementäre Daten. Die Schallemissionsanalyse (SEA) liefert ein Abbild der Mikrorissentwicklung in raumzeitlichen Darstellungen (4D) während der Belastung beispielsweise in Laborexperimenten. Darüber hinaus können komplexere Inversionsverfahren der SEA wie die Momententensoranalyse auch helfen, Öffnungs- von Scherbrüchen zu unterscheiden (Grosse und Ohtsu 2008). Das wiederum kann zukünftig helfen, die Schallemissionen der Mikrokapselbrüche von denen der Betonmatrix zu unterscheiden. Allerdings ist noch unklar, wieweit sich diese Technik an realbauteilen einsetzen lässt. Wird die Infrarot-Thermographie in aktiver Form als Lockin-Technik angewendet, so kann darüber u.U. die Durchtränkung der Risse mit polymerischen Heilungsmitteln beobachtet werden. Dies kann durch die Anwendung von Mikrowellen- und RADAR-Techniken unterstützt werden, wobei sich damit unterschiedlich dicke Strukturen untersuchen lassen.

Im Hinblick auf eine Dauerüberwachung eignet sich neben der SEA auch die Eigenschwingungs- und Modalanalyse. Modale Parameter sind beispielsweise sensitiv für physikalische Materialparameter wie Feuchte, Temperatur, Dehnung und Mikrorisse. Diese Größen können durch die Anwendung modernster drahtloser Messtechnik (Sensorknoten, Sensornetze) auch kontinuierlich an Realbauteilen beobachtet werden (Grosse et al. 2010). Die drahtlosen Sensorknoten eines Sensornetzes lassen sich dabei jeweils mit verschiedenen Sensoren (Sensorkombinationen) ausrüsten, wobei eine Datenvorverarbeitung in den Sensorknoten oder einem Cluster von Sensorknoten erfolgt.

### Zusammenfassung

Zerstörungsfreie Prüfmethode haben das Potenzial, bei der Analyse des Heilungserfolges von Betonen mit Selbstheilungseigenschaften eingesetzt zu werden. Es ist wichtig, den Heilungserfolg dadurch überprüfen zu können, um dem Anwender dieser Technik Vertrauen in die neuen Baustoffeigenschaften zu geben. Es erscheint notwendig, eine Kombination von unterschiedlichen Messverfahren einzusetzen, zu denen auf Seite von Laborexperimenten auch radiografische CT-Scan-Techniken gehören können. Für mikrobiologische Heilungstechniken ist dieses Verfahren jedoch problematisch und es lässt sich auch nicht an Realbauteilen einsetzen. Weitere Verfahren sind notwendig, die im Projekt HEALCON (gefördert von der Europäischen Kommission) entwickelt und im Artikel beschrieben werden.

### Danksagung

Die Europäische Kommission, DG Research & Innovation, fördert einen Teil der Arbeiten im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes HEALCON unter der Projektnummer 309451. Weiterhin danken die Autoren den Projektpartnern für die enge Zusammenarbeit, sowie den Kolleginnen und Kollegen am Centrum Baustoffe und Materialprüfung der Technischen Universität München für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche.

### Literatur

- Edvardsen C (1996) Wasserdurchlässigkeit und Selbstheilung von Trennrissen in Beton, DAFStb, Heft 455, Berlin.
- Granger S, Loukili A, Pijaudier-Cabot G, Chanvillard G (2007) Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis. *Cement and Concrete Research* 37 (4), S. 519-527.
- Grosse CU, Ohtsu M (Hrsg.): *Acoustic Emission Testing in Engineering - Basics and Applications*. Springer publ., Heidelberg (2008), ISBN: 978-3-540-69895-1, 404 S.
- Grosse CU, Glaser SD, Krüger M: Initial development of wireless acoustic emission sensor nodes for civil infrastructure state monitoring. *J. of Smart Structures & Systems* 6 (2010), Nr. 3, S. 197-209.
- In C-W, Holland RB, Kim J-K, Kurtis KE, Kahn LF, Jacobs LJ (2013) Monitoring and evaluation of self-healing in concrete using diffuse ultrasound. *NDT&E Int.* 57, S 36-44.
- Jooß M (1999) Selbstheilung von Beton unter Temperatureinfluss. In: Christian Große (Hrsg.): *Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen – Festschrift zum 60. Geburtstag von H.-W. Reinhardt*, Libri Books on Demand, S. 149-160.
- Jonkers HM (2011) Bacteria-based self-healing concrete. *Heron* 56 (1/2), S. 1-12.
- Van Tittelboom K & De Belie N (2010) Self-healing concrete: suitability of different healing agents. *International Journal of 3R's* 1 (1), S. 12-21.

Van Tittelboom K, De Belie N, Van Loo D, Jacobs P (2011) Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. *Cement and Concrete Composites* 33 (4), S. 497-505.

Van Tittelboom K, De Belie N, Lehmann F, Grosse CU (2012) Acoustic emission analysis for the quantification of autonomous crack healing in concrete. *Construction and Building Materials* 28 (1), S. 333-341.

Yang Y, Lepech MD, Yang E-H, Li VC (2009) Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cement and Concr.Res.* 39 (5), S. 382-390.

# 11. Impressum

## Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen  
Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Geophys. Christian Große  
Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz

## **cbm - Centrum Baustoffe und Materialprüfung**

Baumbachstraße 7  
81245 München  
Tel +49.89.289.27061  
Fax +49.89.289.27064  
information@cbm.bgu.tum.de  
www.cbm.bgu.tum.de

## Layout



Pf.-Eitlinger-Ring 5  
85464 Finsing  
Tel +49.8121.988996  
www.designfürkommunikation.de

## Verantwortlich

Britta Uhl



