Jahresmitteilung 2016

Centrum Baustoffe und Materialprüfung
Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt
Technische Universität München

Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen
Gesteinshüttenkunde
Zerstörungsfreie Prüfung
MPA BAU, Abt. Baustoffe

Jahresmitteilung 2016

Centrum Baustoffe und Materialprüfung
Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt
Technische Universität München

Inhalt

1. Vorwort **4**

2. Personelle Veränderungen **6**

3. Organigramm **8**

4. Aus dem Lehrbetrieb **10**
4.1. Workshop Baustofferzeugende Industrien 10
4.2. Exkursionen „Zerstörungsfreie Prüfung“ 17
4.3. Diplom- und Masterarbeiten 18

5. Veranstaltungen **32**
5.1. 2016 AAAS Annual Meeting 32
5.2. BETON – Neue Konzepte 32
5.3. Betriebsexkursion am 27.09.2016 34
5.4. TORQUE Konferenz München 36
5.5. Tag des Lehrstuhls für Zerstörungsfreie Prüfung 36

6. Ehrungen **38**
6.1. Ausgezeichnetes Projekt der Werkstoffforschung 38
6.2. Outstanding Paper Award 38

7. Berichte aus den Arbeitsgruppen **39**
7.1. Arbeitsgruppenschwerpunkte 39
7.2. Abgeschlossene Forschungsvorhaben 48
7.3. Laufende Forschungsvorhaben 59
7.4. Neue Forschungsvorhaben 61
7.5. Ausgewählte Materialprüfung 70
7.6. Sonstiges 71

8. Mitarbeit in Ausschüssen, Arbeitskreisen, Gremien und Fachkommissionen **74**

9. Dissertationen **79**
9.1. Laufende Dissertationen 79
9.2. Dissertation Fact Sheets 82
9.3. Beendete Dissertationen 88

10. Liste aller Veröffentlichungen 2015 **92**

11. Ausgewählte Veröffentlichungen **101**
11.1. Ingress of NaCl in Concrete with Alkali Reactive Aggregate – Effect on Silicon Solubility 101
11.2. Investigating the role of moisture on concrete carbonation using single-sided ^{1}H-NMR 115
11.3. Beton in Kontakt mit Abwasser: Ausgewählte laboranalytische Methoden 122
11.4. Neue Regeln braucht das Land 128
11.5. Das Bauwerk stellt die Anforderungen 138
11.6. Nichts hält ewig 144
11.7. Mikrofon-Array-Technik für scannendes Impakt-Echo-System – Ein neuer messtechnischer Ansatz zur schnellen automatisierten Inspektion von Betonbauteilen 149

12. Impressum **157**

1. Vorwort

Liebe Freunde und Partner des cbm!

Das abgelaufene Berichtsjahr 2016 haben global gesehen die Schlagworte „Trump“ und „BrEXIT“ geprägt.

Woran denken wir noch, wenn wir das Jahr resümieren? Wie stellt es sich aus Sicht des Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TUM dar?

Nun, ganz im Gegenteil zur geopolitischen Lage, die auf Protektionismus und Abschottung zu setzen scheint, haben wir unsere internationale Vernetzung und Sichtbarkeit weiter erhöht. So intensiv, wie noch nie zuvor, ist der internationale Austausch vorangekommen. Mehrere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind zu ausgedehnten Forschungsaufenthalten aufgebrochen: Dr. Sylvia Keßler hat sich im Rahmen eines DFG-Forschungsstipendiums in Tampa, Florida, an der University of South Florida bei Prof. Sagues aufgehalten, die Professoren Große und Heinz waren im Rahmen ihrer Forschungsfreisemester u. a. in Neuseeland und Japan unterwegs und Dr. Dirk Lowke brachte ein knappes halbes Jahr an der UC Berkeley in Kalifornien zu (Prof. Ostertag, Prof. Rael). Alle haben interessante Eindrücke gesammelt und z. T. schon recht vielversprechende Kooperationen initiiert.

Im Gegenzug waren wir auch offen für internationale Besucher. So haben wir einige Gastwissenschaftlerinnen in unseren Reihen aufgenommen, u. a. Marylinda Santos de França und Dr. Jussara Limeira di Araújo aus Brasilien, Frau Monika Stankeviciute, M. Sc. aus Litauen sowie Ir. Hilke Verbruggen und Ir. Sokratis N. Iliopoulos aus Belgien. Anfang 2016 hat Prof. Neil Hoult von der Queens University in Kanada einen Teil seines Sabbaticals als TUM Alfred-Wilhelm-Scheer Visiting Professor am cbm verbracht. Außerdem besuchten viele internationale Delegationen unser Haus und interessierten sich für unsere Arbeiten z. B. Forscher der Shenzhen University (China) oder der North Caucasus Federal University (Russland).

Projekte wurden erfolgreich abgeschlossen, neue, darunter auch wieder größere Verbundprojekte, wurden über bestehende Forschungskooperationen angestoßen und akquiriert. U. a. wurde mit der ETH Zürich ein DFG-Verbundprojekt zum Thema „Diffusionspotentiale“ erfolgreich eingeworben und mit den Universitäten Bordeaux (im Rahmen eines europäischen Verbundvorhabens) bzw. La Rochelle (im Rahmen einer Industriekooperation) wurden Dissertationsprojekte zum Thema Feuchtemessung/Carbonatisierung vereinbart, die zu einem Double Degree der Absolventen führen sollen. Mit nationalen Partnern (verschiedenen TU9-Partnern und BAM) wurde ein großes BMBF-Verbundprojekt zum Thema Beton- und Betonstahlermüdung (WinConFat) akquiriert. Auch im Thema „Additive Manufacturing“, dem 3D-Druck von Beton, sind mehrere neue Verbundvorhaben bereits initiiert und z. T. schon bewilligt worden. Uns ist wichtig, dass wir in unserem Projektportfolio an den gleichbetonten Pfeilern „Grundlagenforschung“ und „angewandte Forschung“ festhalten, denn nur durch die Kopplung beider Felder vermeiden wir die Forschung im sprichwörtlichen „Elfenbeinturm“. Denn viele marktreife Entwicklungen haben ihren Ursprung in der Grundlagenforschung.

Die erfreuliche Projektentwicklung hat natürlich auch zu weiterem Wachstum der Belegschaft geführt, die erstmalig seit Bestehen des cbm mit +100 eine Schallmauer durchbrochen hat. Ein Rekord! In diesem Zusammenhang sei bemerkt, dass wir für 2016 alle unsere Auszubildenden

nach Abschluss ihrer erfolgreich absolvierten Ausbildung zu Baustoffprüferinnen übernommen haben.

Apropos Ausbildung: Auch die Zahl der Studierenden ist noch einmal gestiegen. Momentan lernen an der TU München über 40.000 junge, wissbegierige Menschen. Absoluter Rekord!! Von diesen 40.000 Studierenden sind inzwischen mehr als 4000 Studierende allein an der Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt (BGU) eingeschrieben! Da sich unsere Lehrangebote jedoch längst nicht mehr nur auf klassische Studiengänge dieser Fakultät beschränken, spüren wir natürlich auch den Zuwachs in den anderen Fakultäten. Mit unseren Lehrangeboten bedienen wir momentan neun, z. T. sehr stark nachgefragte Studiengänge, auch über die Fakultätsgrenzen hinweg. Unsere Exporte gehen u. a. in die Fakultäten WI (Wirtschaftswissenschaften), MW (Maschinenwesen) und AR (Architektur), auch in die Munich School of Engineering (MSE) und in die Lehrerausbildung (TUM School of Education).

Neben der Lehre haben wir uns weiteren Herausforderungen in der Forschung gestellt. Die Sichtbarkeit unserer Arbeit wurde 2016 durch eine enorme Publikationsleistung in hochgerankten internationalen Fachzeitschriften, durch den Ruf an Herrn Dr. Dirk Lowke an die Technische Universität Braunschweig (Nachfolge Prof. Budelmann auf den Lehrstuhl Baustoffe und Stahlbetonbau am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz) und durch den Gewinn des wohl renommiertesten Baustoffpreises, den mit 10.000 EUR dotierten CEMEX-Förderpreis, an Frau Dr. Stefanie von Greve-Dierfeld (jetzt TFB AG in Wildegg, Schweiz) deutlich. An dieser Stelle sei allen, insbesondere den beiden namentlich erwähnten, herzlich gratuliert.

So blicken wir wieder auf ein äußerst ereignisreiches und auch ertragreiches Jahr zurück, wohl wissend, dass ohne die Förderung unserer Freunde und Partner der Weg zu guter Lehre, Forschung und Materialprüfung sicherlich viel schwieriger wäre!

Ein ganz herzliches Dankeschön für Ihre immerwährende Unterstützung!!

Ihre

Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Große

Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz

Dr.-Ing. Thomas Wörner

2. Personelle Veränderungen

Wissenschaftliche Mitarbeiter, die ihre Forschung im cbm aufgenommen haben

Herr Matthias Wagner, M.Sc.	(15.01.2016)
Frau Elke Ziehensack, M.Sc.	(01.04.2016)
Herr Nicolai Klein, M.Sc.	(15.05.2016)
Herr Marco Decker, M.Sc.	(01.10.2016)
Frau Dr. Jussara Limeira de Araùjo	(01.11.2016)

Nicht wissenschaftliche Mitarbeiter/-innen, die uns nun unterstützen

Frau Bettina Enskat	(01.03.2016)
Frau Francesca Girotti	(15.04.2016)
Herr Armin Havic	(15.05.2016)
Frau Catrin Weiß	(15.09.2016)
Herr Armin Skowronek	(20.10.2016)

Übernahme von Auszubildenden

Frau Laura Böltl	(28.06.2016)
Frau Tatjana Frey	(28.06.2016)
Frau Alexandra Lindel	(28.06.2016)

Bilder (K.-H. Kreft): Aufgrund der Vorgaben zur KUNST IM ÖFFENTLICHEN RAUM wurde beim Bau des cbm in den 70er-Jahren das Kunstwerk „2 Walzen“ des Bildhauers Alf Lechner installiert. Die beweglichen Stahlwalzen die auf einer langen Betonbahn „rollen“, drohten zuzuwachsen und wurden 2016 gemäß der Vorgaben des Künstlers mit einem „minimalistisch und puristisch gestalteten Umgebungsbereich“ freigelegt.

Neue Auszubildende

Frau Nabintou Drame	(01.09.2016)
Frau Caroline Herzinger	(01.09.2016)
Herr Julian Schittko	(01.09.2016)
Frau Bettina Sturm	(01.09.2016)

in den Ruhestand verabschiedet haben wir

Herrn Leopold Dexheimer	(31.12.2016)

25-jähriges Dienstjubiläum feierte

Herr Erhard Westiner

aus dem cbm ausgeschieden sind

Herr Michael Blendowsky	(31.03.2016)
Frau Bianca Freibuchner	(30.04.2016)
Herr Jens Skarabis	(17.05.2016)
Frau Sandy Illguth	(30.06.2016)

3. Organigramm

Institutsleitung

Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen
Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Assistenz Institutsleitung: Fr. Girotti

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. Urbonas, Dr.-Ing.
Hr. Beddoe, B.Sc. Ph.D.
Hr. Fischer, M.Sc.
Fr. Heisig, Dr.-Ing.
Fr. Irbe, M.Sc.
Hr. Wagner, M.Sc.

Mörtellabor
Hr. Kriegel
Hr. Frey
Hr. Gottmann

Physiklabor
Fr. Hartlieb-Pfüller

AG 2 Betontechnologie

Hr. Lowke, Dr.-Ing.
Hr. Klein, M.Sc.
Hr. Kränkel, Dipl.-Ing.
Fr. Limeira de Araujo, Dr.
Fr. Spengler, Dr.-Ing.
Fr. Thiel, Dipl.-Ing.
Hr. Weger, M.Sc.

Assistenz:
Fr. Berceanu-Gefrörer

Betonlabor
Hr. Linz
Hr. Hobusch
Hr. Höhn
Hr. Omozokpia

AG 3 Stahl und Korrosion

Hr. Meyer, Dipl.-Ing.
Fr. Keßler, Dr.-Ing.
Hr. Elner, B.Sc
Hr. Giebitz, Dipl.-Ing.
Hr. Havic, Ing.
Hr. Hiemer, M.Sc.
Hr. Huber, Dipl.-Ing.
Hr. Müller, Dipl.-Ing.
Hr. Osterminski, Dr.-Ing.
Hr. Schmid, Dipl.-Ing.
Fr. Ziehensack, M.Sc.

Assistenz/Techn. Sachbearbeitung:
Fr. Enskat
Fr. Kohler
Fr. Röttinger
Fr. Weis

Stahllabor
Hr. Biehler
Hr. Azie
Hr. Grgic
Hr. Hörber
Hr. Mehnert
Hr. Rughöft

Korrosionslabor
Fr. Lillich

Ausbilderin	Fr. Fritz		
Auszubildende Baustoffprüfer	Fr. Böltl	Fr. Frey	Fr. Lindel
Auszubildende Chemielaboranten	Fr. Koch		

Centrum Baustoffe und Materialprüfung
Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt
Technische Universität München

Fachgebiet Gesteinshüttenkunde

Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz
Assistenz Institutsleitung: Fr. Weiß; Fr. Deuerling

Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Geophys. Christian Große
Assistenz Institutsleitung: Fr. Hafenmayer

EDV
Hr. Laureana

Bibliothek
Fr. Kassel

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

Projektgruppe Bewehrung Hr. Dr.-Ing. Osterminski

AG 4 Chemie

Hr. Hilbig, Dr. rer. nat.
Hr. Decker, M.Sc.

Chemielabor
Hr. Gmell
Hr. Halegua
Fr. Herzinger,
Auszubildende
Hr. Koll

AG 5 Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine

Hr. Wörner, Dr.-Ing.

Sekretariat:
Fr. Finke
Fr. Knaup-Windisch

FG Asphalt (50)
Hr. Wörner, Dr.-Ing.
Hr. Patzak, Dipl.-Ing.

Asphaltlabor
Hr. Barabunov
Hr. Kandler
Hr. Mittermayr
Hr. Strzelczyk

FG Bitumen und Abdichtungen (51)
Hr. Wallner, Dr.-Ing.
Fr. Franke, Dipl.-Chem. Ing.

Bitumen- und Abdichtungslabor
Hr. v. Neuhoff v. d. Ley
Fr. Böltl
Hr. Bollmann
Hr. Tröndle
Hr. Ullmann

FG Gesteine (52)
Hr. Westiner, Dr. rer. nat.
Hr. Graw, Dipl.-Ing.
Fr. Neidinger, Dr. rer. nat.

Gesteinslabor
Hr. Kreft
Hr. Dexheimer
Hr. Fischer
Hr. Gabor
Hr. Grieser
Hr. Mohammed Nur
Hr. Teodorowicz
Hr. Zeuner
Hr. Zöge

Sandlabor
Hr. Reier
Fr. Fritz
Hr. Janeselli

Mechanische Werkstatt
Hr. Strehle

Zertifizierungsstelle
Hr. Skowronek

AG 6 Zerstörungsfreie Prüfung

Hr. Groschup, Dipl.-Geophys.
Fr. Pinkert, Dr. rer. nat.
Hr. Botz, M.Sc
Hr. Jatzlau, Dipl.-Ing.
Hr. Malm, M.Sc.
Hr. Raith, M.Sc.

ZfP Labor
Fr. Gemander, M.Sc.
Fr. Nahm

Elektronische Werkstatt
Hr. Münchmeyer

Stand: November 2016

4. Aus dem Lehrbetrieb

4.1 Workshop Baustofferzeugende Industrien

Auch im Jahr 2016 konnte den Studierenden im Workshop Baustofferzeugende Industrien ein Einblick in die Produktionsstätten der Baustoffe und Maschinen gegeben werden, mit denen sie bei der Ausführung ihres Berufes als Bauingenieur täglich in Kontakt kommen. Der Workshop wird jährlich im Sommersemester vom Lehrstuhl Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen für Masterstudenten des Bauingenieurwesens angeboten. So brach eine Gruppe von 26 wissbegierigen Studierenden unter Betreuung von Daniel Weger, M.Sc. (s. Foto unten) zu folgenden Zielen auf:

Tag 1: Dienstag 17.05.2016
Maschinenproduktion der BAUER Gruppe in Schrobenhausen
Merk Timber GmbH in Aichach

Tag 2: Mittwoch 18.05.2016
Kalksteinproduktion der Kalksandsteinwerke Südbayern in Friedberg-Derching
Ziegelproduktion der Hörl & Hartmann Ziegeltechnik in Dachau

Tag 3: Donnerstag 19.05.2016
Fertigungsanlage und Forschungszentrum der BASF Construction Solutions GmbH in Trostberg
Zementproduktion der Südbayerischen Portland-Zementwerke in Rohrdorf

Tag 4: Freitag 20.05.2016
Fertigteilwerk Max Bögl in Sengenthal

An dieser Stelle gilt es, allen Unternehmen nochmals Dank für die tolle Organisation, die sehr interessanten und lehrreichen Führungen und natürlich auch für die sehr gute Verpflegung zu sagen, die wir bei allen unseren Stationen genießen durften.

Die Studierenden bekamen die Aufgabe in Gruppen Berichte über die einzelnen Stationen des Workshops anzufertigen. Als Vertreter der allesamt sehr schön gestalteten Berichte ist ein Bericht über den Besuch der Ziegelproduktion der Hörl & Hartmann Ziegeltechnik in Dachau angefügt.

Exkursionsbericht Ziegelproduktion Hörl und Hartmann

Christian Bauer, Sebastian Riedelsheimer, Ferdinand Schülen

Einleitung

Im Zuge des Wahlfachs „Workshop Baustofferzeugende Industrien“ der Vertiefungsrichtung Werkstoffe im Studiengang Master Bauingenieurwesen besuchten wir am 18.05.2016 das Ziegelwerk der Firma Hörl & Hartmann Ziegeltechnik GmbH in Dachau bei München. Im vorliegenden Bericht wird zuerst kurz auf die Firma Hörl & Hartmann Ziegeltechnik GmbH eingegangen, bevor die bei der Führung besichtigten einzelnen Stationen der Ziegelproduktion erläutert werden.

Die Firma Hörl & Hartmann Ziegeltechnik GmbH

Zu Beginn der Führung erzählt uns Hr. Dipl.-Ing. Dillinger, der in der Firma für die technische Kundenberatung zuständig ist, etwas über die Firmengeschichte der Hörl & Hartmann Ziegeltechnik GmbH. Sie geht bis in das Jahr 1896 zurück, als die Familie Hartmann ein Ziegelwerk in Dachau erwarb. Im Jahre 1988 wurde das Ziegelwerk Reischl in Dachau-Pellheim gekauft, das heute Hauptwerk und Firmensitz ist. Ein Zweitwerk befindet sich in Gersthofen bei Augsburg. Die Firma ist Mitglied im Ziegel-Markenverband UNIPOR, der derzeit deutschlandweit mit 14 Ziegelwerken vertreten ist. Im Dachauer Werk werden rund 300 verschiedene Ziegelsorten hergestellt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich des Lochmusters, der Rohdichte, der Maße, der Wärmeleitzahl, der Druckfestigkeit etc. Zur Produktpalette gehören sowohl Block- als auch Planziegel. Besondere Ziegel sind z. B. der Schalungsziegel (USZ-Ziegel), der mit Beton verfüllt wird, Einhängeziegel für Ziegeldecken, gedämmte Ziegel und viele mehr. Das Hauptliefergebiet der Firma erstreckt sich vom Allgäu bis ins Chiemgau, im Norden etwa bis zur Donau.

Ziegelproduktion

Rohstoffgewinnung, -lagerung und -aufbereitung

Unseren Rundgang durch das Firmengelände beginnen wir im Bereich der Rohstofflagerung. Zur Herstellung der Ziegelbaustoffe werden die Rohstoffhauptkomponenten Ton und

Bild 1: Rohstofflager

Lehm (Lösslehm) eingesetzt. Sie werden im tertiären Hügelland nahe des Ziegelwerks in einer Tiefe von bis zu 40 – 50 Meter unter der Geländeoberfläche abgebaut. Durch die Nähe der natürlichen Lagerstätten ergeben sich kurze Lieferwege. Beim Abbau erfolgt eine erste Trennung von nicht oder nur bedingt verziegelbarer Rohstoffe (organische Beimengungen, grobes Gestein) und qualitativ hochwertiger, unbeschränkt verziegelbarer Rohstoffe. Auf dem Firmengelände werden die gewonnenen Materialien zu großen Mischhalden aufgeschüttet und dort für drei bis sechs Monate gelagert. Ziel der Lagerung ist zum einen eine erste Aufbereitung der Rohstoffe, d. h. sie aufzuschließen, zu durchmischen und zu homogenisieren. Dadurch soll eine gleichmäßige und hohe Qualität der Ausgangsstoffe erreicht werden. Zum anderen dient die Lagerung zur Mengenbevorratung für die kontinuierliche Produktion in Zeiten ungünstiger Witterung, in denen keine Rohstoffgewinnung möglich ist (Regenperioden, Winter).

Wir werden nun von Herrn Dillinger zu den einzelnen Aufbereitungsanlagen geführt. Nach abgelaufener Liegezeit in der Mischhalde werden die Rohstoffe einem der insgesamt fünf Kastenbeschicker zugeführt, von denen der größte ein Fassungsvolumen von 160 m³ besitzt. Die Beschicker ermöglichen eine gezielte Mischung der Rohstoffe und führen dann das Material gleichmäßig dosiert einer Rollbandanlage zu. Über die Bandanlage gelangt das Rohmaterial in die Aufbereitungsanlage, wo es zerkleinert und homogenisiert wird. Zuerst erfolgt eine Zerkleinerung der groben Bestandteile im sogenannten Kollergang, bei dem zwei rotierende Scheiben das Material brechen und unter Wasserzugabe eine plastische Masse hervorbringen. Im nachgeschalteten Vor- und Feinwalzwerk wird das Material bis auf eine Korngröße von 0,8 mm zermahlen und homogenisiert.

Bild 2: Rohstofftransport auf Bandanlagen

Bild 3 (re.): Kollergang zur Zerkleinerung der Rohstoffe

Bild 4: Sumpfhausanlage

Nach erfolgter Zerkleinerung wird das Rohmaterial in der Sumpfhausanlage nochmals für eine Woche in Mischbetten (Quersümpfen) gelagert, um es zu durchmischen und gleichmäßig zu durchfeuchten. Ziel dieses sogenannten „Maukens“ ist es, die Plastizität des Materials zu verbessern. Die Sumpfhausanlage hat ein Lagervolumen von rund 5300 m³ und ist eine der modernsten in Europa.

Im Anschluss an die Lagerung im Sumpfhaus werden dem Rohmaterial über Kastenbeschicker und Förderbänder Zuschlagstoffe zugegeben. Sie sollen im Produktionsablauf dem späteren Ziegel bestimmte Eigenschaften verleihen. Holzsägemehl wird zugegeben, um dem Ziegel eine erhöhte Porosität zu geben. Das Sägemehl verbrennt beim Ziegelbrand und hinterlässt so Luftporen. Derartige Ziegel werden besonders bei wärmedämmenden Außenwänden eingesetzt. Für Ziegel mit erhöhtem Schallschutzmaß werden Granit oder Zunder beigemengt. Bei zu hoher Plastizität kann außerdem Sand als Magerungsmittel eingearbeitet werden. Die Zusatzstoffe werden durch den Doppelwellenmischer mit dem Rohmaterial unter Zugabe von Wasser zu einer plastischen Masse vermengt.

Anschließend wird das Rohmaterial über einen die Menge konstant dosierenden Dosierkastenbeschicker dem Siebrundbeschicker zugeführt. Hier werden durch Heißdampfeinpressung und Pressen des Materials durch eine Sieblochung ein vollständiger Aufschluss sowie eine Homogenisierung aller Kleinstpartikel erreicht. Die Rohmasse ist nun bereit für die Formgebung der Ziegel.

Formgebung und Trocknung der Ziegel

Im Anschluss an die Besichtigung der Rohstoffaufbereitung wird uns der Produktionsprozess der Ziegelformgebung gezeigt. Die Formgebung erfolgt mittels einer Vakuum-Schneckenpresse. Hier wird der Masse durch ein Vakuum die restliche Luft entzogen. Die Pressenschnecke verdichtet das Material und presst es mit einem Druck von 12 bar durch das formgebende Mundstück. Je nach herzustellender Ziegelart kann das Mundstück gewechselt werden. Aus dem so gepressten Strang werden mittels eines Abschneiders die Rohlinge millimetergenau abgetrennt. Bei den Abmessungen des Mundstücks sowie beim Schneiden wird bereits berücksichtigt, dass sich Volumen und Maße des Ziegels im weiteren Herstellungsprozess durch Abgabe von Wasser verringern. Die Abmessungen bei der Formgebung sind dementsprechend geringfügig höher als die des Endprodukts. Entsprechend der hohen Maß-Anforderungen sind die Mundstücke recht teuer: Ein Stück kostet rund 10.000 €.

Bild 5: Verschiedene Mundstücke für die Strangpresse

Bild 6: Strangpressen des Ziegelrohstoffs

Bild 7 (re.): Abschneider

Bild 8: Lagerung der Rohziegel auf Trocknerwägen

Die hergestellten Rohlinge werden nun automatisch auf Trocknerwägen verladen und zu den insgesamt 11 Doppelkammertrocknern gebracht. In diesen wird den Rohlingen das Anmachwasser entzogen. Die Anlage bietet den Vorteil, dass sowohl Verweildauer als auch Temperatur produktspezifisch regelbar sind. Die Ziegel bleiben bei bis zu 110 °C zwischen 24 und 72 Stunden in der Trockenkammer. Dabei ist zu beachten, dass die Trocknung dosiert und langsam erfolgt, um Abplatzungen und Rissbildung zu verhindern. Während des Trocknungsvorgangs schwinden die Ziegel zwischen 3 und 4 %.

Die Doppelkammern werden durch die Restwärme des Tunnelofens beheizt.

Brennen der Ziegel

Die getrockneten Ziegel werden auf Tunnelofenwägen (TOW) verladen. Es wird immer eine ausreichende Menge an beladenen TOWs vorgehalten, um eine durchgehende Belieferung des Tunnelofens zu gewährleisten. Der Ofen läuft rund um die Uhr und wird lediglich im Januar und Februar für ca. 6 Wochen zu Wartungszwecken abgeschaltet.

Unsere Führung wird nun richtig heiß: Wir setzen den Rundgang über dem Tunnelofen fort, den wir nun gezeigt bekommen und in den wir durch eine Luke sogar einen Blick hineinwerfen dürfen.

Der 126 m lange Tunnelofen ist mit feuerfesten Schamottesteinen ausgekleidet und als Durchlaufofen konzipiert. Er untergliedert sich in Vorfeuerbereich, Hauptfeuerbereich und Kühlzone. Der Vorfeuerbereich wird mit Gas befeuert und erreicht eine Temperatur bis 800 °C. Im Hauptfeuerbereich erhöhen Schwerölbrenner die Temperatur auf 800 – 973 °C. Die Gesamtbrenndauer eines Ziegels beträgt in Abhängigkeit der Rohdichte zwischen 22 und 48 Stunden.

Bild 9: Tunnelofenausgang mit fertig gebrannten Ziegeln, darüber die Schwelgasentsorgungsanlage

Beim Ziegelbrand entstehen aus der Verbrennung der Porosierungsstoffe Gase. Diese werden im Vorfeuerbereich abgeführt, durch einen Wärmetauscher auf 400 °C aufgeheizt und in einer thermischen Nachverbrennungsanlage nochmals bei ca. 750 °C verbrannt. Die erhitzten Reingase werden dann dem Ofen zugeführt und tragen hier wieder zu seiner Erhitzung bei. Mit den neu aus der Verbrennung der Porosierungsstoffe entstehenden Schwelgasen werden sie vermengt und wiederum der Nachverbrennungsanlage zugeführt, sodass ein Kreislauf entsteht. Diese Schwelgasentsorgungsanlage ermöglicht es, Emissionsauflagen der TA-Luft deutlich zu unterschreiten.

Nachbearbeitung und Füllung der Ziegel

Zum Schluss der Werksbesichtigung werden wir noch in die Bereiche der Nachbearbeitung, Verpackung und Lagerung der Ziegel geführt. Im Anschluss an den Brennvorgang werden die gebrannten Ziegel lagenweise von den Ofenwägen auf Holzpaletten verladen und von der Entladeanlage über Bandanlagen zur Schleifanlage transportiert. Hier werden die Ziegel von zwei Nachschleifaggregaten millimetergenau auf ihr Soll-Maß geschliffen und erhalten eine plane Oberfläche.

Ziegelprodukte, die für bestimmte Verwendungszwecke mit Dämmmaterial verfüllt werden, werden einer eigenen Verfüllanlage zugeführt. Hier werden verschiedene Dämmstoffe, z. B. Mineralwolle oder Nadelholzfasern, in die Hohlräume der Ziegel eingeblasen. Dadurch erlangen die Ziegel unter anderem bessere Wärmedämm- und Schallschutzeigenschaften. Nach dem Einblasen wird die überstehende Füllung mit einem Grader abgezogen.

Bild 10: Verfüllung der Ziegel mit Dämmstoff (1)

Bild 11 (re.): Verfüllung der Ziegel mit Dämmstoff (2)

Verpackung, Lagerung und Versand

Nach ihrer Fertigstellung werden die Ziegel auf Paletten gestellt und in einer Verpackungsanlage in Folie eingeschweißt. Die Folie gewährt Schutz vor Beschädigung und Witterungseinflüssen und wird von Hörl & Hartmann von den Kunden zurückgenommen und wiederverwertet. Die fertig verpackten Pakete werden auf Speicherbahnen abgesetzt, von wo aus sie entweder direkt auf LKWs verladen werden oder auf den hauseigenen Lagerplätzen gestapelt werden.

Vorführung des Mauerns im Werk

Während der Führung bekamen wir eine kurze Produktvorstellung mit einer Vorführung im Mauern. Gezeigt wurden uns ein Standardziegel und ein mit Dämmung gefüllter Außenwandziegel. Herr Schmid führte uns einerseits das konventionelle Mauern mit einem Dünnbettmörtel vor, den er mithilfe eines Mörtelschlittens auf die einzelnen Mauersteinreihen auftrug. Als Alternative dazu verwendete er Mörtelpads mit Schmelzkleber der Firma Maxit. Vor dem Auflegen der Pads müssen die Ziegel gewässert werden. Anschließend werden auch die Pads gewässert und auf die Steinreihe aufgelegt. Nach einer Verweildauer von 1-7 Minuten wird die nächste Steinreihe auf die feuchten Pads aufgelegt und angehämmert, um einen Verbund zwischen den Ziegeln und dem Mörtelpad herzustellen. Der Vorteil des Verfahrens mit dem Mörtelpad liegt darin, dass man im Vergleich zum konventionellen Mauern mit Dünnbettmörtel eine höhere Sauberkeit auf der Baustelle hat. Die Pads sind jedoch teurer als der konventionelle Mörtel: Es entstehen Mehrkosten von ca. 7 €/m². Zeitlich ergibt sich auch kein entscheidender Vorteil, da die Verweildauer beim Auflegen der Pads den Zeitvorsprung zum Mörtelanrühren und -auftrag wieder kompensiert.

Abbildung 12: Dünnbettmörtelauftrag

Abbildung 13 (re.): Vornässen von Mörtelpads

Dank

Wir bedanken uns bei Herrn Dillinger, Herrn Schmid und der gesamten Hörl & Hartmann Ziegeltechnik GmbH für die sehr interessante und kurzweilige Führung sowie die ausgiebige Brotzeit.

Literatur

Hörl & Hartmann Firmenprospekt (2016): Hörl & Hartmann Ziegelproduktion

4.2. Exkursionen „Zerstörungsfreie Prüfung“

4.2.1. Exkursion WCNDT 16.06.2016

Betreuung: Dipl.-Ing. Phillipp Jatzlau

Abbildung: Prof. Große und Exkursionsteilnehmer bei der WCNDT

Vom 13.-17. Juni 2016 fand am Internationalen Congress Center München die 19. World Conference of Non-destructive Testing (WCNDT) statt. Mit 2500 Teilnehmern und 1400 weiteren Ausstellungsbesuchern ist diese alle vier Jahre stattfindende Konferenz die weltweit größte Veranstaltung zum Thema zerstörungsfreie Prüfung. In diesem Rahmen hatten etwa 20 Studierende der TUM die Chance, für einen Tag in die Welt der ZfP einzutauchen. In Begleitung von Prof. Große und einigen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Zerstörungsfreie Prüfung erhielten die Studierenden Einblick sowohl in die Arbeit einiger Weltmarktführer im Bereich der Herstellung von Prüfsystemen und –anlagen, als auch in Prüforganisationen und Forschungsinstitute. Mit großer Begeisterung referierten die Mitarbeiter der Unternehmen an ihren Messeständen über Funktionsweise, Anwendungen und Ziele ihrer Produkte und Dienstleistungen, um den Studierenden die ZfP näher zu bringen. Zum Ausklang des gelungenen Tages durfte natürlich der Besuch des reichhaltigen Buffets nicht fehlen. Die Einzigartigkeit dieser Veranstaltung dürfte sich darin zeigen, dass die nächste WCNDT 2020 in Korea stattfindet, wohin es vermutlich die wenigsten Studierenden schaffen werden.

4.2.2. Exkursion zur Abteilung „Werkstofftechnik – Zerstörungsfreie Prüfung“ der BMW Group in München (Petuelring)

Der Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung veranstaltete zusammen mit der Abteilung „Werkstofftechnik – Zerstörungsfreie Prüfung“ (TP31) der BMW Group am 08. April 2016 eine Exkursion für Studenten und Doktoranden der Fakultäten Bau Geo Umwelt, Maschinenwesen und der Munich School of Engineering. Der Ausflug in den täglichen Prüfbetrieb des Automobilherstellers bot dabei vielzählige Einblicke in Prüfmethoden und Messtechnik nach neuestem Stand der Technik. An mehreren Stationen konnten sich die Teilnehmer über die zerstörungsfreie Prüfung mittels Computertomografie, Ultraschall-Echo-Verfahren, Wirbelstrom und Infrarot-Thermografie informieren. Zusammen mit den Organisatoren und Mitwirkenden ließ man die Veranstaltung bei einem gemeinsamen Mittagessen in der Kantine der BMW Group ausklingen. Über diese Exkursion wurde zudem in der BMW-Werkszeitung berichtet.

4.3. Diplom- und Masterarbeiten

AG Bindemittel und Zusatzstoffe

4.3.1. Expansionspannung beim Sulfatangriff auf Beton – Einfluss von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen

Masterarbeit von Robert Eibel
Betreuung: Robin Beddoe, B. Sc., Ph. D.

Beim äußeren Sulfatangriff auf Betonbauteile dringen Sulfationen aus Wässern und Böden in den Beton ein. Die chemischen Reaktionen zwischen den Sulfationen und dem erhärteten Bindemittel des Betons führen zur Expansion, Rissbildung und schließlich zur Zerstörung des Betongefüges. Dabei wird vor allem die Bildung der aluminiumhaltigen Phase Ettringit als Auslöser der Schäden beim Sulfatangriff gesehen.

Der Trend zu vermehrtem Einsatz von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen, wie Hüttensand oder Steinkohlenflugasche, ist mit Hinblick auf CO_2-Emissionen sinnvoll, erhöht aber die Menge des Aluminiums im Bindemittel und damit die Gefahr einer Schädigung. Im Rahmen der Masterarbeit soll untersucht werden, wie der Ersatz von Portlandzement durch Hüttensand bzw. Metakaolin die Entwicklung der Expansionsspannung beim Sulfatangriff beeinflusst.

Es wurden dünnwandige (2,5 mm) Feinmörtel-Hohlzylinder aus Quarzsand (Größtkorn 0,5 mm) und Portlandzement (CEM I 42,5R), der in verschiedenen Anteilen durch Hüttensand (36, 65, 80 M.-%) bzw. Metakaolin (5 M.-%) ersetzt wurde, hergestellt. Um homogene Probekörper, d. h. frei von Fehlstellen, herstellen zu können, wurde ein passendes Schalungssystem entwickelt und der Vorgang des Ausschalens durch die Herstellung eigens angefertigter Werkzeuge optimiert. Dadurch wurde das Ausschalen der Hohlzylinder vereinfacht, so dass keine Beschädigungen an diesen mehr auftraten. Nach dem Ausschalen wurden die Hohlzylinder luftdicht in einer gesättigten $Ca(OH)_2$ - Lösung vorgelagert. Anschließend wurden die Probekörper in einem Alter von 28 Tagen mithilfe einer Präzisions-

Bild 1: Messvorrichtungen zur Bestimmung der Längenänderung von dünnwandigen Feinmörtel-Hohlzylindern mit und ohne Dehnungsbehinderung.

säge auf eine Länge von 70 mm gekürzt und in speziell angefertigte Messvorrichtungen eingespannt, Bild 1.

Eingelagert wurden die so präparierten Hohlzylinder in einer Na_2SO_4-Lösung mit einer Konzentration von 30 g SO_4^{2-}/L bzw. in einer gesättigten $Ca(OH)_2$-Lösung (Referenz). Die Na_2SO_4-Lösung wurde wöchentlich zu jedem Messtermin (Länge, Masse) ausgetauscht.

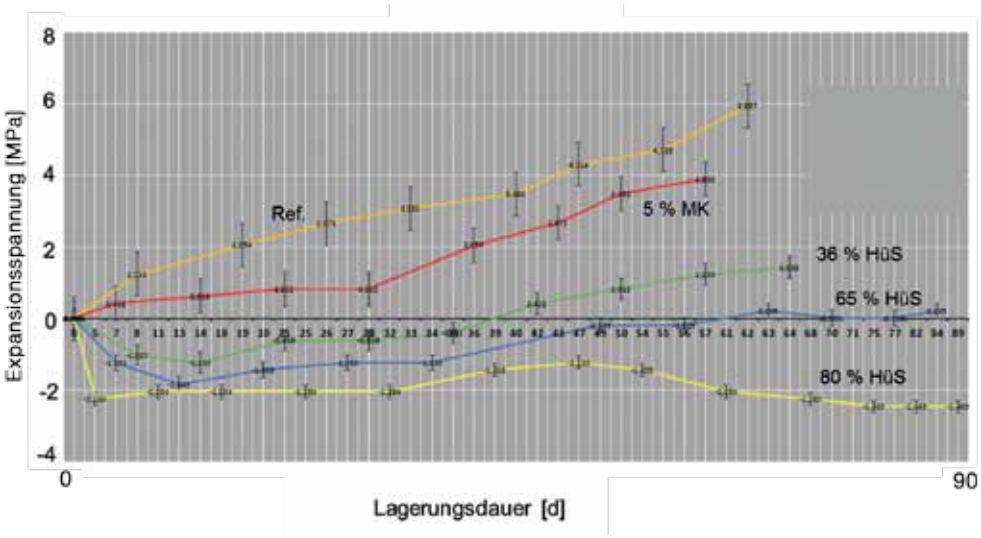


Bild 2: Entwicklung der Expansionsspannungen der Probekörper (berechnet aus der behinderten Dehnung) der Mischungen bei Lagerung in einer Na_2SO_4-Lösung mit 30 g/l SO_4^{2-}

Die Entwicklung der Spannungen (Bild 2), sowie der freien Dehnungen, fielen mit zunehmendem Anteil des Hüttensandes geringer aus. Durch die Untersuchungen der Proben mittels Röntgenbeugung wurde belegt, dass es bei der Referenzmischung und der Mischung mit Metakaolin verstärkt zur Bildung von Gips und Ettringit kommt. Bei den Proben mit Hüttensand nehmen die Anteile von Gips und Ettringit mit dem Hüttensandgehalt systematisch ab. Im Hinblick auf die Massenänderung der Hohlzylinder war zu beobachten, dass stärkere Spannungs- und Dehnungserscheinungen mit einer Massenzunahme einhergehen. Eine Verringerung der Ettringitbildung mit zunehmendem Hüttensandanteil kann nicht durch die Verdichtung des Porengefüges aufgrund der latent-hydraulisch entstandenen Hydratationsprodukte erklärt werden. Möglicherweise wird das aus dem Hüttensand stammende Aluminium in C-A-S-H-Phasen oder anderen Mineralphasen gebunden und nur teilweise für die Ettringitbildung mobilisiert.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Sulfatwiderstand mit steigendem Hüttensandanteil im Bindemittel verbessert wird.

4.3.2. Einfluss von Tausalzen und Umgebungsklima auf eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton

Masterarbeit von Roxana Denisa Lipfert
Betreuung: Kai Fischer, M.Sc.

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden an Betonfahrbahndecken von Bundesautobahnen wiederholt Schadensfälle durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) festgestellt. Als wesentliche Einflussgröße wird, neben der dynamischen Belastung durch den Verkehr, der Eintrag von NaCl aus Tausalz in den Beton angesehen. Eine verstärkte AKR durch NaCl-

Eintrag in Beton wurde bereits von zahlreichen Autoren in beschleunigten Versuchen unter erhöhten Temperaturen im Labor nachgewiesen.

In der vorliegenden Arbeit lag der Fokus deshalb auf einer Wirkung von NaCl unter praxisnahen Temperaturbedingungen. Dieser Einfluss wurde an Betonen mit reaktiven Gesteinskörnungen untersucht. Als Gesteinskörnungen wurden Grauwacke, Diabas (inerte Referenz) und synthetisches Borosilicatglas verwendet. Zusätzlich wurde die Wirkung eines Zementaustauschs durch aluminiumhaltige, puzzolanische Zusatzstoffe (Flugasche und Metakaolin) bei gleichartigen Beanspruchungen betrachtet.

Für die Untersuchungen wurden Feinbetonprismen (mit und ohne Puzzolane) nach 90-tägiger Vorlagerung bei 20 °C über Wasser in einer zyklischen Wechsellagerung beansprucht. Von insgesamt drei durchgeführten Zyklen über je 4 Wochen, beinhaltete jeder Zyklus eine 21-tägige Lagerung bei 20 °C in synthetischer Porenlösung und eine einwöchige Trocknung bei 20 °C und 65 % r. F.. Zur Betrachtung des Tausalzeinflusses auf eine verschärfende AKR, wurden einige Porenlösungen zusätzlich mit NaCl oder KCl aufdotiert. Zur Feststellung einer möglichen Schädigung wurden regelmäßig Massen-, Dehnungs- und Resonanzfrequenzmessungen durchgeführt sowie an ausgewählten Zeitpunkten die Porenlösungszusammensetzungen und die Porosität bestimmt. Nach drei Zyklen wurde das Betongefüge zusätzlich mittels Polarisationsmikroskopie untersucht.

An allen untersuchten Proben mit Borosilicatglas konnte eine AKR festgestellt werden. Die intensivste Schädigung ist bei den Proben mit reinem Portlandzement bzw. ohne Puzzolane zu beobachten. In diesen Proben ist eine AKR bereits nach 90 Tagen Vorlagerung über Wasser zu erkennen. Durch die Verwendung von aluminiumhaltigen Betonzusatzstoffen wird die Schädigung infolge einer AKR verringert und die Dehnungen deutlich reduziert. Ein AKR-verstärkender Einfluss des zugegebenen NaCl in den künstlichen Porenlösungen, ist nach dem Zeitrahmen der Untersuchungen nicht feststellbar. Die Betonproben mit natürlichen Gesteinskörnungen (Grauwacke und Diabas) zeigten nach dem Beanspruchungszeitraum von insgesamt 12 Wochen noch keine Anzeichen einer AKR. Ein vermutetes, vergleichbares Verhalten von Betonen mit reaktiver Grauwacke soll durch eine weiterlaufende Lagerung der Betone über den Bearbeitungsumfang der Master Thesis hinaus beobachtet werden.

4.3.3. Puzzolanität von Gesteinsmehlen in zementären Systemen

Masterarbeit von Christopher Wunderlich
Betreuung: Kai Fischer, M.Sc.

Zur Minderung globaler CO_2-Emissionen wurde 2011 das Erneuerbare-Energien-Gesetz durch die Bundesregierung verabschiedet. Ein damit zusammenhängender Rückgang in der Produktion von Strom aus fossilen Energieträgern – wie z. B. Steinkohle – bewirkt zukünftig auch einen Rückgang in der Produktion von Steinkohlenflugasche. Nach einer aktuellen Studie des Bundesverband Baustoffe – Stein und Erden e. V. (BBS) vom Juni 2016 wird der jährliche Bedarf an Steinkohlenflugasche in der Betonindustrie von rd. 2,5 Millionen Tonnen in den kommenden Dekaden bestehen bleiben, wobei allerdings ein Rückgang der Verfügbarkeit an Steinkohlenflugasche auf rd. 1 Mio. Tonnen prognostiziert wird. Zur Schließung dieser Angebotslücke kommen laut BBS gegenwärtig ein Import von Flugasche aus den Nachbarstaaten nach Deutschland oder ein Austausch von Flugasche durch Zement infrage. Da beide Maßnahmen aus ökologischer bzw. klimapolitischer Hinsicht recht diskussionswürdig erscheinen, stellt sich die Frage, ob es möglicherweise alternative Roh-

stoffe mit puzzolanischen Eigenschaften gibt, die anstelle der Flugasche in Betonanwendungen eingesetzt werden könnten. In dieser Hinsicht stellen Mehle und Stäube aus der Produktion von gebrochenen Gesteinskörnungen eine interessante Ressource dar, weil diese in großen Mengen anfallen und derzeit keine großflächige Verwendung finden.

Vor diesem Hintergrund war das Ziel der Arbeit, aussagekräftige Methoden für die Beurteilung des puzzolanischen Potentials von Gesteinsmehlen zu ermitteln, und geeignete Gesteine zu finden. Für die Untersuchungen wurden eine Flugasche und ein kommerzielles Phonolithmehl als Referenzpuzzolane verwendet. Als Gesteinsmehle kamen eine Grauwacke, zwei Rhyolithe und ein Splitt aus dem Oberrheingebiet zum Einsatz. Diese speziellen Gesteine wurden ausgewählt, da sich diese durch eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion auszeichnen und diese Reaktivität möglicherweise zu einer puzzolanischen Reaktion führen kann, wenn diese als Mehl in Zement- und Betonanwendungen eingesetzt werden.

Als ersten Indikator zur Überprüfung wurde der Frattini-Test nach DIN EN 196-5 durchgeführt, der aber keine ausreichende Aussagekraft über die puzzolanische Reaktivität der Gesteinsmehle liefert. Zuverlässigere Ergebnisse ergaben die Festigkeitsuntersuchungen an Mörtel zur Bestimmung des Aktivitätsindex nach „Flugasche-Norm“ (EN 450-1) und die Lagerung der einzelnen Gesteinsmehle in einer gesättigten Calciumhydroxid-Lösung. Aber auch die Untersuchungen von gesteinsmehlhaltigen Zementsteinen mittels Röntgenbeugung oder Thermogravimetrie zur Untersuchung des Gehaltes von Portlandit gaben Aufschluss über die puzzolanische Reaktivität.

Die Untersuchungen an Mörtelprismen im Alter von 90 Tagen zeigen, dass alle Mischungen mit den verwendeten Gesteinsmehlen den Mindestanforderungen an die Druckfestigkeit (Aktivitätsindex) nach EN 450-1 deutlich nicht genügen. Im Gegensatz dazu erfüllen die Festigkeitsuntersuchungen an Mörtel mit den Referenzpuzzolanen (Flugasche und Phonolithmehl) diese. Die selben Tendenzen zeichnen sich in den Lagerungsversuchen der Stoffe in einer gesättigten Portlandit-Lösung ab. Aus diesem Grund scheint diese Methode eine zuverlässige Beurteilung der Puzzolanität von Gesteinsmehlen zu liefern. Gleichwohl müssten diese Indizien anhand weiterer Versuche bestätigt werden.

AG Betontechnologie

4.3.4. Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die Rheologie von Betonen für den Spezialtiefbau

Masterarbeit von Victor Andrei Petrascu
Betreuung: Dipl.-Ing. Thomas Kränkel

An die Frischbetoneigenschaften von Betonen für den Spezialtiefbau, wie für die Herstellung von Schlitzdichtwänden oder Bohrpfahlwänden, werden zahlreiche Anforderungen gestellt. So muss der Beton bei der Anlieferung auf der Baustelle mindestens der Konsistenzklasse F4-F5 entsprechen, um im Kontraktorverfahren eingebaut werden zu können. Darüber hinaus muss der Beton seine Konsistenz teilweise für lange Zeit (mitunter bis zu 10 Stunden) halten können, um während des zeitaufwändigen Einbauprozesses ausreichend verarbeitbar zu bleiben. Zusätzlich muss der Beton, aufgrund der großen Einbauhöhe, eine hohe Mischungsstabilität sowie, aufgrund der mit dem Kontraktorverfahren einhergehenden gesteigerten Drücke auf den Frischbeton, ein hohes Wasserrückhaltevermögen aufweisen.

Die genannten Frischbetoneigenschaften und deren zeitliche Entwicklung können gezielt durch die Betonzusammensetzung gesteuert werden. So kommen im Spezialtiefbau bspw. Fließmittel mit einer sehr lang anhaltenden Verflüssigungswirkung zur Anwendung. Zusätzlich werden oft konsistenzhaltende und hydratationsverzögernde Zusatzmittel eingesetzt, um die langen Einbauprozesse realisieren zu können. Auch der Einsatz hoher Gehalte an Betonzusatzstoffen, wie Gesteinsmehl zur Reduktion der Hydratationswärmeentwicklung oder auch von Flugasche und Silikastaub zur Steigerung der Mischungsstabilität und der Festigkeit, sind im Spezialtiefbau nicht unüblich.

Ziel der Masterarbeit war es, in einer umfassenden Literaturrecherche herauszuarbeiten, wie die Frischbetoneigenschaften und insbesondere deren zeitliche Entwicklung von Betonen für den Spezialtiefbau durch die gezielte Variation von Art und Gehalt der Betonzusatzmittel und -stoffe gesteuert werden kann. In einem Versuchsprogramm wurde anschließend der Einfluss der Zementart (CEM I, II und III) sowie der Gesteinskörnung (Kies, Splitt) auf die Verarbeitbarkeit und deren zeitliche Entwicklung sowie auf die Mischungsstabilität und das Wasserrückhaltevermögen des Frischbetons quantifiziert. Die Masterarbeit gibt so einen umfassen Überblick darüber, wie die Eigenschaften von Frischbetonen gezielt auf die im Spezialtiefbau auftretenden Anforderungen abgestimmt werden können.

4.3.5. Konzeption von Zementleimen für das additive Fertigungsverfahren selective paste intrusion

Masterarbeit von Christian Wostatek
Betreuung: Daniel Weger, M.Sc.

Additive Fertigungstechniken (auch umgangssprachlich als „3D Druck“ bezeichnet) bieten den Vorteil, dass fast beliebige Geometrien ohne zusätzliche Werkzeuge wie Formen oder Schalungen hergestellt werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass im Gegensatz zu konventionellen Fertigungstechniken die Produktionskosten losgelöst von der Stückzahl und der Komplexität der Bauteile sind. Dies bringt für den Baubereich sehr interessante Einsatzmöglichkeiten mit sich, da hier ohnehin nur Einzelstücke hergestellt werden. Durch die Möglichkeiten der additiven Fertigung können durch den hohen Grad an geometrischer Freiheit ganz neue architektonische Entwürfe umgesetzt werden. Dazu entfallen die Schalungskosten der Bauteile. Für den Betonbau kann unter anderem das additive Fertigungsverfahren „selective paste intrusion“ angewendet werden. Hierbei werden dünne Schichten von Gesteinskörnung ausgebracht, die dann mit einem Zementleim nur an den Stellen verfestigt werden, an denen später das Bauteil entstehen soll. So wird das Objekt Schicht für Schicht aufgebaut.

Ziel der Arbeit war es, Zementleime für das additive Fertigungsverfahren „selektive paste intrusion“ zu konzipieren, die sowohl statisch relevante Druckfestigkeiten als auch gute visuelle Eigenschaften der produzierten Bauteile ermöglichen. Einen entscheidenden Parameter stellt dabei die Eindringtiefe des Leimes in Abhängigkeit zur Durchlässigkeit der Gesteinskörnung dar. Dazu wurden Leime konzipiert, die die aufgebrachten Gesteinskörnungsschichten komplett durchdringen konnten.

Es wurden Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der Eindringtiefe der Leime sowie des w/z-Wertes ermittelt und gleichzeitig die Maßhaltigkeit der Probekörper in Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften sowie der Gesteinskörnung bestimmt. Abschließend konnten erfolgreich Leime mit guten Formtreueeigenschaften und Festigkeiten im konstruktiv relevanten Bereich eines C20/25 entworfen werden.

AG Stahl und Korrosion

4.3.6. Bestimmung der Korrosionsinitiierung von Stahlbeton unter Frost-Tau-Beanspruchung

Masterarbeit von Nicolai Klein
Betreuung: Dr.-Ing. Sylvia Keßler; Dipl.-Ing. Charlotte Thiel

Chloridinduzierte Korrosion von Betonbauwerken aufgrund der Belastung durch Taumittel ist eine der häufigsten Schadensursachen. Bisher liegt jedoch kein etabliertes Prüfverfahren vor, bei dem die stahlschützende Wirkung des Betons bei einer in Folge von Frost-Tau-Wechsel verstärkten Belastung durch Taumittel eingestuft wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurde in Anlehnung an bestehende Arbeiten ein Schnellprüfverfahren konzipiert. Mit diesem soll durch Integration von Methoden zur Korrosionsüberwachung von stufenweise eingebauter Bewehrung in die übliche CDF-Prüfung eine Qualitätseinteilung ermöglicht werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Beurteilung und Anwendbarkeit dieses Prüfverfahrens. Dafür wurden die Messergebnisse von drei Serien unterschiedlicher Qualität bezüglich w/z-Wert beziehungsweise Luftporengehalt im Hinblick auf Korrosion und Frostschäden sowohl miteinander als auch einzeln gegen kapillar saugende Referenzserien verglichen.

Der Frost-Tau(mittel)-Angriff war unter den verwendeten Bedingungen der maßgebende Schädigungsmechanismus, wohingegen die Stahlkorrosion lediglich eine untergeordnete Rolle spielte. Somit konnte die für ein Schnellprüfverfahren angestrebte gleichmäßige Verstärkung von Frost-Tau- und stahlkorrosivem Angriff bei den durchgeführten Versuchen nicht erreicht werden.

Allerdings besteht die Möglichkeit, durch eine Veränderung des Aufbaus die Angriffsintensitäten anzupassen. So kann durch eine Anhebung der Tiefsttemperaturen die Frostschädigung stark reduziert werden. Mit einer höheren Chloridkonzentration in der Prüflösung, einer eindeutigen und gut belüfteten Kathode, einer auf das nötigste reduzierten Abdichtung sowie durch die Einführung von Trocknungszeiten könnte der Angriff auf den Stahl verstärkt beziehungsweise dem Frostangriff angepasst werden.

4.3.7. Anwendung des Potential- und Radarmessverfahrens an einem Stahlbetonkörper

Masterarbeit von Florian Mrowietz
Betreuung: Dr.-Ing. Sylvia Keßler; Dipl.-Geophys. Robin Groschup

Für die große Anzahl der Stahlbetonbauwerke in unserer alternden Infrastruktur stellt sich die Bauwerksuntersuchung zur Ermittlung des Zustandes der Bausubstanz als unabdinglich dar. Verschiedene, zerstörungsfreie Messverfahren wurden dahingehend entwickelt und haben sich etabliert. Im Zuge dieser Arbeit wurden zwei dieser Verfahren, die Potentialfeldmessung zur Identifizierung und Lokalisierung aktiver Korrosion, und das Radarverfahren zur Detektion von Betoneinbauteilen, untersucht.

Beide Verfahren werden an einem frei bewitterten Stahlbetonprobekörper angewendet und ihre Eigenschaften und Anwendungsgrenzen analysiert. Der verwendete Probekörper zeichnet sich zum einen dadurch aus, dass für das Potentialfeldverfahren künstliche Korrosionsstellen erzeugt werden können. Zum anderen sind vielfältige Einbauteile verbaut, mit denen das im Bauwesen angewendete Ground Penetration Radar (GPR) getestet werden

kann. Für das Potentialverfahren werden die Messgenauigkeit, der Einfluss von Feuchte und Messraster, sowie die Detektion der künstlichen Korrosionsstellen untersucht. Es wird zudem analysiert, ob sich die Systeme, bestehend aus Edelstahlgittern oder Mörtelanoden, zur Simulation von Korrosionsstellen eignen.

4.3.8. Korrosionsmonitoring beschichteter Stahlbetonbauteile

Masterarbeit von Eric Neufeld
Betreuung: Florian Hiemer, M.Sc.

Bei der Stahlbetonbauweise sind Risse in Bereichen hoher Zugbeanspruchung unumgänglich. Im Rissbereich geht die Barrierewirkung der Betondeckung gegenüber Chloriden sehr schnell verloren. Erreicht der Riss die Tiefenlage des Betonstahls, ist am Stahl früh mit Korrosion zu rechnen.

Das Forschungsvorhaben „Korrosionsmonitoring in Rissbereichen realer Stahlbetonbauteile zur Wirksamkeitskontrolle des Instandsetzungsprinzips W-Cl“ 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 initiierter Korrosionsprozess durch eine Beschichtung tatsächlich zum Erliegen kommt. In der ersten Phase des Projekts wurden 61 Korrosionssensoren nach dem Prinzip der Isolation anodisch wirkender Stahlbereiche in zwei Münchener Parkhausbauwerke eingebaut, von denen insgesamt 8 Sensoren fortan genauer betrachtet wurden. Erste Untersuchungen umfassten die Nullmessung der Sensoren vor der Beschichtungsmaßnahme.

In der Masterarbeit wurden zunächst die bereits erfassten Eingangsdaten über den Zeitraum vor der Beschichtungsmaßnahme analysiert. Parallel dazu wurden relevante elektrochemische Korrosionskenngrößen (Strom-, Potential-, und Elektrolytwiderstände) an den beiden Parkhausbauwerken erfasst. Nachfolgend werden die Erkenntnisse aus beiden Bauwerken näher erläutert.

Bauwerk 1: In BW1 zeigten die 5 betrachteten Sensoren unterschiedliche Ergebnisse. An den Sensoren Sensor 17 und Sensor 20 wurde ein positiver Effekt der Beschichtung wahrgenommen. Der Korrosionsstrom sank dabei stark. Von einer Passivität kann derzeit allerdings nicht ausgegangen werden. Sensor 4b war seit Untersuchungsbeginn passiv und unaufällig. An Sensor 8 kam es 16 Monate nach Beschichtung zu einer spontanen Korrosionsinitiierung. Dies geschah trotz intakter Beschichtung. Grund hierfür könnte eine erneute Chloridumlagerung sein, welche an der Anode den kritischen Chloridgehalt überschritten hat und somit den Korrosionsprozess aktivierte. Sensor 18 zeigte abnehmende Korrosionsaktivität. Die Temperaturbereinigung der Daten zeigte, dass der Korrosionsstrom maßgeblich nur hierdurch verringert wurde. So müssen die künftigen Messungen des Forschungsvorhabens zeigen, ob die Instandsetzung den gewünschten Erfolg erzielen kann.

Bauwerk 2: Die in BW2 untersuchten Sensoren waren bis zur Vollendung der Masterarbeit noch im unbeschichteten Zustand, weshalb hier nur die Nullmessung ausgewertet wurde. Sensor 51p, welcher sich nicht im Rissbereich befindet, war dauerhaft passiv und lieferte keine Erkenntnisse über eine Veränderung der Korrosionsbedingungen in Rissbereichen. Es wurde ein Anstieg des Elektrolytwiderstands von 50% festgestellt, was auf eine Austrocknung sowohl des Betons, als auch des Vergussmörtels zurückzuführen ist. An den Sensoren 18R2 und 21 ist über die Zeit eine Abnahme der Korrosionsaktivität aufgezeich-

net worden. Immer zur Winterperiode kam es zu einem Anstieg des Korrosionsstroms, welcher kurz darauf wieder abfiel. Von einem dauerhaften Überschreiten des korrosionsauslösenden Chloridgehalts kann demnach noch nicht ausgegangen werden. Somit stehen die Chancen gut, durch zeitnahes Auftragen einer Beschichtung den Erfolg der Instandsetzung zu erzielen. Diese Annahme soll durch künftige Messungen belegt, bzw. widerlegt werden. Der generelle Messaufbau mittels Trennung des anodischen Bereichs von der übrigen Bewehrung gestaltete sich grundlegend als zielführend. Nachteilig erwies sich der zerstörende Eingriff bei der Isolierung der Anode, verbunden mit dem Einbringen eines Vergussmörtels. Dessen Austrocknung spiegelte sich in den ersten Monaten der Messung wider und führten zu nicht quantifizierbaren Messeinflüssen.

Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens muss sich zeigen, ob die Instandsetzung des Bauwerks 1 zielführend ist. In dieser Arbeit konnte bereits ein positiver Trend erkannt werden. Da die Austrocknung des Betons sowie die Umlagerung der Chloride im Betoninneren jedoch ein langwierige Prozesse sind, werden erst weitere Messungen den Erfolg, bzw. Misserfolg der Instandsetzung aufzeigen können. Hierbei wird vornehmlich auf die augenscheinliche Begutachtung der Anoden nach Ablauf der Untersuchungszeit hingewiesen. Erst hiernach ist das tatsächliche Ausmaß der Schädigung ersichtlich. So kann auch die Anodenfläche annähernd genau bestimmt werden und auf eine prognostizierte Abtragsrate geschlossen werden.

Die Beschichtungsmaßnahme in BW2 könnte noch im Jahre 2016 vollzogen werden. Genaue Informationen zum Beschichtungstermin liegen derzeit nicht vor. Es können jedoch gute Chancen für den Erfolg der Instandsetzung angenommen werden, wenn diese vor der nächsten Winterperiode erfolgt.

Im Ergebnis wird deutlich, dass die Steindruckfestigkeit nicht nur von der Zusammensetzung aus Ton, Sand, Kies und Wasser abhängt. Denn auch Parameter bei der Herstellung, wie beispielsweise das richtige Einbringen in die Schalung, nehmen Einfluss. Die Eigenschaft, die die besten Rückschlüsse auf die Druckfestigkeit zulässt, ist die Biegezugfestigkeit. Ein Verfahren, bei dem ebenfalls gute Übereinstimmungen mit der Druckfestigkeit festgestellt werden, ist das Verfahren zur Bestimmung der Ausziehkraft. Die Versuche zeigen, dass Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit sowie Druckfestigkeit und Ausziehkraft gut korrelieren. Die Prüflinge für die Bestimmung der Ausziehkraft weisen jedoch eine hohe Fehleranfälligkeit bei der Produktion auf, weshalb die Anwendung des Biegezugfestigkeitsverfahrens vorzuziehen ist. Die Korrelation der praktisch ermittelten Biegezugfestigkeit benötigt eine Korrektur gegenüber der normativ festgestellten Biegezugfestigkeit.

4.3.9. Der kathodische Korrosionsschutz (KKS): Eine ökonomische und ökologische Alternative für die Instandsetzung von Brückenpfeilern?

Masterarbeit von David Schnell
Betreuung: Dr.-Ing. Sylvia Keßler; Stefan Göppel, M.Eng. (Geigergruppe)

Die Instandhaltung der Infrastruktur in Deutschland gewinnt von Jahr zu Jahr an Bedeutung. Viele Bauwerke sind in die Jahre gekommen und bedürfen einer umfassenden Instandsetzung. Dazu gehört auch eine Vielzahl von Straßenbrücken aus Stahlbeton. Der hohe Einsatz von Tausalzen stellt hierbei eine besondere Belastung dar. Kombiniert mit der teilweise unzureichenden Betondeckung besteht ein erhöhtes Risiko für das Eindringen von Chloriden bis an die Bewehrung. Wird der korrosionsauslösende Chloridgehalt auf Bewehrungshöhe überschritten, kann es zu einer chloridinduzierten Bewehrungskorrosion kommen.

Klassische Sanierungsverfahren setzen auf ein Abtragen des belasteten Betons und eine anschließenden Reprofilierung. Diese Vorgehensweise ist aufwendig und stellt bei tragenden Bauteilen einen großen Eingriff in das statische System dar, gefolgt von hohen Kosten und Nutzungseinschränkungen über die gesamte Bauzeit. Ein Verfahren welches diesen Eingriff größtenteils vermeidet, stellt der KKS dar. Hierbei handelt es sich um ein elektrochemisches Verfahren, durch das die Bewehrung kathodisch polarisiert wird und die Korrosionsgeschwindigkeit somit auf ein vernachlässigbares Maß absinkt. Bei Tiefgaragen bereits angewendet, wird das Verfahren bei Brücken in Deutschland noch als Nischenlösung angesehen. Bei richtiger Planung, Ausführung und Überwachung lassen sich hohe Lebensdauern der ertüchtigten Bauwerke ermöglichen.

Diese Arbeit besteht aus der Untersuchung der wirtschaftlichen Randbedingungen bezüglich der anfallenden Kosten, des Sanierungszeitpunkts sowie der Lebensdauer der verschiedenen Instandsetzungsvarianten für Brückenbauwerke, insbesondere Brückenpfeiler. Ergänzend dazu werden die ökologischen Auswirkungen in Abhängigkeit der gewählten Sanierungsvariante untersucht, um mit Hilfe einer Ökobilanzierung qualitative Aussagen über die Umweltauswirkung der ausgesuchten Instandsetzungsvarianten zu treffen.

4.3.10. Untersuchungen zum Einfluss von Eigenspannungen auf das Dauerschwingverhalten von Betonstahl

Masterarbeit von Dipl.-Ing. (FH) Matthias Scholz
Betreuung: Dr.-Ing. Kai Osterminski

Die Herstellung von Betonstahl erfolgt nach dem aktuellen Stand der Technik durch eine Kombination mehrerer Fertigungsprozesse. Der Rohling wird bei hoher Temperatur entlang einer Walzstraße über mehrere Walzgerüste vom Brammen- zum Rundquerschnitt gewalzt. Das Warmwalzen des Rundstabs wird durch das Aufbringen der charakteristischen Rippung eines Betonstahls mit der letzten Walze abgeschlossen. Unmittelbar danach wird der glühende Betonstahl in einem Wasser- oder Ölbad abgeschreckt und auf einem Kühlbett zwischengelagert. Die Restwärme im Kernbereich wird dazu genutzt das abgeschreckte Gefüge in der Randzone wieder anzulassen. Durch das Zusammenwirken der gehärteten Randzone und des duktilen Kerns lassen sich die mechanischen Eigenschaften des Betonstahls gezielt einstellen.

Nach den Angaben der Literatur sollten infolge des Abschreckens am Rand Druckeigenspannungen entstehen. Im Forschungsvorhaben „Ermüdung von Betonstahl mit und ohne Korrosion“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) konnte diese Annahme jedoch nicht bestätigt und Gegenteiliges aufgezeigt werden. Durch die festgestellte Größenordnung randnaher Zugeigenspannungen an der Seite mit Querrippen stellt sich die Frage, ob die Eigenspannung des Betonstahls dessen Dauerschwingverhalten beeinflusst.

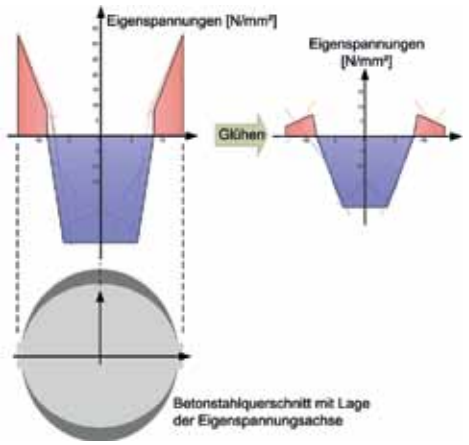


Bild: Veränderung der Eigenspannung eines Betonstabstahls (ursprünglich wärmebehandelt) durch Glühen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Dauerschwingprüfungen an zwei Serien von unveränderten und eigenspannungsarmen Betonstahlproben verglichen. Hierzu wur-

den die Proben einer nachträglichen Glühbehandlung unterzogen und deren Auswirkung auf die Probeneigenschaften durch weiterführende Untersuchungen analysiert. Weiterhin wurde der Eigenspannungszustand von unbehandeltem Betonstahl an der Seite ohne Querrippe erfasst, um den zweiaxialen Spannungsverlauf abzubilden. Eigenspannungsmessungen an wärmebehandeltem Betonstahl wurden zur Beurteilung der Spannungsreduzierung durch das nachträgliche Glühen herangezogen.

Im Zuge der Untersuchungen konnte der Eigenspannungsverlauf sowie das Dauerschwingverhalten eines eigenspannungsarmen Betonstahls charakterisiert werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der eigenspannungsarme Betonstahl ein signifikant besseres Dauerschwingverhalten aufweist als der unbehandelte.

Abschließend legt die Arbeit einen möglichen Lösungsansatz aus aktueller Forschung zur Bildung von Zugeigenspannungen durch Abschrecken dar und veranschaulicht diesen mit Beispielen aus der Praxis.

AG Zerstörungsfreie Prüfung

4.3.11. Detektion von schwachen CFK-Klebungen mittels Ultraschallfrequenzanalyse

Masterarbeit von Julia Daitche
Betreuung: Dipl.-Ing. Phillipp Jatzlau

Aufgrund der besonderen mechanischen Eigenschaften und des hohen Leichtbaupotentials finden die kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe (CFK) eine breite Anwendung in der Luftfahrt. Um die Vorteile der Werkstoffgruppe besser nutzen zu können, ist eine faser- und leichtbaugerechte Verbindung der CFK-Bauteile erforderlich. In dieser Hinsicht stellt das Kleben das ideale Fügeverfahren dar. Im Gegensatz zu den konventionellen Techniken führt es einerseits nicht zur Schädigung der lasttragenden Fasern und bietet andererseits einen erheblichen Gewichtsvorteil aufgrund des Verzichts auf metallische Fügeteile. Zum Nachweis einer ausreichenden Haftfestigkeit einer Klebeverbindung werden verschiedene zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt. Ein grundlegendes Problem stellen dabei adhäsionsschwache Zonen dar, die derzeit zerstörungsfrei nicht detektierbar sind. Eine innovative Lösung für die Verbindung von CFK-Strukturen stellt die hybride Faserverbund-Metall-Bauweise dar. Diese kann wiederum Fehlerstellen verursachen, die sich von den typischen Defekten in faserverstärkten Kunststoffverbunden unterscheiden und somit eine neue Herangehensweise an deren zerstörungsfreie Detektion erfordern.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Potenzial der Ultraschallfrequenzanalyse zum Nachweis unterschiedlicher Klebequalitäten in CFK-Verbindungen und zur Detektion verschiedener Fehlerstellen in CFK-Metall-Verbunden untersucht. Für die Untersuchungen werden sowohl bereits vorhandene als auch neu angefertigte Probekörper verwendet. Die CFK-Klebeverbindungen unterteilen sich in drei Proben mit einer guten, einer mittleren und einer schlechten Klebequalität. Die CFK-Metall-Verbindungen beinhalten künstlich erzeugte Fehler, darunter Pin-Fehler, Harznester, Adhäsionsversagen der Metallverstärkung und Delamination im CFK-Laminat. Als Prüfmethode kommt das Ultraschallverfahren im Tauchbecken zum Einsatz, vertreten durch die Impuls-Echo- und die Durchschallungstechnik. Während der US-Messungen werden Volumenscans aufgezeichnet und anhand der Daten eine Frequenzanalyse durchgeführt. Zur Untersuchung stehen vier verschiedene Prüffrequenzen zur Verfügung (2 MHz, 5 MHz, 10 MHz und 20 MHz), deren Eignung zur Detektion

der schwachen Klebungen bzw. der Fehlerstellen geprüft werden soll. Zur Verifikation der Ergebnisse werden Wiederholungsmessungen und teilweise auch ein G1c-Test eingesetzt. Im Anschluss an die experimentellen Untersuchungen wird die Entwicklungsreife des Prüfverfahrens mit Hilfe der TRL-Methode bewertet. Die Arbeit wurde in Kooperation mit der Airbus Group Innovations in Ottobrunn durchgeführt.

4.3.12. Bildgebende Ultraschallprüfung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mit der Full- Matrix-Capture-Technik

Masterarbeit von Eric Eschler
Betreuung: Dipl.-Ing. Philipp Jatzlau

Einen vielversprechenden Ansatz der Ultraschallprüfung stellt heute die Full-Matrix-Capture (FMC) als Methode zur Ultraschall-Datenerfassung mithilfe eines Phased-Array-Prüfkopfes dar. Dabei wird eine Informationsmatrix aus A-Bildern aller möglichen Kombinationen aus Sende- und Empfangselementen des Prüfkopfes erstellt. Zur bildgebenden Rekonstruktion der FMC-Rohdaten wird häufig die Total Focusing Method (TFM) zur laufzeitkorrigierten Überlagerung der A-Bilder eingesetzt. Durch synthetische Fokussierung auf jedes Voxel entstehen somit Ultraschallaufnahmen hoher Qualität.

Der Fokus lag in dieser Arbeit auf der bisher wenig erforschten Erprobung der FMC/TFM-Technik an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK). Zu Beginn wurden in dieser Arbeit die wesentlichen Grundlagen der Ultraschallprüfung, der FMC/TFM-Technik und der Faserverbundwerkstoffe beschrieben.

Im praktischen Teil wurde das Ultraschallprüfgerät „DYNARAY“ der Firma Zetec in Kombination mit mehreren Phased-Array-Prüfköpfen verschiedener Prüffrequenzen genutzt. Außerdem wurde die Fertigung zweier Probekörper aus Aluminium bzw. CFK mit jeweils zwei Anordnungen von Querbohrungen dargestellt, welche beispielhaft als Prüfkörper dienen. Einen wichtigen Teil der Arbeit stellte zudem die Ermittlung der winkelabhängigen Schallgeschwindigkeitsprofile der CFK-Prüfobjekte dar. Auf dieser Basis wurde anschließend die Qualität der Bildgebung der FMC/TFM-Kombination mit der klassischen Phased-Array-Prüfung verglichen, wobei erstere überwiegend bessere Ergebnisse zeigten.

Den Kern der Arbeit stellten die anschließenden Untersuchungen an CFK dar, wobei zunächst die Qualität der Darstellung von Querbohrungen in verschiedenen Tiefen und hintereinanderliegenden Reflektoren untersucht wurde. Verbesserungspotential der TFM zeigte sich dabei vor allem bei der Detektion oberflächennaher und „verdeckter“ Reflektoren. Es folgte die Betrachtung einiger Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung des TFM-Algorithmus, wobei insbesondere Half-Matrix-Capture (HMC) eine geeignete Möglichkeit zur Reduktion von Zeit- und Rechenaufwand darstellt. Zudem wurde ein maximaler Rekonstruktionswinkel der Bildgebung zur Verminderung der Elementanzahl, welche zur TFM-Rekonstruktion eines bestimmten Voxels beiträgt, eingeführt. Anhand einer SNR-Betrachtung konnte die deutliche Qualitätssteigerung der Bildgebung quantifiziert werden, die mit diesem Verfahren einhergeht. Auf Grundlage des maximalen Rekonstruktionswinkels wurde außerdem eine Erhöhung der Detektionswahrscheinlichkeit oberflächennaher Defekte erreicht.

Abschließend wurde der praxisnahe Fall der Prüfung von Impactschäden an CFK durch Erzeugung von TFM-C-Bildern mithilfe eines Manipulators zur linearen Bewegung des Prüfkopfes untersucht. Die Arbeit entstand in Kooperation mit der Siemens AG am Standort Neuperlach.

4.3.13 Validation of the Vibration Behavior of a Wind Turbine Supporting Structure in Field through Combined Measurement Methods

Masterarbeit von Eliana Hernandez
Betreuung: Dipl.-Geophys. Robin Groschup

Die Masterarbeit von Frau Hernandez entstand im Vorfeld des aktuell laufenden Forschungsprojekts MISTRALWIND und lieferte erste Messdaten zu Schwingungen von Windenergieanlagen (WEA). Die Hauptaufgabe der Masterarbeit bestand in der Validierung des Schwingungsverhaltens einer WEA-Tragstruktur mittels kombinierter Messverfahren. Für die Konzeption eines Structural Health Monitoring Systems für WEAs ist es von zentraler Bedeutung, das Schwingungsverhalten des Systems mit etablierten Messverfahren möglichst genau charakterisieren zu können.

Im Rahmen der Arbeit wurden Schwingungsmessungen mittels Seismometer, Laservibrometer und Lichtleitergyroskop an der intakten Tragstruktur einer Windkraftanlage durchgeführt. Schwingungsdaten wurden über einen Messzeitraum von zwei Wochen bei Stillstand und Betrieb der Anlage erhoben. Die Messdaten wurden mittels Fourier-Analyse und Short time Fourier Transformation (STFT) analysiert. Der Großteil der Schwingungsenergie liegt im Frequenzbereich von 0-5 Hz. Es werden hauptsächlich die ersten zwei Biegeeigenfrequenzen angeregt.

Zusätzlich wurde ein FEM-Modell der Tragstruktur aufgebaut und die Ergebnisse der Schwingungsanalyse aus Modell und Experiment verglichen. Diese stimmen gut überein. Lediglich die aus experimentellen Daten ermittelte zweite Biegeeigenfrequenz unterlag Schwankungen, die noch genauer untersucht werden sollten.

Die gewonnenen Daten und Erfahrungen können als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Structural Health Monitoring Systems für Windkraftanlagen dienen, das reduzierte Wartungszeiten und eine Verlängerung der Restlebensdauer ermöglichen könnte.

4.3.14. Optimal Full-Field Scanning of Honeycomb Core Composite

Masterarbeit von Sebastian Lotz
Betreuung: Dipl.-Ing. Phillipp Jatzlau

Die Wartung von Flugzeugen ist kostenintensiv und muss sehr gut geplant werden, um Ausfallzeiten möglichst zu vermeiden. Ein automatisches Laserscan-System bietet großes Potential, um den Prozess zu verbessern und die Kosten auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Firma UTC Aerospace Systems (UTAS) in San Diego, Kalifornien, plant, Triebwerksgondeln aus einem Aluminium-Honigwabenkern mit Deckschichten aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff zu inspizieren. Das Hauptziel ist es, vor allem flächige Fehlstellen wie z. B. Ablösung der Deckschichten vom Kern zu detektieren. UTAS hat das Labor für zerstörungsfreie Prüfung der UC San Diego beauftragt, eine Methode für die Inspektion der genannten Struktur zu entwickeln und ein FE Modell zu konstruieren, das die reale Struktur realitätsnah nachahmen kann.

Ziel dieser Arbeit war es, ein Finite-Elemente-Modell der Triebwerksgondeln zu erarbeiten sowie eine Vollfeld-Laserquelle zu definieren, die als Anregungsquelle für die zerstörungsfreie Prüfung dient. Sowohl die Erläuterung der Materialzusammensetzung, die theoretischen Grundlagen der geführten Ultraschallwellen, die zur Schadensidentifikation verwen-

det werden, als auch die Grundlagen für das Modellieren mit finiten Elementen wurden behandelt. Zum Abschluss wird noch eine nicht vollständige Methode zur Signalverarbeitung vorgestellt, die auf der Wellenzahl im Frequenzbereich basiert. Diese Methode soll für die Inspektion und Schadensdetektion von Deckschichtablösungen der Honigwabenkernstruktur verwendet werden. Diese Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der University of San Diego, USA.

4.3.15. Zerstörungsfreie Prüfung von Betonprobekörpern mit bakterienbasierten Selbstheilungseigenschaften

Masterarbeit von Christopher Mayer
Betreuung: Fabian Malm, M.Sc., Dipl.-Ing. Thomas Kränkel

Die Masterarbeit befasst sich mit der autonomen bakterienbasierten Selbstheilung von Stahlbeton. In Anlehnung an das Projekt „healCON“ wurden bewehrte Betonprobekörper (150x150x550mm) hergestellt. Die Hälfte der Probekörper wurde mit einer Heilungssubstanz eingeschlossen im Inneren von Blähtonkugeln (Ø 1-4mm), die dem Beton als Zuschlag hinzugegeben wurde, ausgestattet. Die Heilungssubstanz besteht aus Bakteriensporen (bacillus sphaericus) eingebettet in Calcium-Laktat. Die anderen Probekörper wurden analog hergestellt, jedoch mit unbehandelten Blähtonkugeln als Zuschlag. In der Arbeit wird im ersten Schritt die Imprägnierung der Blähtonkugeln und die Betonage der Probekörper beschrieben und erläutert. Mittels risskontrollierten 3-Punkt-Biegeversuchen konnte anschließend eine künstliche, weggesteuerte Risserzeugung durchgeführt werden und diese Risse sollten im Nachgang während einer ca. 6 wöchigen Heilungsphase wieder verschlossen werden. Die Probekörper wurden zerstörungsfrei in den zeitlich versetzten Prüfphasen nach der Erhärtung, nach der Risserzeugung und nach der Heilung geprüft und somit charakterisiert. Dabei kamen die Schwingungsanalyse und das Ultraschallverfahren zur Anwendung. Die über die Schwingungsanalyse gewonnenen Elastizitätsmoduln der Gesamtstruktur einzelner Probekörper in ihren verschiedenen Zuständen gab Auskunft über die Charakterisierung der Probekörper und ermöglichte es eine Einschätzung der Heilungseffizienz zu geben. Beim Ultraschallverfahren wurden Auswertungen bzgl. der Ersteinsätze, Signalintensitäten und Frequenzanteile in den jeweiligen Zustandsstadien ermittelt. Die Ergebnisbetrachtung zeigte ein hohes Potential der verwendeten ZfP-Methoden für die praktische Umsetzung zur Prüfung von Bauteilen mit Selbstheilungseigenschaften.

4.3.16. Aufbau eines Systems zur Schwingungsanalyse für die Dauerüberwachung der Tragstrukturen von Windkraftanlagen

Masterarbeit von Stefan Oberländer
Betreuung: Max Botz, M.Sc.

Die Diplomarbeit von Stefan Oberländer leistet einen wichtigen Beitrag zum Forschungsprojekt MSTRALWIND. Windkraftanlagen ermöglichen eine klimafreundliche Stromerzeugung in Deutschland und anderen Industriestaaten weltweit. Viele Windkraftanlagen wurden auf eine Betriebsdauer von 20 Jahren ausgelegt. Es wird davon ausgegangen, dass die Tragstruktur auch für eine Nutzung über diesen Auslegungszeitraum hinaus geeignet ist. Um Aussagen darüber treffen zu können, ist eine Überwachung der auftretenden Belastungen sowie der Veränderungen der Tragstruktur notwendig.

In dieser Arbeit wurde ein Messsystem zur Schwingungsanalyse in einer 3,0 MW-Onshore-Anlange installiert. Damit wurden modale Parameter des Turms ermittelt und weitere Frequenzanalysen in verschiedenen Betriebszuständen durchgeführt. Die gewonnenen Daten

dienen einerseits zur Validierung eines FEM-Modells der Anlage, und andererseits dem Structural Health Monitoring (SHM) selbst. Die Steifigkeit des Bauwerks wurde über die Näherung mit dem Modell des ungedämpften Einmassenschwingers experimentell ermittelt. Das entwickelte Messsystem ist geeignet, Aussagen über die auftretenden Eigenfrequenzen zu treffen. Durch eine Langzeitüberwachung sollen Veränderungen dieser Parameter verfolgt, und damit Änderungen an der Tragstruktur der Windenergieanlage sichtbar gemacht werden.

4.3.17. Entwicklung eines Hydroakustik-Messkonzepts zum Verfolgen bewegter Objekte im Wasser (am Beispiel Fisch)

Masterarbeit von Regina Scharl
Betreuung: Dr. rer. nat. Katja Pinkert; Stefan Schäfer, M.Sc. (Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft)

Die Gewinnung elektrischer Energie mittels Wasserkraftanlagen ist, vor allem in Bergregionen, ökonomisch und ökologisch wertvoll. Ein stetes Problem beim Betreiben der Anlagen stellen dabei jedoch die im Fluss geführten, bewegten Objekte, wie z. B. Fische, Hölzer oder grobe Verunreinigungen dar. Diese müssen vor dem Durchlauf des Wassers durch die Turbinen entfernt werden. Eine besondere Schwierigkeit zur Gewährleistung eines nachhaltigen Betriebs von Wasserkraftanlagen entsteht bei der Wanderung von Fischen flussaufwärts. Fischtreppen helfen, die Aufgabe zu erfüllen, jedoch ist deren Wirkung in Abhängigkeit von Fischart, Fischalter, Bauweise der Treppe und auftretenden Strömungen an der Anlage stark variierend.

Ein Verfolgen der bewegten Objekte, z. B. der Fische während der Wanderung, bietet die Möglichkeit, durch einen angepassten Strömungsverlauf an der Anlage die Wirkung, z. B. von Fischtreppen, zu beobachten und zu verbessern. Zum Verfolgen der Bewegung ist derzeit die Platzierung von Markierungen (engl. tags) einzelner Fische notwendig. Die Marken liefern entsprechende Daten zur Aufzeichnung der Bewegung, erfordern allerdings einen für die Fische belastenden Eingriff. Die Hydroakustik ist ein bekanntes Verfahren zur Ortung von Gegenständen unter Wasser. Ultraschallwellen werden von einem Sender emittiert und an den zu ortenden Objekten teilweise reflektiert, sowie vom Empfänger detektiert. Durch den Einsatz von Hydrophonen ist das Senden und Empfangen von Ultraschallsignalen möglich. Die gleichzeitige Detektion einer Vielzahl verschiedener Objekte und deren Verfolgen durch kontinuierliche Aufnahmen in Zeitintervallen ist somit ohne Besenderung der Fische möglich. Kann ein Einfluss der Ultraschallwellen auf die Bewegung der Fische ausgeschlossen werden, ist diese Methode zum Verfolgen der Bewegung geeignet. Somit kann in Abhängigkeit eingestellter Strömungen an der Anlage die Bewegung der Fische untersucht und die Wirkung von Fischtreppen verbessert werden. Die Anordnung mehrere Hydrophone zur Ortung von Fischen ist eine Pionierarbeit auf dem Gebiet der hydroakustischen Messtechnik.

5. Veranstaltungen

5.1. 2016 AAAS Annual Meeting

Professor Große referiert beim Jahrestreffen der American Association for the Advancement of Science

Prof. Große am 13.2.16, 8:00-9:30 AM, Harding, Marriott Wardman Park (Fotos: Patrick Regan,TUM)

Das Jahrestreffen der weltweit größten wissenschaftlichen Gesellschaft fand vom 11.-15. Februar 2016 in Washington, DC, statt. Die AAAS ist auch Herausgeber der sehr renommierten Zeitschrift *Science* und stellte ihre diesjährige Jahresversammlung unter das Thema *Global Science Engagement.* Dem Austausch von Wissenschaftlern und Ingenieuren, die den großen Herausforderungen gemeinsam entgegengehen wird hier eine Plattform geboten. Herr Große hatte die besondere Gelegenheit im Rahmen des Symposiums "Engineering, Industry, and Technology" im Themenbereich *Smart Materials for Sustainable Infrastructure: Self-Healing Concrete and Asphalt* seinen Vortrag "Sensing and Monitoring of Structures" zu halten und das Themengebiet mit den interessierten Fachleuten zu diskutieren.

5.2. BETON – Neue Konzepte

Baustoffseminar des cbm in der 13. Runde

Nun schon zum 13. Mal veranstaltete das cbm mit Unterstützung des Fördervereins Baustoff-Forschung e.V. sein inzwischen in zweijährigem Rhythmus stattfindendes Baustoffseminar. Dieses Mal stand der Beton im Vordergrund und über 120 Teilnehmende konnten sich über die aktuellen Entwicklungen und wissenschaftlichen Erkenntnisse aus den Bereichen Bindemittel, klinkerarme Betone, additive Fertigungsverfahren und neue Performance informieren lassen.

Nachdem Professor Detlef Heinz (cbm) um 10:00 Uhr die Gäste auf Schloss Blutenburg in München-Obermenzing willkommen geheißen hatte, wurde die Tagung mit dem Referat „Calciumsulfoaluminat-haltige Zemente“ von Dr. Liudvikas Urbonas vom cbm eröffnet und durch Professor Heinz mit den Ausführungen zu „Bindung durch gezielte Carbonatisierung“ fortgeführt. Während der darauf folgenden Kaffeepause erlebte man bereits ein interessiertes Diskutieren und startete gemeinsam in den zweiten Teil der Veranstaltung mit Dr. Robin Beddoes (cbm) Vortrag „Klinkerarme Betone: Entwicklungsziele und Konzepte“. Den Vormittag beschloss Professor Albrecht Wolter von der TU Clausthal, der die „Betonbauweise mit verminderter CO_2-Last“ vorstellte.

R. Beddoe (li) und D. Heinz (Foto: K.-H. Kreft)

Fotoreihe von links nach rechts: T. Kränkel, K. Linz, K. Osterminski, R. Springenschmid, J. Skarabis, D. Heinz, A. Wolter
(alle Fotos: K.-H. Kreft (cbm)

Die dann folgende eineinhalbstündige Mittagessenspause nutzten die Zuhörer nicht nur, um sich an dem besonders gelungenen Büffet zu laben, sie fanden sich auch zu kleinen Gruppen an den Stehtischen zusammen, um die neuesten Entwicklungen in der Betonherstellung und Betonnutzung angeregt zu diskutieren.

Bild links (v.l.n.r.): O. Sawodny, D. Weger

Bild rechts (v.l.n.r.): J. Skarabis, C. Gehlen, R. Beddoe, D. Heinz, D. Weger, O. Sawodny, C. Große, L. Urbonas, F. Malm, A. Wolter

Da passte es gut, dass gleich nach dem Mittagessen Daniel Weger (cbm) zu dem unter Fachleuten sehr heiß diskutierten Thema „3D-Druck von Betonteilen“ berichtete. Ihm folgte Professor Oliver Sawodny, (Professur für Systemdynamik an der Universität Stuttgart) mit der „Automatisierten Herstellung funktional gradierter Betonteile“.

Mit genug Diskussionsstoff zu den beiden Herstellungsverfahren trafen sich die Teilnehmenden zur letzten Kaffeepause um dann noch sehr interessiert die beiden Vorträge „Lärmarmes Beton-Pflaster“ von Jens Skarabis (cbm) und „Selbstheilender Beton“ von Fabian Malm (cbm) zu verfolgen.

Mit einem ermunternden Schlusswort, den Neuerungen bei der Betonentwicklung mit Interesse und Neugier zu begegnen verabschiedete Professor Christoph Gehlen das Publikum und bedankte sich bei den Referenten, den aufmerksamen Zuhörern, dem Organisationsteam und den Mitarbeitern von Schloss Blutenburg für einen gelungenen Wissenschaftstag.

Die Folien zu den Vorträgen finden Sie auf unserer cbm-Homepage unter https://www.cbm.bgu.tum.de/index.php?id=403.

5.3. Betriebsexkursion am 27.09.2016

Zementwerk Rohrdorf
Planung und Durchführung: Elke Ziehensack, Matthias Wagner

Viele Mitarbeitende des cbm haben einen direkten Bezug zur Zementherstellung, sei es aufgrund ihrer Ausbildung oder weil sie in Forschung und Materialprüfung am Institut tätig sind. Daher war es besonders erfreulich, dass sich im Rahmen der diesjährigen Betriebsexkursion die Möglichkeit ergab, das Zementwerk Rohrdorf, das nach Angaben der Rohrdorfer Gruppe hohe Standards in Umweltverträglichkeit und Energieeffizienz erfüllt, besichtigen zu können.

Abbildung 1: Südbayerisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH

Ab 07:15 Uhr konnten sich die Teilnehmenden im cbm bei einem Frühstück stärken, bevor um 08:00 Uhr etwa 60 interessierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Bus Richtung Rosenheim aufbrachen. Kein Stau und keine Kehrmaschine konnte die Exkursion davon abhalten, pünktlich von Herrn Dr. Roppelt vom Zementwerk Rohrdorf begrüßt zu werden.

Abbildung 2: Dr. Theo Roppelt vom Zementwerk Rohrdorf führt durch das Werk. (Abbildungen 2-4: M. Hobusch, cbm)

Zunächst wurde der komplexe Aufbau des Zementwerks ausführlich an einem Schaubild erläutert, bevor die Exkursionsteilnehmenden in vier Gruppen aufgeteilt zu einer etwa zweistündigen Führung aufbrachen. Erste Station war das werkeigene Baustofflabor, für viele cbm-ler ein vertrautes Bild. Anschließend ging es am Brennstoffbunker vorbei zu einer Dampfturbine, welche aus der Abgas-Abwärme des Drehrohrofens Strom erzeugt. Anschließend konnte sich nach Besichtigung der Rohmaterialmahlanlage ein Überblick über das gesamte Werksgelände und Steinbruch verschafft werden, indem eine 75 m hohe Plattform erklettert wurde. Herr Dr. Roppelt und seine Kolleginnen und Kollegen verstanden es dabei hervorragend, auf alle aufkommenden Fragen einzugehen. Die Exkursion möchte sich an dieser Stelle ganz herzlich für die Führung und die freundliche Aufnahme beim Zementwerk Rohrdorf bedanken.

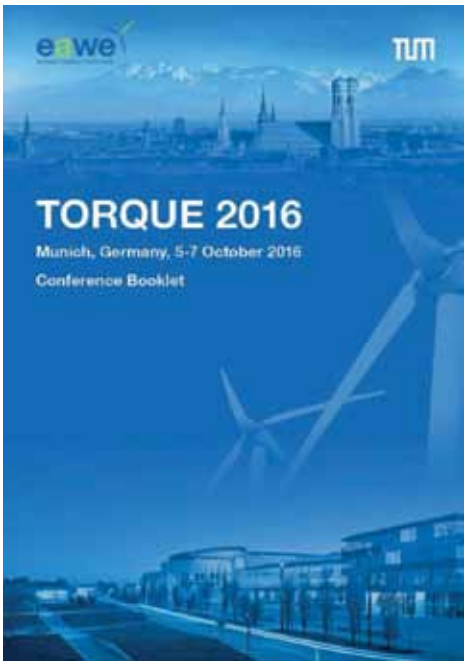
Abbildung 3: Fortschritte in der Energieeffizienz waren ein Schwerpunkt der Betriebsexkursion.

Abbildung 4: Die Abmessungen mancher Maschinen brachten zum Staunen.

Im Anschluss an den Besuch des Zementwerks gab es bei einem reichlichen Mittagessen im nahe gelegenen Happing bei Rosenheim die Möglichkeit, das Erlebte Revue passieren zu lassen. Zum Abschluss der Betriebsexkursion waren die Teilnehmenden um 15:00 Uhr zu einer Stadtführung in Wasserburg am Inn verabredet. Drei erfrischend motivierte Stadtführerinnen brachten uns in etwa eineinhalb Stunden die Besonderheiten dieses fast vollständig vom Inn umflossenen ehemaligen Handelszentrums näher. Auch die verwinkelten Engstellen des Wasserburger Straßennetzes konnten den Exkursionsbus nicht aufhalten, am späten Nachmittag wieder Richtung München aufzubrechen. Gegen 18:00 Uhr erreichte die ganze Mannschaft wieder das cbm.

Unser Dank gilt dem Förderverein Baustoff-Forschung e.V., der die Durchführung der Exkursion unterstützte.

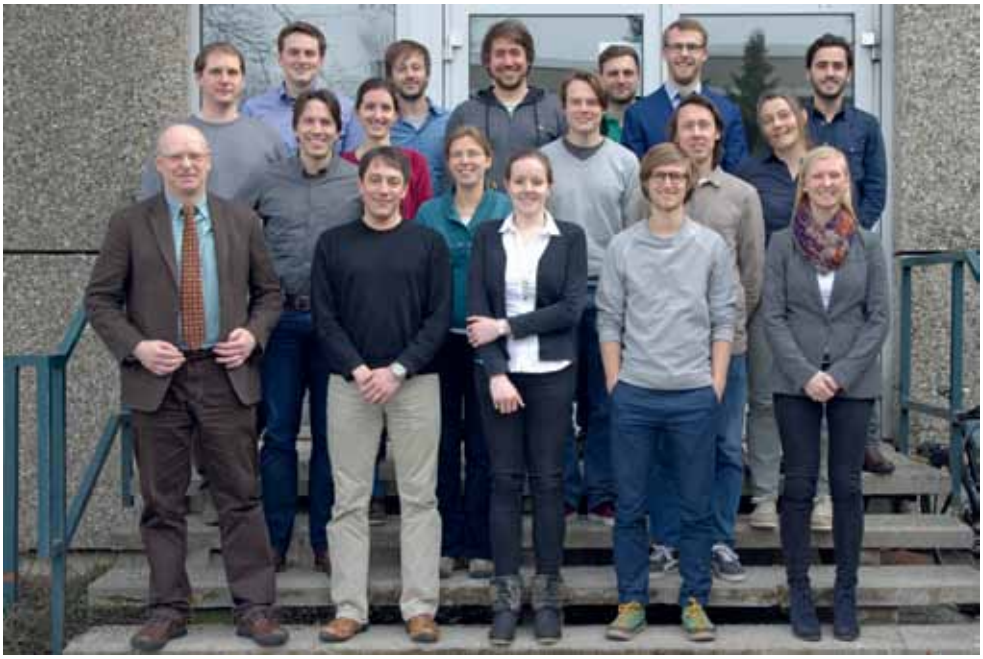
5.4. TORQUE Konferenz München



Vom 5. Bis 7. Oktober 2016 fand die internationale Konferenz “The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2016)” zum ersten Mal in München, auf dem Forschungscampus Garching der TUM statt. Mit 10 Sessions, 142 Vorträgen und 167 Postern ist sie eine der größten Konferenzen zum Thema Windenergie. Die Konferenz wurde im Jahr 2016 von Professor Bottasso (TUM) und seinem Lehrstuhl für Windenergie unter der Schirmherrschaft der European Academy of Wind Energy (EAWE) organisiert. Weitere Professoren der TUM, unter anderem Professor Große, waren Teil des Organisationskomitees. Neben Herrn Große nahmen weitere Mitarbeiter des Lehrstuhls für Zerstörungsfreie Prüfung, Dipl.-Ing. Bernhard Wondra und Max Botz, M.Sc., an der Konferenz teil und präsentierten erste Ergebnisse aus dem MISTRALWIND-Projekt zum Thema Wireless-Monitoring der Tragstruktur von Windkraftanlagen.

5.5. Tag des Lehrstuhls für Zerstörungsfreie Prüfung

Bild: Tag des Lehrstuhls am 03.03.2016



Gleich zwei Mal veranstaltete der Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung in diesem Jahr einen „Tag des Lehrstuhls“. Es informierten sich Doktoranden und Studierende gegenseitig über laufende Projekte und Ergebnisse aus Abschlussarbeiten. Zu den eingeladenen cbm-Mitarbeitern, Masteranden und Hiwis, sowie externen Doktoranden und Studierenden im Menteeprogramm der Munich School of Engineering, die von Prof. Große betreut werden, gesellten sich im November zusätzlich sieben Gäste der Shenzhen Universität. Jeweils verfolgten bis zu 40 Personen zunächst die Präsentationen aus den einzelnen Projektbereichen und nutzten anschließend die Gelegenheit, sich die Einrichtungen und ZfP-Geräte des Lehrstuhls anzusehen. Die Veranstaltung wurde durch ein Buffet ergänzt, was Möglichkeiten zur vertieften Diskussion über die Projekte und zur Vernetzung bot.

Bild: Tag des Lehrstuhls am 24.11.2016

6. Ehrungen

6.1. Ausgezeichnetes Projekt der Werkstoffforschung

BMBF zeichnet UHPC-Forschung aus (Nachtrag aus 2015)

Die wichtigste deutschsprachige Konferenz für Förderakteure in den Material- und Werkstoffwissenschaften fand im April 2015 in Dresden statt: „i-WING 2015 – Vom Material zur Innovation“. Im Rahmen dieser Veranstaltung wurde das cbm der TUM für die gemeinsam mit der Firma BAUER Spezialtiefbau GmbH entwickelten Bohrspitzen aus ultrahochfestem Beton gewürdigt. Dabei wurde das wissenschaftliche Projekt als ein gesellschaftlich hoch relevantes Beispiel für "werkstoffbasierte Innovation" geehrt. Besonders hingewiesen wurde darauf, wie "neue Materialien und Werkstoffe die Basis für zukunftsweisende Produkte sein können, die dabei helfen, Kosten und Rohstoffe einzusparen".

URKUNDE

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung vergibt im Rahmen der Konferenz „i-WING 2015“ die Ehrung

„Ausgezeichnetes Projekt der Werkstoffforschung“

an Spezialtiefbau – Erforschung des Nanowerkstoffs UHPC für die Anwendung im Spezialtiefbau unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Aspekte

und die Partner

Bauer Spezialtiefbau GmbH
Technische Universität München

Prof. Dr. Johanna Wanka
Bundesministerin für Bildung und Forschung

Materials and Structures

Materials and Structures

04 November 2016

Congratulations
on the Outstanding Paper 2016 Award

for the paper
"Ingress of NaCl in concrete with alkali reactive aggregate: effect on silicon solubility"

On behalf of the Board of Editors of Materials and Structures

Pietro Lura
Editor in Chief
Materials and Structures

6.2. Outstanding Paper Award

Ehrung für die Arbeitsgruppe "Bindemittel und Zusatzstoffe"

Dr. Anne Heisig erhält für ihren Beitrag „Ingress of NaCl in concrete with alkali reactive aggregate: effect on silicon solubility“ den *Outstanding Paper 2016 Award* des Herausgeberrates der "Materials and Structures" (Springer Verlag). Den Beitrag finden Sie unter "Ausgewählte Veröffentlichungen" (Kapitel 11).

7. Berichte aus den Arbeitsgruppen

7.1. Arbeitsgruppenschwerpunkte

7.1.1. AG 1 Bindemittel und Zusatzstoffe

Aus ökologischer und ökonomischer Sicht gewinnt die Entwicklung dauerhafter, nachhaltiger und umweltverträglicher Baustoffe immer mehr an Bedeutung. Ein zentraler Aufgabenbereich der AG1 stellt daher die Untersuchung der Eigenschaften von puzzolanischen und latent-hydraulischen Bindemitteln im Austausch gegen Portlandzement dar. Insbesondere wird hier an Dauerhaftigkeitsaspekten solcher Bindemittel und ihrer Reaktionsprodukte, wie sie sich beispielsweise auf einen Sulfatangriff oder eine schädigende Alkali-Kieselsäure Reaktion auswirken, geforscht. Des Weiteren stehen alternative Bindemittel im Fokus der Arbeiten, z. B. der Einsatz von überkritischem CO_2 zur Entwicklung alternativer Herstellungsprozesse zementgebundener Werkstoffe oder auch die Herstellung CO_2-reduzierter Zementklinker.

Im Jahr 2016 musste sich die AG1 aus durchaus positiven familiären Gründen von Michael Blendowski verabschieden, der unser Labor und München in Richtung Münsterland verließ. Wir konnten uns allerdings auch wieder personell verstärken: zum einen durch Tatjana Frey, die sich im Anschluss an ihre Lehrzeit am cbm nun in unserem Labor einbringt; zum anderen durch Matthias Wagner, M. Sc. der sich als wissenschaftlicher Mitarbeiter vor allem mit der Thematik des Sulfatangriffs beschäftigt. Herr Wagner konnte sich im Herbst 2016 auch gleich bei der Organisation des Betriebsausfluges zum Rohrdorfer Zementwerk und zur historischen Stadtbesichtigung in Wasserburg am Inn einbringen.

Der Gerätepark der AG1 wurde um ein neues Quecksilberdruckporosimeter erweitert. Zudem wurde, zusammen mit der AG5, ein Stereomikroskop installiert, das zur mikroskopischen Charakterisierung von Betonbruchstücken als auch Anschliffen sowie Asphalt-

Abbildung: Quecksilberdruckporosimeter (links) und Stereomikroskop (rechts)

untersuchungen vorgesehen ist. Mit Hilfe dieses neuen Mikroskops können tiefenscharfe, 3-dimensionale Bilder erzeugt werden. In der AG1 soll es vor allem zur schnellen Identifizierung von geschädigten Betonen und Lokalisierung von schädigenden Reaktionsprodukten (z. B. Ettringit oder Alkali-Kieselsäure-Gel) herangezogen werden.

Auch im Jahr 2016 wurden wieder zahlreiche Forschungsvorhaben zu den verschiedenen Schwerpunktthemen der Arbeitsgruppe bearbeitet. Im Bereich der Dauerhaftigkeit zementgebundener Baustoffe werden momentan vor allem Projekte zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) und zum Sulfatwiderstand bearbeitet. Das Thema AKR wird in verschiedenen Projekten und Langzeitstudien behandelt. Der Einfluss von Betonzusatzstoffen, insbesondere Steinkohlenflugasche (SFA), auf eine schädigende AKR in Beton sowie ein Tausalzeintrag, der die AKR Schäden v.a. bei Straßenbetonen verschärft, ist dabei ein zentraler Aspekt. Grundlegende Untersuchungen zu den Langzeitwirkungen von SFA in Betonen auf den Sulfatwiderstand sowie auf eine schädigende AKR, sowohl mit als auch ohne Tausalzeintrag, wurden fortgesetzt. Die Mechanismen der AKR beim Eintrag von Tausalz in Betone verschiedener Bindemittelzusammensetzungen werden in einem laufenden DFG-Projekt weiter geklärt werden. Ein weiteres von der AiF gefördertes Projekt zum Thema AKR-Prüfverfahren für Betone der Feuchtigkeitsklasse WS ist neu angelaufen.

Zur Thematik Sulfatwiderstand von zementhaltigen Bindemitteln wurde ein weiteres DFG-Projekt bewilligt. Hierbei geht es um den Einfluss von verschiedenen aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Expansionsspannung eines Mörtels beim externen Sulfatangriff. Mit Hinblick auf die Weiterentwicklung von Prüfverfahren des Sulfatwiderstands wird dabei auch betrachtet, inwiefern verschiedene Sulfatkonzentrationen der angreifenden Lösungen einen mechanistischen Einfluss ausüben. Die Untersuchungen werden von thermodynamischen Modellierungen begleitet.

In einem laufenden DFG-Projekt (in Kooperation mit der AG4) wird die Rolle des Aluminiums in aluminiumhaltigen C-S-H-Phasen (sogenanntes C-A-S-H) bei verschiedenen chemischen Angriffen (wie z. B. Chlorid-, Sulfat- oder Säureangriff sowie Carbonatisierung) auf Beton untersucht.

Abgeschlossen wurde ein ebenfalls DFG-gefördertes Forschungsprojekt zu den Mechanismen und Wirkungen einer gezielten Carbonatisierung von Zementstein und –mörtel unterschiedlicher Zusammensetzung unter erhöhtem Druck. Ein neues, von der VGB unterstütztes, Projekt behandelt die Herstellung und die Untersuchung der Eigenschaften von Belit-Sulfoaluminatklinker aus Stein- und Braunkohleflugaschen.

Die Bereiche der Materialprüfung, die die Arbeitsgruppe 1 bearbeitet, sind eng mit der Forschung verknüpft. Neben der Klärung von Schadensursachen an Betonen werden auch Lösungen zu anwendungstechnischen Problemen bei Baustoffen gesucht. Insbesondere die Prüfung der Alkalireaktivität von Gesteinen und die Beurteilung der AKR-Empfindlichkeit von Betonen unter den Einwirkungen WS (feucht + Alkalien von außen + dynamische Belastung) hat einen großen Anteil in der Materialprüfung. Zudem führt die AG1 einen großen Teil der Analytik anderer Arbeitsgruppen durch (z. B. Porositätsbestimmungen mittels Hg-Druckporosimeter, Phasenanalytik mittels Röntgendiffraktometrie, u.v.a.m.).

Die Mitarbeiter der Arbeitsgruppe veröffentlichten ihre Forschungsergebnisse im Rahmen von nationalen und internationalen Tagungen (z. B. International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Sao Paulo, Brasilien; International Conference on the Chemistry of

Construction Materials in München, International Conference on Silicate Materials "Balt-Silica in Kaunas, Litauen, PhD Symposium in Bochum) sowie in namenhaften Zeitschriften (z. B. Cement and Concrete Research, Construction and Building Materials, Materials and Structures).

Auch in der Lehre werden sowohl die Grundlagen der hier angesiedelten Forschungsgebiete als auch die in den aktuellen Forschungsarbeiten entstandenen Ergebnisse den Studierenden vermittelt. Zum einen wird in Vorlesungen den angehenden Bauingenieuren die Theorie gelehrt, zum anderen können die StudentInnen aktiv in Forschungsprojekten als studentische Hilfskräfte oder an ihren Seminar-, Bachelor- oder Masterarbeiten mitarbeiten.

7.1.2. AG 2 Betontechnologie

Beton ist nach wie vor einer der bedeutendsten Baustoffe unserer Zeit. Eine zunehmende Erweiterung des Einsatzspektrums stellt immer neue Anforderungen an den Baustoff. Diese Aspekte spiegeln sich in der aktuellen Forschungs- und Materialprüfungstätigkeit der Arbeitsgruppe Betontechnologie wieder.

Im Bereich der Forschung liegt derzeit der Fokus auf den Themengebieten
- Additive Fertigung („3D-Drucken“) von Betonbauteilen
- Mechanismen der Carbonatisierung von Beton,
- Lebensdauerbemessung von Verbundankern sowie
- Verarbeitung und Qualitätskontrolle von Tiefbaubetonen auf Basis rheologischer Messungen.

Ein aktuelles Forschungsthema stellt die Robustheit Leichtverarbeitbarer Betone dar. Ziel ist es, Empfehlungen zur bedarfsgerechten Verdichtung der LVB zu entwickeln. Ein wesentlicher Punkt stellt dabei die Übertragung praxisüblicher Verdichtungsszenarien in das Labor dar. Nur so kann mittels Laborversuchen ein Verdichtungskonzept für die Leichtverarbeitbaren Betone entwickelt werden, welches anschließend auch wieder in die Baupraxis (Baustelle) transferiert werden kann. Zu diesem Zweck wird gemeinsam mit der Firma Wacker-Neuson ein Laborverdichtungsverfahren entwickelt, wobei Amplitude, Frequenz und Dauer der Verdichtung auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden.

Aufgrund der besonderen Bedeutung widmet sich die AG Betontechnologie zudem schwerpunktmäßig der Thematik des Betonstraßenbaus. Hier werden derzeit insbesondere die Lärmminderungseigenschaften verschiedener Oberflächentexturen sowie deren Dauerhaftigkeit betrachtet.

Abbildung: Grindingwelle und Grindingtextur

Ein weiteres Forschungsvorhaben befasst sich mit der Dauerhaftigkeit lärmtechnisch optimierter Grinding- und Groovingtexturen. Im Projekt „GROOVE“ welches gemeinsam mit der Austrian Institute of Technology GmbH (AIT) und der PMS Consult GmbH bearbeitet wird, werden Geometrie und Ausführung von Grinding und Grooving von Betonfahrbahndecken untersucht und optimiert. Ziel ist die Festlegung einer optimierten Geometrie sowie die Untersuchung der Dauerhaftigkeit hinsichtlich Lärm, Griffigkeit, Ebenheit und Entwässerung. Eine Lebenszyklusanalyse und Funktionen zur Integration in das Pavement Management System betrachten die wirtschaftliche Seite der Maßnahmen. Somit soll ein sowohl technisch als auch wirtschaftlich optimierter Einsatz der Grinding- und Groovingmaßnahmen ermöglicht werden.

7.1.3. AG 3 Stahl und Korrosion

Der Werkstoff Stahl und dessen maßgebende Schädigungsmechanismen Korrosion und Ermüdung sind die Forschungsschwerpunkte der Arbeitsgruppe. Neben den reinen experimentellen und numerischen Untersuchungen der aktuellen Forschungsfragen steht im besonderen Fokus die probabilistische Zustandsbeschreibung und Lebensdauerprognose von Bewehrungskorrosion in Stahlbetonbauwerken. Dies spiegelt sich in den im Jahr 2016 erfolgreich abgeschlossenen Dissertationen der Arbeitsgruppe. Herr Rahimi promovierte über das Thema „Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung“ und Herr Zintel „Zur quantitativen Bewertung des Korrosionsschutzpotentials epoxidharzbeschichteter Bewehrung“.

Aktuelle Forschungsarbeiten untersuchen das Korrosionsverhalten von Stahl in Beton bei Anwendung des Instandsetzungsprinzips W-Cl in gerissenem Beton. Anhand von Bauwerksmonitoring in gerissenen Stahlbeton an Referenzbauwerken wird überprüft, unter welchen Randbedingungen das Instandsetzungsprinzip W-Cl erfolgreich und dauerhaft angewendet werden kann. Zusätzlich werden Diffusionspotentiale im porösen Beton untersucht, die im Rahmen von potentiometrischen Korrosionsmessungen als Störgröße miterfasst werden. Ziel ist es hierbei, ein Modell zu entwickeln, das die Größenordnung von Diffusionspotentialen abschätzen soll, damit die Größenordnung dieses Messfehlers bekannt ist.

Ein weiteres Forschungsprojekt hat die Detektionswahrscheinlichkeit von Bewehrungskorrosion in Stahlbeton auf Basis der Potentialfeldmessung zum Schwerpunkt. Mit Hilfe der sogenannten Probability of Detection Kurven wird in Abhängigkeit der dominanten Einflussfaktoren der Potentialfeldmessung die Leistungsfähigkeit der Korrosionsdetektion beschrieben. Zusätzlich bieten die Probability of Detection Kurven das Potential, die Ergebnisse der Potentialfeldmessung für das Updaten der probabilistischen Lebensdauerprognose nutzbar zu machen, was an ausgewählten Referenzbauwerken demonstriert wird.
Auch im Jahr 2016 durften wir wieder internationale Gäste in unserer Arbeitsgruppe begrüßen. Von 10/2015 bis 04/2016 forschte Herr Cao Yin vom CBMA, China Building Materials Academy, über die Grundlagen der Dauerhaftigkeitsmodellierung von Stahlbeton unter kombinierten Einwirkungen. Seit 10/2016 beschäftigt sich Frau Hilke Verbruggen vom SURF, Research Group Electrochemical and Surface Engineering, der Vrije Universiteit Brussel mit dem Thema selbstheilender Betonstahlbeschichtungen als Korrosionsschutz der Bewehrung.

Das Jahr 2016 stand für die Forschung im Gebiet der „Bewehrungstechnik“ im Fokus der Ermüdung von Werkstoffen. Insgesamt laufen derzeit zwei Vorhaben, die sich dem Thema

im Hinblick auf die dynamische Performance von Windenergieanlagen /-türmen beschäftigen. Dabei stehen jeweils unterschiedliche Aspekte im Fokus:

- Im Verbundprojekt MISTRALWIND, welches bereits im Jahr 2015 begonnen hat, werden Materialmodelle aller in Spannbetontürmen von Onshore-Windenergieanlagen beteiligten Werkstoffe in Ansatz gebracht, um eine Live-Restlebensdauerermittlung zu ermöglichen. Neben den klassischen Wöhlerlinien für Betonstahl, Spannstahl und Stahl von Ankerstangen werden die Beton- und Verbundermüdung über geeignete Modellierungsansätze berücksichtigt. Das Vorhaben wird seitens TUM in enger Zusammenarbeit mit den Lehrstühlen Statik und Zerstörungsfreie Prüfung bearbeitet.

- Das Verbundprojekt WinConFat beschäftigt sich mit der Quantifizierung windenergieanlagenspezifischer Fragestellungen zur Betonstahlermüdung. Dazu gehören das hochzyklische Ermüdungsverhalten bei niedrigen Schwingweiten (Ermüdung im sogenannten very-high-cycle-fatigue - VHCF Bereich), die Einflüsse aus der Beprobung nach dem Lastregime der gültigen Normung sowie die Quantifizierung der gesamten dynamischen Leistungsfähigkeit des Betonstahls mit und ohne Korrosion. Motivation ist hierbei die hochzyklische Belastung, die Betonstähle in Windenergieanlagen erfahren, sowie deren Performance, die in Teilbereichen über den Wissenstand der Normung hinausgeht. Der Verbund für das Vorhaben besteht aus renommierten Baustoff- und Massivbaulehrstühlen Deutscher Universitäten, welche sich darin mit der Ermüdung des Betons und des Verbunds beschäftigen.

Im Rahmen eines laufenden AiF-Forschungsvorhabens wurden maßgebende Fortschritte erreicht, die den Wissenstand über glasfaserbewehrte Kunststoffspannglieder erweitern. Zum Ende des Jahres haben die Arbeiten zu den Dauerstandeigenschaften unter hochalkalischer Exposition begonnen. Weitere Themen, die auf Erkenntnisse vergangener Forschungsprojekte und Abschlussarbeiten der Projektgruppe Bewehrungstechnik aufbauen, sind in Beantragung.

Der Bereich der Materialprüfung wurde auch im Jahr 2016 durch erhebliche Investitionen, aber auch durch das hohe Engagement der Mitarbeiter weiter ausgebaut. Die Möglichkeiten des Prüflabors wurden z. B. durch die Anschaffung eines weiteren optischen Rippenmessgerätes der Fa. ECM Datensysteme GmbH in der Weise erweitert, dass nun die Oberflächengeometrie (Schrägrippen, Gewinderippen und Profilierungen) von Betonstählen bis zu einem Nenndurchmesser von 63,5 mm in einem halbautomatischen Verfahren vermessen werden können. Damit wird insbesondere für Betonstähle mit großen Nenndurchmessern die Qualität und Reproduzierbarkeit bei der Vermessung der Oberflächengeometrie signifikant verbessert. Eine wesentliche Verbesserung der internen Abläufe konnte auch durch die Weiterentwicklung

Abbildung: Chalybsos - abgeleitet aus dem lateinischen Wortstamm „chalybs“ = Stahl

des Datenbanksystems „Shanti“ erreicht werden. Mit dieser Software wird in den Arbeitsbereichen „Weiterverarbeiter von Betonstahl in Ringen“ und „Betonstahlhersteller“ inzwischen der gesamte Prozess vom Audit beim Kunden und dem entsprechenden Probeneingang bis zum abschließenden Überwachungs- und Untersuchungsbericht abgebildet.

„At last but not at least” sei an dieser Stelle auch noch ein „neuer Mitarbeiter“ vorgestellt. Die Arbeitsgruppe wird seit Kurzem von dem komplett aus Betonstahl bestehenden Drachen „Chalybsos“ „angespornt“.

7.1.4. AG 4 Chemie

Abbildung 1 (linke Seite) und 2 (rechte Seite): nach dem Laborumbau, Gebäude 2604, Raum 224

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.

Im Mittelpunkt stand in diesem Jahr der Umbau eines großen Bereiches des Labors. Aufgrund der nicht mehr zeitgemäßen Lüftungssituation war es nötig mehrere Abzüge zu ersetzen. Diese Gelegenheit wurde genutzt, auch Teile der Einrichtung zu erneuern und den Bereich den im Laufe der Jahre gewachsenen Anforderungen anzupassen. Der Routinebetrieb konnte in den verbleibenden Räumen unter deutlich beengten Bedingungen aufrechterhalten werden. Das Durchhaltevermögen der Labormitarbeiter wurde nach der Fertigstellung mit deutlich verbesserten Arbeitsbedingungen belohnt. Es konnten nahezu alle Wünsche erfüllt werden.

Mit dem Erwerb einer neuen Ionenchromatographie-Anlage konnte nun auch wieder die Seite der Anionenanalytik optimiert werden. Schon in den ersten Messungen zeigten sich

nicht nur ein besseres Trennvermögen, sondern auch deutlich niedrigere Bestimmungsgrenzen im Vergleich zum ohnehin irreparablen Vorgänger.

Nach einer kürzeren Pause konnte zum 1. Oktober wieder ein wissenschaftlicher Mitarbeiter für die Arbeitsgruppe gewonnen werden. Marco Decker studierte am Chemiedepartment der TU Chemie und schloss im Juli 2016 seinen Master beim Wacker-Silikon-Lehrstuhl mit der Masterarbeit mit dem Thema „Site selective functionalization of silicon nanocrystals“ ab. Sein Arbeitsschwerpunkt am cbm wird die weitergehende Optimierung der LA-ICP-MS sein. Entsprechend dem jährlichen Rhythmus hat uns der angehende Chemielaborant Matthias Heinzl nach Abschluss seines ersten Ausbildungsjahres im September

Richtung Chemiedepartment in Garching verlassen. An seiner Stelle begann nun Caroline Herzinger ihre Ausbildung bei uns. Auch in diesem Jahr nutzten wieder eine größere Anzahl Schüler bzw. Ausbildungsanwärter ein einwöchiges Praktikum im Rahmen der Berufsvorbereitung bei uns, um Einblick in den Betrieb eines Chemielabors und den damit verbundenen Aufgaben des Chemielaboranten zu erhalten.

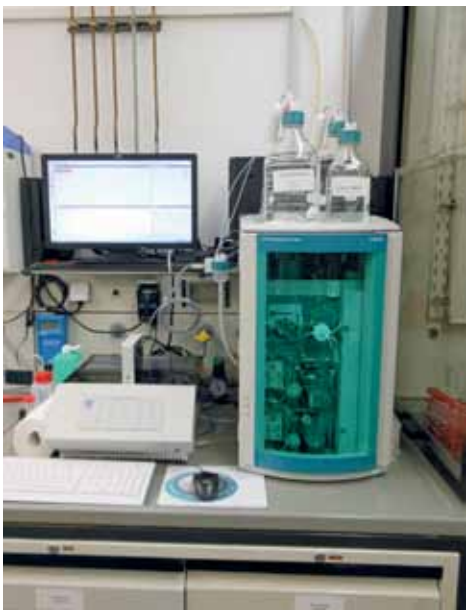


Abbildung 3: Ionenchromatograph

Neben dem aktuellen Forschungsprojekt über die Rolle des Aluminiums in C-A-S-H bei chemischem Angriff auf Beton und den zahlreichen Aufgaben aus Forschungsprojekten der anderen Arbeitsgruppen beschäftigten wir uns in diesem Jahr mit dem Thema Analyse der organischen Bestandteile in Festbeton. Die Ergebnisse der Bachelorarbeit von Vlad Mihuta zu diesem Thema sind im cbm-Kurzbericht 38 zusammengefasst.

Die Lehre umfasste im Sommersemester wieder den Teil der chemischen Analytik des Praktikums „Analytik und Prüftechnik“ für die Baustoffingenieurvertiefer bzw. Masterstudenten. Nach der Neuorganisation der Veranstaltung konnte nun auch die Prüfungsordnung geändert werden. Die Studierenden müssen jetzt keine Klausur mehr schreiben, sondern ihr erlerntes Wissen anhand zu lösender Fallbeispiele aus der Praxis unter Beweis stellen. Das hohe Engagement der Gruppen und die sehr guten Lösungsansätze übertrafen unsere Erwartungen. Im Wintersemester wurde wieder parallel zur Vorlesung „Bauchemie“ (Teil der Baustoffkundevorlesung des Studiengangs „Bachelor Bauingenieurwesen“) die freiwillige Veranstaltung „Grundlagen Chemie für Bauingenieure“ angeboten, was auch wieder rege angenommen wurde. Beim Bauingenieur-Praktikum „Werkstoffe im Bauwesen“ im Sommersemester hatten wir wieder die Aufgabe, das Thema Kunststoffe abzudecken.

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 über das MPA BAU der TU München als Zertifizierungsstelle nach DIN EN 17065 akkreditiert und durch das DIBt unter der Kennnummer 1211 im Rahmen der EU-Bauproduktenverordnung in Brüssel notifiziert.

In der Fachgruppe „Asphalt“ werden Kontrollprüfungen und Schiedsuntersuchungen an Asphaltmischgut und Bohrkernen sowie die Beurteilung von Schadensfällen durchgeführt. In dieser Fachgruppe werden auch Erstprüfungen an Asphalt erstellt. Darüber hinaus beschäftigt sich die Fachgruppe mit Asphalten für Sonderanwendungen, wie z. B. Wasserbauasphalten und mit der Überwachung von Sonderbaumaßnahmen. Die Erstellung von Erstprüfungen an Asphalt und Performance-Prüfungen an Asphalt (Widerstand gegen bleibende Verformungen, Steifigkeit, Widerstand gegen Ermüdung, Widerstand gegen Kälterissbildung) nehmen einen immer größeren Raum in der Prüftechnik der FG Asphalt ein.

Im abgelaufenen Jahr wurde die Fachgruppe Asphalt von der Wacker Chemie AG mit der Überwachung der Asphaltarbeiten im Zuge der Instandsetzung der Asphaltdichtung des Alzkanals bei Burgkirchen beauftragt. Die Asphaltarbeiten erstreckten sich über den Zeitraum von Juli bis Oktober und wurden vor Ort intensiv überwacht, die Untersuchung anfallender Proben erfolgte im Labor in Pasing. (Bilder 1 und 2)

Bild 1 (li.): Asphalteinbau mit Kanalfertiger

Bild 2 (re.): Horizontaleinbau von Asphaltmastix

In der Fachgruppe „Bitumen und Abdichtungen“ erfolgt die Prüfung von Bitumen, polymermodifizierten Bitumen und Bitumenemulsionen. Im Bereich der Abdichtungen werden Polymerbitumen-, 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“ wieder den absoluten Tätigkeitsschwerpunkt dar. Der Auftragsbestand konnte nur durch den verstärkten Einsatz der Mitarbeiter bewältigt werden. 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 überwiegend bayerischer Produktion. In dieser Fachgruppe werden zudem Eignungsprüfungen an Baustoffgemischen für Schichten mit hydraulischem Bindemittel durchgeführt.

Die AG 5 ist für Auftraggeber aus dem Bereich der Straßenbauverwaltung und der Industrie tätig. Die Fachgruppen nehmen regelmäßig an Ringversuchen auf nationaler und europäischer Ebene teil und erhalten sich dadurch Kompetenzen mit konventionellen Prüfungen und Prüfverfahren der neuesten Generation; nicht zuletzt hierdurch sichern sie sich hinsichtlich der sachgerechten Durchführung der Prüfungen ab. Die Ausbildung von wiederum drei BaustoffprüferInnen am Institut wird durch die AG 5 organisiert und maßgeblich abgewickelt.

7.1.6. AG 6 Zerstörungsfreie Prüfung

Die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) ist 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 gleicher Weise 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").

Die Aktivitäten der AG6 im Bereich Bauwesen werden durch die Forschungsvorhaben gefördert, die sich mit der Tragstruktur und Dauerhaftigkeit von Windenergieanlagen (Mistral-Wind), mit der Untersuchung selbstheilender Eigenschaften von Beton (Healcon) und mit scannenden Prüfverfahren für Betondecken von Fahrbahnen befassen. Nähere Informationen enthält der Abschnitt über unsere Forschungsvorhaben.

Intensiviert wurde zudem die Kooperation mit den Industriefirmen im Großraum München auf dem Gebiet der Prüfung und Qualitätssicherung von Faserverbundwerkstoffe. Diese Zusammenarbeit mit Firmen wie BMW, Airbus, Siemens, MTU und IABG geht mittlerweile deutlich über die Inhalte des Projektes MAIzfp (s. Forschungsvorhaben) hinaus.

7.2. Abgeschlossene Forschungsvorhaben

AG Bindemittel und Zusatzstoffe

7.2.1. Carbonatisierung von zementgebundenen Baustoffen mit CO_2 unter erhöhtem Druck oder im überkritischen Zustand (Fortsetzung)

Bearbeitung: Dr.-Ing. L. Urbonas
Förderer: DFG

In der zweiten Förderungsperiode wurden einige noch offene Fragen zur Entwicklung von Phasen, Festigkeit und Volumen während und nach der Beaufschlagung von Zementstein- und Mörtelproben mit überkritischem bzw. gasförmigen CO_2 behandelt. Dabei standen die Feinheit, die chemische und die mineralogische Zusammensetzung des verwendeten Portlandzements im Vordergrund der Untersuchungen. Weiterhin sollte geklärt werden, wie sich die Biegezugfestigkeit von carbonatisierten Leichtmörteln mit Glasfasern verbessern lässt. Hier sollte insbesondere auch die Kontaktzone zwischen den Glasfasern und der Zementsteinmatrix untersucht werden, um den Einfluss der Carbonatisierung auf das Verbundverhalten klären zu können.

Folgende Schlussfolgerungen sind aus den Untersuchungen zu ziehen:

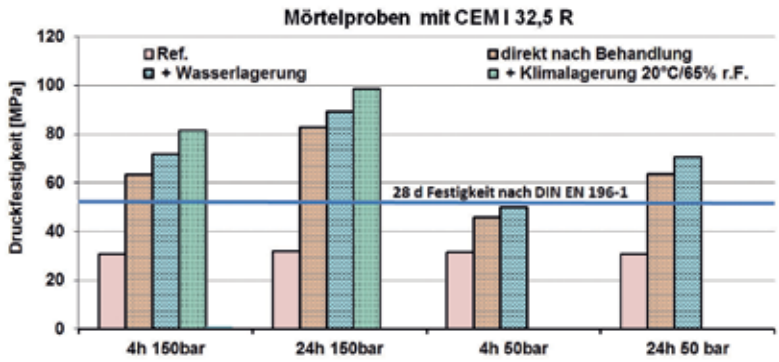


Abbildung 1: Druckfestigkeit der Mörtelproben mit Zement CEM I 32,5 R nach verschiedenen Behandlungen (+ Wasserlagerung und + Klimalagerung 20°C/65 % r.F. – Lagerung der Proben nach der Carbonatisierung bis zum Alter von 28 d)

- Mit zunehmender Zementsteinfeuchte und abnehmender Porosität nimmt die Carbonatisierungsgeschwindigkeit deutlich ab. Eine höhere Zementfeinheit (höhere Festigkeitsklasse) führt zu einem höheren Hydratationsgrad des Zementes während der Vorlagerung und damit zu einer geringeren Porosität des Zementsteins, was sich negativ auf die erzielbare Carbonatisierungstiefe bei gegebenen Behandlungsbedingungen auswirkt.

- Durch die CO_2-Behandlung konnten die Druckfestigkeit bei Mörtelproben auf bis zu ca. 270 % gesteigert werden. Die Druckfestigkeiten nahmen mit zunehmendem CO_2-Behandlungsdruck und zunehmender Dauer zu. Die Lagerung von carbonatisierten Proben in Wasser bei 20 °C oder an der Luft bei 20 °C und 65 % r.F., führte aufgrund der Hydratation von Klinkermineralrelikten, zu einer weiteren Zunahme der Druck- und Biegezugfestigkeiten. Die mit $scCO_2$ behandelten und anschließend bei 20 °C und 65 % r.F. gelagerten Proben mit alkalireichem CEM I 32,5 R erreichten im Alter von 28 d eine fast doppelt so hohe Druckfestigkeit wie die 28 d-Normfestigkeit (Abbildung 1).

Niedrigere C_3A- und Alkaligehalte zeigten einen positiven Einfluss auf die Festigkeitssteigerung während der Carbonatisierung. Eine höhere Festigkeitsklasse des verwendeten Zementes beeinflusste, aufgrund des dichteren Gefüges, den chemischen Umsatz und damit den Festigkeitszuwachs während der Carbonatisierung negativ. Die Biegezugfestigkeit von Mörtelproben mit Zementen der Festigkeitsklasse 32,5 wurde durch die Carbonatisierung nur geringfügig beeinflusst. Eine Ausnahme war der C_3A-arme Portlandzement, bei dem ein deutlicher Zuwachs erfolgte. Der Austausch des Quarzsandes durch Kalksteinbrechsand in den Mörtelproben verbesserte die Biegezugfestigkeiten nach der Carbonatisierung deutlich.

- Während der Carbonatisierung zeigten die Proben ein geringes Quellen, das mit zuneh-mender Behandlungsintensität (Druck und Dauer) zunahm. Die Längenzunahme resultiert aus dem Zusammenspiel von der Zunahme der Volumen der festen Phasen, z. B. durch Bildung von $CaCO_3$ aus Portlandit, und der Aufnahme von dem durch die Carbonatisierungsreaktion freigesetztem Wasser, dass sich in die Zwischenräume des Silikagels bzw. in die carbonatisierten CSH-Phasen einlagert und zum Quellen führt. Die Mörtelproben des C_3A-armen Zements dehnten sich weniger als die Proben mit anderen Zementen.

- Die Zementzusammensetzung beeinflusste die Gesamtporosität der Referenzproben nur geringfügig. Mit zunehmender Festigkeitsklasse der Zemente nahm die Porosität der Referenzproben erwartungsgemäß ab. Die Behandlung mit überkritischem oder gasförmigen CO_2 führte zu einer deutlichen Reduzierung der Porosität und einer Zunahme des Anteils an Gelporen (< 20 nm). Die Lagerung der carbonatisierten Proben in Wasser führte aufgrund einer weiteren Hydratation von Restklinker zu einer Reduzierung des Anteils der größeren Kapillarporen (> 40 µm).

- Durch die Carbonatisierung veränderte sich die Mineralphasenzusammensetzung des Zementsteins jeweils deutlich. Der Gehalt an C-S-H-Phasen (röntgenamorpher Anteil) nahm ab, die Hydratphase Ettringit wurde nicht mehr identifiziert. Die Gehalte an unreagierten Calciumsilikaten β C_2S und C_3S nahmen ebenfalls deutlich ab. Im C_3A-reichen Zement wurden noch Reste an unreagiertem C_3A festgestellt. Als Neubildungen wurden Silikagel und Calciumcarbonat, zusammengesetzt aus den drei Modifikationen Calcit, Aragonit und Vaterit, festgestellt. Die Gehalte an Carbonatphasen waren in allen in $scCO_2$ behandelten Proben wie folgt verteilt: Calcit > Vaterit > Aragonit. Das Aluminium aus den Aluminatphasen wurde in die entstandene Silikagel-Struktur eingebaut. Während einer an die Carbonatisierung anschliessenden Wasserlagerung erfolgte eine weitere Hydratation von Klinkerrelikten bzw. eine puzzolanische Reaktion zwischen Portlandit und Silikagel unter Bildung von C-S-H-Phasen. Dabei blieben die metastabilen $CaCO_3$-Phasen Vaterit und Aragonit in dem bisherigen Beobachtungszeitraum von 180 d stabil.

- Die Ergebnisse thermodynamischer Berechnungen haben gezeigt, dass bei einer Erhöhung der Alkalikonzentration eine größere Menge von Carbonat in der Porenlösung aufgenommen werden kann, bevor eine Calcitfällung eintritt. Der pH-Wert nimmt mit zunehmendem Alkaligehalt zu und die Konzentration der Kohlensäure ab, was auf eine mögliche Verzögerung der Carbonatisierungsreaktion hinweist.

- Die Carbonatisierung von mit Glasfaser bewehrten Leichtmörteln führte zu einer Zunahme der Biegezug- und Druckfestigkeiten. Die Werte für die Biegezugfestigkeiten übertrafen in den meisten Fällen sogar die der 28 d-alten Referenzproben. Diese Festigkeitszunahme ist auf die durch die Bildung von $CaCO_3$-Phasen entstandene Verdichtung des Gefüges in der Kontaktzone Zementstein-Glasfaser zurückzuführen.

7.2.2. Lagerung von Mörtel mit Granit in KOH-Lösung unter NaCl-Zugabe bei 80 °C – Einflüsse auf eine AKR

Bearbeitung: Kai Fischer, M. Sc.
Förderer: Verein Deutscher Zementwerke e. V.

Fahrbahndecken aus Beton sind gemäß ZTV Beton-StB der Feuchtigkeitsklasse WS (feucht + Alkalizufuhr von außen + starke, dynamische Beanspruchung) zuzuordnen. Die Prüfung solcher Betone wird seit 2013 im Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau (ARS 04/2013) geregelt. Daher sind seitdem alle Betonrezepturen bzw. Gesteinskörnungen (> 2 mm) für Neubauten und Erneuerungen von Fahrbahndecken (Bk 100 bis 1,8 nach RStO 12) hinsichtlich ihrer Eignung für die Feuchtigkeitsklasse WS gutachterlich zu bewerten. Durch die Einführung des ARS sind die dort genannten Prüfverfahren nun auch in Regionen anzuwenden, aus denen bisher offiziell keine Schäden durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) bekannt sind. Vor allem bei Graniten entstanden durch die sogenannte WS-Performance-Prüfung Diskrepanzen zwischen Erfahrungen aus der Baupraxis und den Ergebnissen im Prüfverfahren. Einige Betone mit granitischer Gesteinskörnung überschritten den bisher verwendeten Grenzwert von 0,5 mm/m [1] nach 10 Zyklen Wechsellagerung im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen (10 %ige NaCl-Lösung) deutlich [2].

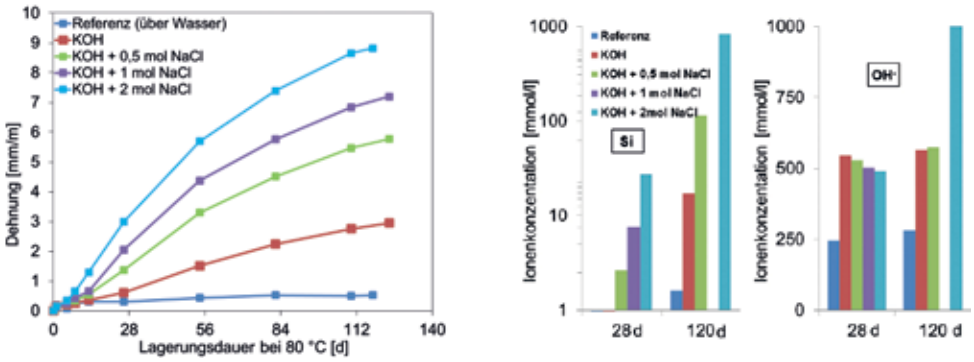


Abbildung 1: Expansion der Prismen bei 80 °C (links); Zusammensetzung der Porenlösung: OH- und Si-Konzentration (rechts)

Es ist bisher nicht geklärt, aus welchen Gründen u.a. Granite in diesem beschleunigten Prüfverfahren auffällig wurden. In Anlehnung an das Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie des DAfStb wurde in den vorliegenden Untersuchungen der Einfluss verschiedener AKR-beschleunigender Prüfparameter (Zusammensetzung und Konzentration der Lagerungslösung) auf die Expansionsreaktionen von Granit untersucht.

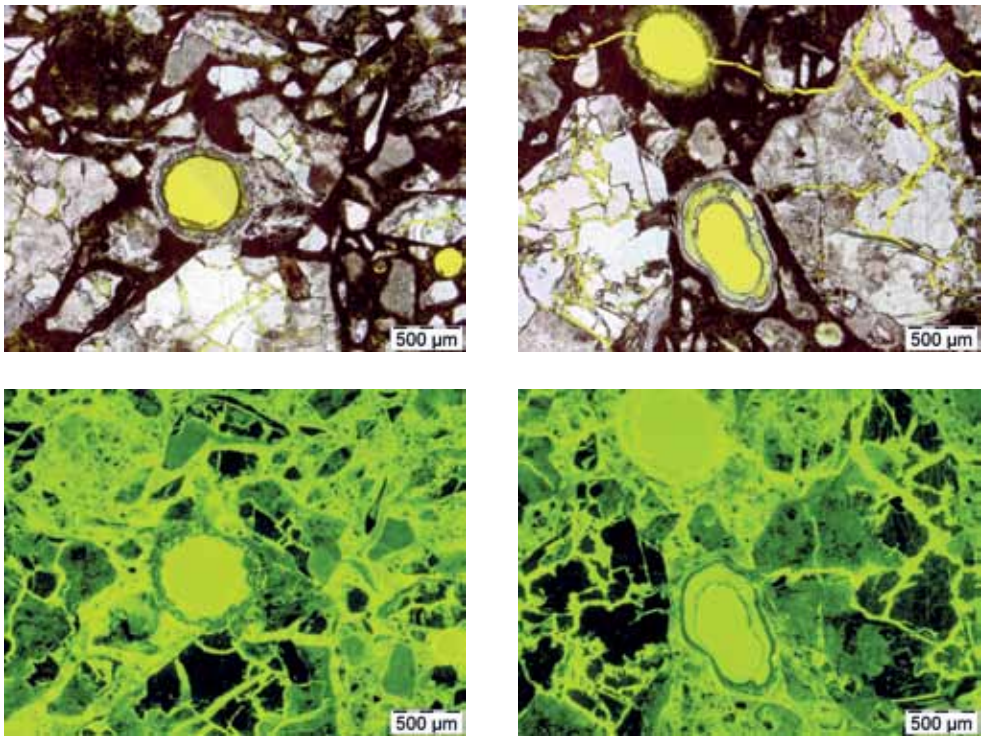


Abbildung 2: Lichtmikroskopische Aufnahmen mit Normallicht (oben) und UV-Licht (unten) an Proben KOH+0,5 mol NaCl (links) und KOH+2 mol NaCl (rechts) nach 120 Tagen Lagerung

Für die Untersuchungen wurde ein Prüfzement (Na_2O_{eq} = 1,2 M.-%) und einer der auffällig gewordenen Granite als Ausgangstoffe verwendet. Gemäß Alkali-Richtlinie des DAfStb wurden Mörtelproben (40mm x 40mm x 160 mm) mit Granit (w/z = 0,47, Gesteinskörung/Zement-Verhältnis = 2,25:1) hergestellt und bei 80 °C über einen Zeitraum von 120 Tagen in verschieden zusammengesetzten Prüflösungen gelagert. Als Basislösung wurde eine KOH-Lösung (pH-Wert rd. 13,8) verwendet. Weitere Proben wurden in identischen KOH-Lösungen gelagert, die jedoch zusätzlich mit 0,5, 1 bzw. 2 mol NaCl aufdotiert wurden. Als Referenz wurden Proben bei 80 °C über Wasser und in Folie eingeschlagen gelagert. Neben der Längen-, Massen- und E-Modul-Änderungen wurden ebenfalls die Porenlösungen nach 28 d und 120 d mittels ICP-OES analysiert sowie lichtmikroskopische Untersuchungen durchgeführt (Abbildung 1).

Anhand der lichtmikroskopischen Betrachtung sind nach 28 d Lagerung bei 80 °C in reiner KOH-Lösung einige Schädigungsmerkmale festzustellen (Abbildung 2). Die Schäden beschränken sich auf Risse, die sich bevorzugt entlang der Kristallgrenzen von Quarz in den Granitkörnern gebildet haben. Eine Rissfortpflanzung in die umliegende Mörtelmatrix – wie es üblicherweise bei AKR-Schäden beobachtet werden kann - ist nicht vorhanden. Eine Bildung von Alkali-Kieselsäure-Gel ist ebenfalls nicht festzustellen. Der Gefügezustand der Proben nach 120 Tagen Lagerung zeigt gleichwohl, dass diese Mikrorisse in den Körnern nach 28 Tagen – trotz fehlender Schadenscharakteristika - erste Anzeichen einer ablaufenden AKR darstellen. Nach diesem Lagerungszeitraum sind die Quarzkristalle der Granitkörner durch ausgeprägte Lösungserscheinungen gekennzeichnet. Von den Gesteinskörnern ausgehende Risse pflanzen sich in die umliegende Mörtelmatrix fort. AK-Gel findet sich in Luftporen und Rissen. Die Dotierung der KOH-Lösung mit NaCl verursacht in den Mörtelproben eine intensivere Schädigung (Rissbildung, Lösungserscheinungen, AK-Gel-Bildung). Gleichermaßen nehmen die Schäden mit höherer NaCl-Beaufschlagung zu.

Durch das Untersuchungsprogramm konnte die Verschärfung einer AKR in Granit mit zunehmender NaCl-Exposition unter Temperaturbedingen von 80 °C nachgewiesen werden. Für einen Übertrag dieser Zusammenhänge auf mögliche Effekte in WS-Performance-Prüfungen und auf die Baupraxis sind jedoch weitere Untersuchungen bei geringeren Temperaturen (20 und 60 °C) und praxisnahen Tausalzbeanspruchungen erforderlich.

[1] MÜLLER, C., et al. (2007): AKR-Prüfverfahren: Auf dem Weg zur Performance-Prüfung. Beton- und Stahlbetonbau, 102, S. 528 – 538

[2] FISCHER, K. et al. (2016): Alkali Silica Reaction in Concrete with Granite - Laboratory Tests and real Service Conditions. 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Sao Paulo, Brazil.

[3] BROWN, P. et al. (2004): The system $CaO-Al_2O_3-CaCl_2-H_2O$ at 23±2 °C and the mechanisms of chloride binding in concrete. CCR 34, p. 1549-1553

AG Betontechnologie

7.2.3. Modellierung des Einflusses der Temperatur auf das Tragverhalten von Verbunddübeln unter dauerhafter Lasteinwirkung

Bearbeitung: Dipl.-Ing. Thomas Kränkel
Förderer: HILTI AG / fischerwerke GmbH

Ziel des abgeschlossenen Vorhabens war es, den Einfluss der Temperatur auf das Dauerstandverhalten von Verbunddübeln zu quantifizieren und diesen Temperatureinfluss in ein, in Vorgängerprojekten entwickeltes, modifiziertes Burgers-Modell zur Lebensdauerprognose von Verbunddübeln zu integrieren.

Zur Quantifizierung des Temperatureinflusses auf das Tragverhalten der Verbunddübel unter dauerhafter Lasteinwirkung wurden Dauerstandversuche bei erhöhten Temperaturen durchgeführt. Zum Einsatz kamen dabei zwei kommerziell erhältliche Produkte, die für die derzeit in der Baupraxis eingesetzten Verbunddübel charakteristisch sind. Die Temperaturen entsprachen den lt. Produktzulassung maximalen Temperaturen für eine Langzeitbeanspruchung. Es wurden Versuche auf verschiedenen Belastungsniveaus durchgeführt, um gezielt ein Versagen der Verbunddübel nach unterschiedlichen Belastungsdauern herbeizuführen. Diese Versuche waren notwendig, um eine ausreichend große Datenbasis zum Abgleich der mit dem rheologischen Modell prognostizierten Versagenszeitpunkte mit dem realen Versagensverhalten unter Dauerlast zu erhalten.

Die Eingangsparameter für das modifizierte Burgers-Modell werden in drei Versuchen am Verbunddübel selbst bestimmt. Diese Versuche sind a) zentrische Zugversuche, b) Kurzzeit-Kriechversuche und c) Degradationsversuche. Während die Zugversuche die Berechnung einer lastvarianten Verbundsteifigkeit und die Kurzzeit-Kriechversuche die Berechnung einer zeitvarianten Viskosität der Verbunddübel ermöglichen, dienen die Degradationsversuche zur Bestimmung der materialdegradationsbedingten Verringerung der Verbundsteifigkeit. Voruntersuchungen ergaben, dass für erhöhte Temperaturen insbesondere der Degradationsversuch angepasst werden muss, um die temperaturbedingt gesteigerte Materialdegradation der Verbunddübel exakt zu erfassen. Dies war ein Hauptbestandteil des nun abgeschlossenen Projektes. Durch eine Anpassung des Versuchsablaufs des Degradationsversuchs konnte eine signifikante Steigerung der Exaktheit der Prognose des Dauerstandverhaltens erreicht werden.

Zusammenfassend betrachtet ist das modifizierte Burgers-Modell somit in der Lage, das Tragverhalten der Verbunddübel lastabhängig sowohl für den Bereich der Raumtemperatur als auch für erhöhte Temperaturen zu prognostizieren. Bild 1 stellt exemplarisch die messtechnisch erfassten (Versagenszeitpunkte) den mit dem modifizierten Burgers-Modell prognostizierten Versagenszeitpunkten eines Verbunddübels bei erhöhter Temperatur gegenüber.

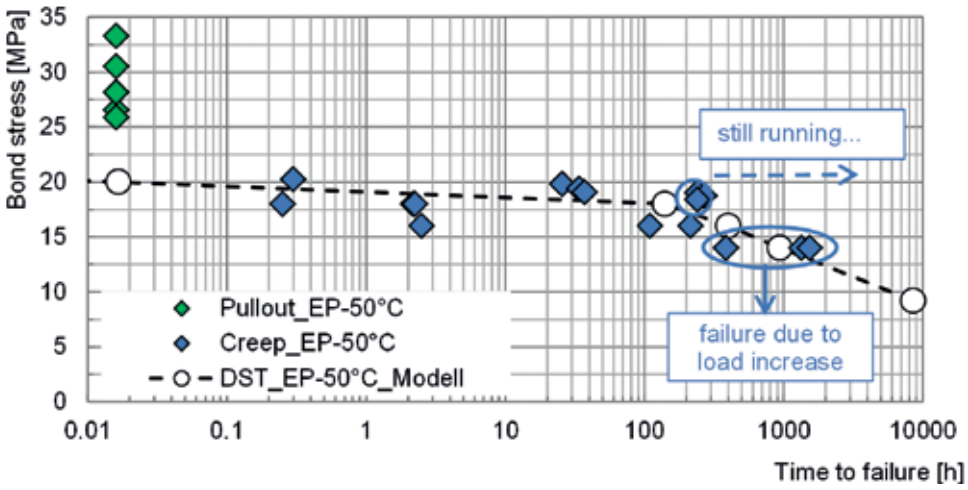


Abbildung 1: Messtechnisch erfasste (grün – Zugversuche + blau - Dauerstandversuche) und mit dem mo-difizierten Burgers-Modell prognostizierte (weiß) Versagenszeitpunkte eines Verbunddübels bei einer Temperatur von 50°C

AG 3 Stahl und Korrosion

7.2.4. Korrosionsverhalten von Stahl in Beton bei Anwendung des Instandsetzungsprinzips W-Cl bei gerissenem chloridbelasteten Beton

Bearbeitung: Florian Hiemer, M.Sc.
Förderer: DFG

Risse im Beton gehören zum Konstruktionsprinzip der Stahlbetonbauweise. Bei Bauwerken, die Taumitteln ausgesetzt sind (z. B. Parkhäuser und Tiefgaragen), stellen Risse Schwachstellen dar, über die Chloride rasch die schützende Betondeckung durchdringen und zu Korrosion an der risskreuzenden Bewehrung führen können.

Vom deutschen Beton- und Bautechnikverein wurde daher Ende 2010 das Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ herausgegeben, worin die Aufbringung einer rissüberbrückenden Oberflächenbeschichtung empfohlen wird, jedoch möglichst erst nach abgeschlossener Rissbildung infolge der jahreszeitlichen Temperaturwechsel. Im Zeitraum, in dem die Risse ggf. ungeschützt einer Chloridexposition direkt ausgesetzt sind, können Chloride eingetragen werden und u.U. einen Korrosionsprozess an der risskreuzenden Bewehrung initiieren. Dieser mögliche Korrosionsprozess wird jedoch im Merkblatt als nicht standsicherheitsgefährdend erachtet. Ziel des Forschungsvorhabens war es daher, eine wissenschaftliche Basis zur Beurteilung des Korrosionsverhaltens von Stahl in gerissenem chloridbelasteten Beton bei Anwendung des Instandsetzungsprinzips W-Cl gemäß den Empfehlungen aus dem DBV Merkblatt 2010 zu schaffen.

In einem Experimentalprogramm wurden zwei verschiedene Betonzusammensetzungen hinsichtlich der auftretenden Korrosionsmechanismen untersucht. Zunächst wurde der

Korrosionszustand an gerissenen, chloridbelasteten und anschließend beschichteten Stahlbetonbalken erfasst. Über einen definierten Zeitraum wurden dazu die relevanten elektrochemischen Kenngrößen der Bewehrungskorrosion zerstörungsfrei aufgezeichnet. Anschließend wurden die Probekörper zerstörend untersucht. Dabei wurden tiefengestaffelte Chloridprofile entnommen, sowie der Masseabtrag an den Makroelementanoden gravimetrisch bestimmt, um den Anteil der Mikroelementkorrosion zu quantifizieren. Aus den elektrochemischen Daten des Experimentalprogramms konnten weiterhin Eingangsgrößen für ein numerisches Simulationsprogramm generiert werden. Darin wurde an zwei praxisnahen Bauteilgeometrien die Entwicklung des Makroelementstroms simuliert.

Während der kurzzeitigen Chloridexposition von 12 Wochen (entspricht in etwa einer Winterperiode) kam es bei ca. 60 % der PZ-Proben zu einer Depassivierung der risskreuzenden Anode. Dabei stellten sich Treibspannungen von bis zu 300 mV ein, die zu anfänglichen Makroelementströmen bis zu 70 µA führten. Von den HOZ-Proben zeigten nach der Beaufschlagung ebenfalls ca. 60 % aller Proben Anzeichen aktiver Makroelementkorrosion, die sich jedoch in einem geringeren Makroelementstrom von max. 40 µA äußerte.

Unabhängig von der Betonzusammensetzung deuteten die elektrochemischen Parameter bei allen aktiven Proben im weiteren Verlauf der Exposition (keine weitere Chloridbeaufschlagung mehr, nach-folgende Beschichtung des Risses) auf eine Verringerung der Korrosionsaktivität hin. Dabei kam es bei den PZ-Proben bei 7 der 11 depassivierten Proben bereits vor Beschichtungsauftrag zum Erliegen der Korrosionsaktivität, hier wurde ein Anstieg des anodischen Polarisationswiderstands beobachtet. Von den 8 aktiven HOZ-Proben repassivierten bereits 4 vor Beschichtungsbeginn, hier wurden sowohl steigende anodische Polarisationswiderstände als auch steigende Elektrolytwiderstände festgestellt (vgl. Bild 1).

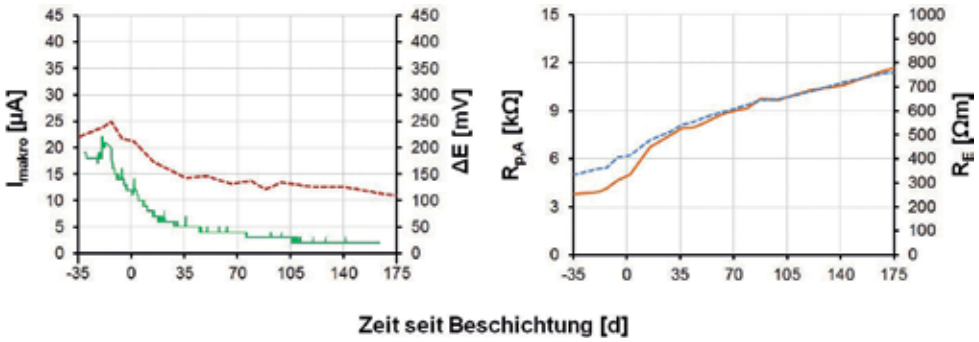


Abbildung 1: Elektrochemische Parameter des Probekörpers HOZ-31 nach Applikation der Beschichtung

Nach der Beschichtung kam es bei allen noch korrosionsaktiven PZ-Proben zunächst zu einem sprunghaften Anstieg des Makroelementstroms, der in drei Fällen jedoch spätestens 310 Tage nach Beschichtung vollständig zum Erliegen kam. Der anodische Polarisationswiderstand stieg um einen Faktor 5, während der Elektrolytwiderstand seinen Wert lediglich verdoppelte. An den 4 noch korrosionsaktiven HOZ-Proben wurde nach der Beschichtung in allen Fällen eine gleichmäßige, kontinuierliche Reduzierung der Korrosionsaktivität festgestellt, die bei drei Proben zum Erliegen des Makroelementstroms innerhalb von einem halben Jahr nach der Oberflächenbeschichtung führte. Bei einer Probe wurde bis zum Zeitpunkt der Berichterstellung ein minimaler Gesamtstrom gemessen.

Bei den passiven PZ-Proben wurde auf Höhe der Bewehrungslage ein Chloridgehalt von im Mittel 0,70 M.%/z festgestellt, wohingegen aktive Proben einen Chloridgehalt von

1,04 M.%/z aufwiesen. Bei HOZ-Proben wurden bei den passiven Proben im Mittel eine Chloridkonzentration von 0,54 M.%/z erreicht, die Chloridkonzentration an den aktiven Proben lagen im Mittel 0,66 M.%/z geringfügig darüber. Zur Absicherung der für die Laboruntersuchung gewählten Chloridbelastung wurden Vergleichsproben aus einer gerissenen Zwischendecke eines Parkhauses herangezogen. Hier wurden auf Höhe der Bewehrungslage (c = 40 mm) Chloridkonzentrationen von 0,85 M.%/z gemessen. Beim Vergleich dieser Zahlen kann festgestellt werden, dass die im Labor eingestellten Chloridbelastungen praxisnah waren. An den wenigen Proben mit hohen Makroelementströmen wurden zumeist Lochfraßnarben identifiziert, die bei der Probe PZ-03 die größte Tiefe von 2 mm aufwiesen (vgl. Bild 2). Die Schädigungen an den inspizierten Proben waren in der Regel so geringfügig, dass eine trennscharfe gravimetrische Quantifizierung der Mikrokorrosionsanteile nicht möglich war.

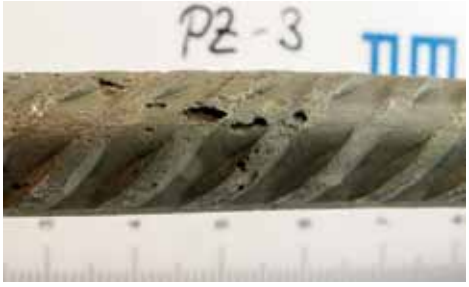


Abbildung 2: Anodenstab des Probekörper PZ-03 nach dem Entfernen der Korrosionsprodukte

Die numerische Simulation realistischer Bauteilgeometrien brachte weiteren Aufschluss zum Einfluss einzelner Parameter auf den Makroelementkorrosionsstrom. So konnte festgestellt werden, dass mit sinkender Treibspannung ein erheblicher Abfall der Korrosionsaktivität einhergeht. Da diese in den Laboruntersuchungen zumeist nur zu Beginn der Exposition die Maximalwerte der Simulation annahm, käme es bei den untersuchten Geometrien zu einer erheblichen Reduzierung der Korrosionsaktivität. Weiterhin wurde festgestellt, dass im Falle einer linienförmigen, lokal begrenzten Depassivierung der risskreuzenden Bewehrung durch einen Einzelriss höhere Abtragsraten auftreten können als wenn zusätzlich in Längsrichtung des Risses ein weiterer Bewehrungsstab depassiviert wurde. Mit sinkendem Elektrolytwiderstand bzw. Treibspannung wird diese jedoch signifikant verringert (vgl. Bild 3).

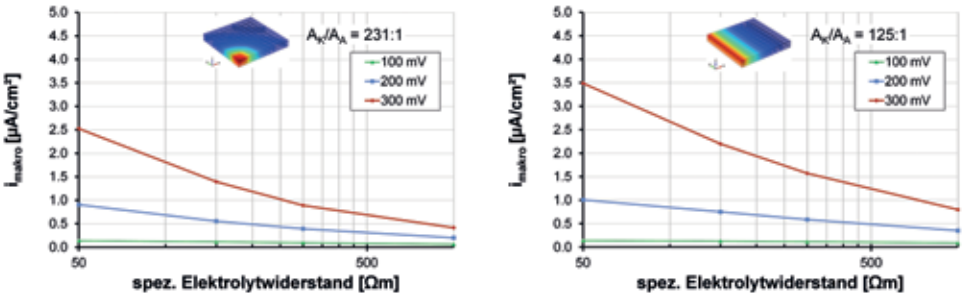


Abbildung 3: Makroelementstromdichte in Abhängigkeit des Elektrolytwiderstands (PZ-Beton)

Für das Instandsetzungsprinzip W-Cl kann abschließend festgehalten werden, dass die Abdichtung eines für eine Winterperiode für Chlorid offen zugänglichen Biegerisses eine wirksame Maßnahme darstellt, ggf. an risskreuzender Bewehrung initiierte Korrosion wieder zu deaktivieren. Die hier bestimmten maximalen Lochfraßnarbentiefen lagen bei 2 mm, die mittleren Tiefen lagen deutlich darunter. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass eine unter realen Bedingungen im Winter initiierte und ablaufende Korrosion zu geringeren Abträgen an der risskreuzenden Bewehrung führen wird, da sowohl Temperatur als auch Luftfeuchtigkeit im Labor (20°C/ 85%RH) korrosionstechnisch deutlich ungünstiger als bei Außenbauteilen eingestellt wurden. Zusätzlich kann aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass

die Zunahme des Elektrolytwiderstands nicht ausschließlich zur Deaktivierung des Korrosionsprozesses beiträgt, sondern auch Deckschichtbildung und/oder Chloridumverteilung die Deaktivierung begünstigen könnten.

AG Zerstörungsfreie Prüfung

7.2.5. HEALCON: Self-healing concrete to create durable and sustainable concrete structures

Bearbeiter: Fabian Malm M.Sc.
Förderer: EU Förderkennzeichen-Nr. 309451

HEALCON ist ein von der Europäischen Kommission (EU-FP7) gefördertes und von Prof. Nele De Belie (Universität Gent) koordiniertes Forschungsprojekt. Ziel ist es, intelligenten Beton mit selbstheilenden Eigenschaften zu designen, um dauerhafte und nachhaltige Betonstrukturen zu schaffen.

Die Effizienz der verschiedenen Selbstheilungsmechanismen, im Hinblick auf mechanisches Verhalten, Flüssigkeitsdichtigkeit und Haltbarkeit wurde zunächst im Labormaßstab quantifiziert. Eine faire Bewertung erfolgte auf der Basis von Standardtestverfahren, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurden. Darüber hinaus wurden Computermodelle entwickelt, um die Schädigungs- und Selbstheilungsmechanismen zu simulieren, um Labortests zu optimieren und um die Mechanismen auf eine industrielle Ebene zu skalieren. Schließlich wurden Heilmittel in großen Elemente (Platten und Balken) integriert, um experimentell die Selbstheilungsmethoden zu validieren. Um die Heilung zu charakterisieren, wurden zerstörungsfreie Prüfmethoden angewandt. Darüber hinaus wurde ein drahtloses Überwachungssystem entwickelt, das geeignet ist, Schädigungs- und Heilungsprozesse zu beurteilen.

Das Hauptziel der Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) war die Untersuchung der Heilungseffizienz der verschiedenen Selbstheilungsmethoden, welche in diesem Projekt eingesetzt wurden. Daher wurden mehrere verschiedene Messtechniken, welche hauptsächlich auf die elastische Wellenausbreitung in zementhaltigem Material zurückgreifen, verwendet, um die Materialeigenschaften zu charakterisieren. Auf der Basis vorläufiger Arbeiten haben potenzielle ZfP-Techniken wie beispielsweise die Schallemissionsanalyse (SEA) bereits ihre Eignung für diese Anwendung unter Beweis gestellt.

Die erste Aufgabe bestand darin, die Vielfalt der NDT-Techniken zu verbessern und Informationen z. B. über die Elastizitätsmodule, die Wellengeschwindigkeiten und Permittivität zu gewinnen. Neben Einzelmessungen zu bestimmten Zeitpunkt wurden Ultraschall-Monitoring-Verfahren für Echtzeitmessungen angewendet. Basierend auf Untersuchungen des Abbinde- und Erhärtungsprozesses von Frischbeton wurde das Analyseverfahren zur Überwachung des kontinuierlichen Heilprozesses von polymeren Heilmitteln angepasst. Dadurch können unterschiedliche Typen von Injektionsmaterialien gesondert hinsichtlich der Härtungszeit und sogar im Echtzeithärtungsverlauf beurteilt werden. Nach der Heilungsperiode bestätigte eine Lokalisierung der aufgenommenen akustischen Emissionen während einer Wiederbelastung die Ergebnisse der Ultraschallüberwachung. Weiterhin zeigten die durch die Schwingungsanalyse ermittelten Elastizitätsmodule, dass die Daten hinreichend sensibel sind um unterschiedliche Zustände der Heilwirkung vergleichen zu können. Für Proben mit polymeren Heilmitteln wurde gezeigt, dass sowohl Rissbildung als auch Heilung eindeutig überwacht werden können. Mit Hilfe der SEA konnten Beton- und Kapselbrüche sowie das Versagen des polymeren Heilmittels detektiert und lokalisiert wer-

den. Das Ultraschallübertragungsverfahren hat sich im Wesentlichen für die Bestimmung der Risstiefe und deren Ausbreitung in allen verschiedenen Zuständen bewährt. Eine Echtzeitüberwachung erlaubt, kontinuierlich die Rissbildung und Heilung zu verfolgen.

Trotz Abschluss des Projektes wird aus Eigeninitiative der Projektpartner eine abschließende Langzeit-Messkampagne an großen Betonbalken (2500x400x200 mm), welche unter realen Bedingungen gelagert wurden, weitergeführt.

Auf dem YouTube-Kanal TUMuenchen1 der Technischen Universität München wurde ein Film zum HEALCON-Projekt des Lehrstuhls für Zerstörungsfreie Prüfung veröffentlicht. Der 5-minütige Film ist sowohl in Deutsch (https://www.youtube.com/watch?v=rtlBe47k4DQ) als auch in Englisch (https://www.youtube.com/watch?v=SzhWM_oWVCg) verfügbar.

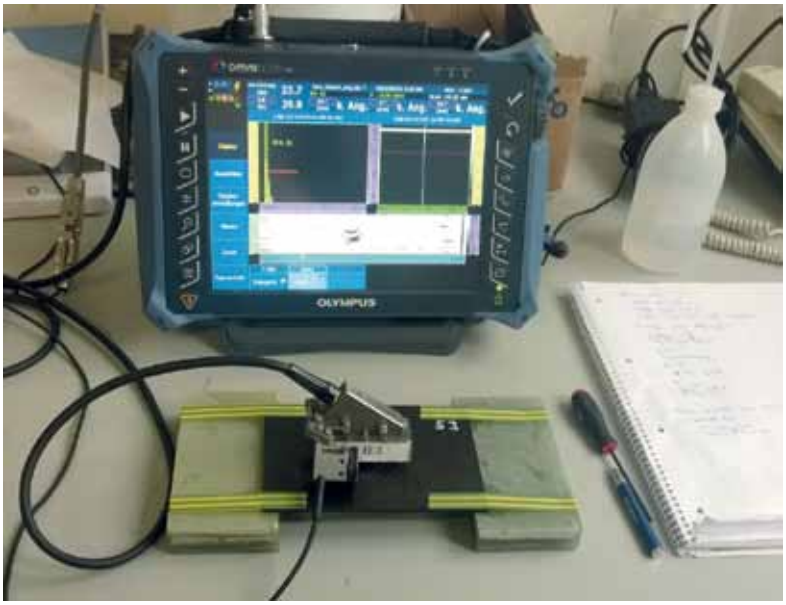
7.2.6. MAIzfp: Kombinierte zerstörungsfreie Prüfmethoden zur Qualitätssicherung von Faserverbundwerkstoffen

Bearbeitung: Dipl.-Ing. Philipp Jatzlau
Förderer: BMBF (03MAI12H)

Die beiden wichtigsten strategischen Ziele des Spitzenclusters MAI Carbon sind erstens die Etablierung der Großserien-Herstellung von Faserverbundwerkstoffen – insbesondere CFK – in den Branchen Automobilbau, Luft- und Raumfahrt sowie dem Maschinen- und Anlagenbau in der Clusterregion bis zum Jahr 2017 und zweitens der Ausbau der MAI-Region zu einem europäischen Kompetenzzentrum für CFK Leichtbau, das den Clusterpartnern zu einer Weltmarkt-Spitzenposition in der Schlüsseltechnologie „CFK“ verhilft. Für eine breite Akzeptanz von CFK-Produktionstechnologien ist eine Begleitung des Herstellungsprozesses durch Qualitätssicherungsmaßnahmen notwendig, deren Zuverlässigkeit und Effizienz den kombinierten Einsatz unterschiedlicher ZfP-Methoden erfordern.

Das Projekt MAIzfp fokussiert sich auf die zerstörungsfreie Prüfung von CFK-Bauteilen. Zur Erreichung der Clusterziele (Reduktion der Zykluszeit, Reduktion der Prozesskosten, Erhöhung der Automatisierbarkeit, Verringerung der Ausschussquote) ist es notwendig, die eingesetzten ZfP-Methoden besser zu verstehen und ihre Anwendung auf CFK-Strukturen unter dem Gesichtspunkt der Automatisierbarkeit näher zu betrachten. Zu diesem Prozessverständnis können die Ergebnisse des Vorhabens entscheidend beitragen.

Abbildung 1: Anwendung des Ultraschallverfahrens auf einen Prüfkörper



Im Rahmen des Projekts konnten erstmals große Datenmengen verschiedenster Prüfverfahren an denselben Prüfkörpern mit realistischen Defekten erhoben und ausgewertet werden. Die eingesetzten Verfahren umfassen alle Komplexitätsebenen von der einfachen Sichtprüfung über akustische Resonanzverfahren und Ultraschall sowie Thermographie bis hin zur Computertomographie. Nachdem bei den Kooperationspartnern Messgeräte verschiedener Hersteller und Spezifikationen eingesetzt werden, können Aspekte wie Messabweichungen und Detektionswahrscheinlichkeit auch geräteübergreifend betrachtet werden. Diese Daten erlauben ein besseres Verständnis des Prüfprozesses hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit sowie der Abhängigkeit von Prüfer und Messgerät. Durch diese Erkenntnisse können Prüfprozesse optimiert und dadurch Prüfzeit und -kosten sowie die Ausschussquote reduziert werden.

Wissenschaftlich-technisches Ziel des Vorhabens war die Identifikation geeigneter zerstörungsfreier Prüfverfahren für CFK an Referenz-Probekörpern, die den späteren Serienbauteilen zumindest ähneln, sowie deren Modifikation im Hinblick auf die Detektion von relevanten Schädigungsparametern. Dieses Ziel wurde in vollem Umfang erreicht. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Anwendung des Ultraschallverfahrens auf einen Prüfkörper. In Abbildung 2 sind die untersuchten Defektarten in den Prüfkörpern abgebildet.

Abbildung 2: Untersuchte Defektarten in den Prüfkörpern

Die Modifikation der Verfahren hinsichtlich der Detektion der relevanten Schädigungen umfasst Parameter wie beispielsweise Prüffrequenzen oder Messaufbauten.

Außerdem sollte die Wirksamkeit von Kombinationen unterschiedlicher ZfP-Methoden auf die Detektionswahrscheinlichkeit von Defekten in CFK-Materialien empirisch getestet und bewertet werden. Hierzu wurde ein Ringversuch mit allen zur Verfügung stehenden Verfahren und Prüfkörpern durchgeführt. Die Notwendigkeit der Verfahrenskombination ergibt sich aus den Abweichungen der Messergebnisse bei Anwendung der unterschiedlichen Verfahren. Als Beispiel kann hier die Thermographie genannt werden, die zwar eine großflächige Messung in relativ kurzer Zeit erlaubt, jedoch die Defektgröße systematisch zu gering quantifiziert. Die Kombination mit Ultraschallmessungen kann hier die Effizienz und Zuverlässigkeit des Prüfprozesses deutlich erhöhen. Des Weiteren sollten, industrieübergreifend, geeignete zerstörungsfreie Prüfverfahren im Rahmen einer normgerechten Qualitätssicherung für die Inlineprüfung entwickelt werden. Hierzu wird auf die Berichte der Industriepartner verwiesen, für die eine Integration der Prüfverfahren in die Bauteilherstellung von großer Relevanz ist.

7.3. Laufende Forschungsvorhaben

AG Bindemittel und Zusatzstoffe

7.3.1. Einsatz von Flugasche im Beton zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion - Langzeitverhalten
Bearbeitung: Dr.-Ing. A. Heisig
Förderer: VGB-Forschungsstiftung

7.3.2. AKR-Vermeidung durch Flugasche bei Alkalieintrag von außen - Langzeitlagerung
Bearbeitung: Dr.-Ing. A. Heisig
Förderer: VGB-Forschungsstiftung

7.3.3. Einfluss von Tausalz und aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen der Alkali-Kieselsäure Reaktion in Beton
Bearbeitung: K. Fischer, M. Sc.
Förderer: DFG

7.3.4. Einfluss von Temperatur und Tausalzgehalt auf Lösungs- und Expansionsreaktionen verschiedener Gesteine in künstlicher Zementsteinporenlösung - Fortsetzung
Bearbeitung: K. Fischer, M. Sc.
Förderer: VDZ

7.3.5. Wirkung von höheren Flugaschegehalten auf den Sulfatwiderstand von Beton – Langzeitlagerung
Bearbeitung: Dr.-Ing. L. Urbonas
Förderer: VGB-Forschungsstiftung

7.3.6. Die Rolle des Aluminiums in C-A-S-H bei chemischem Angriff auf Beton (mit AG4)
Bearbeitung: L. Irbe, M. Sc.
Förderer: DFG

7.3.7. Expansionsspannung beim Sulfatangriff auf Beton – Einfluss von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen
Bearbeitung: M. Wagner, M. Sc.
Förderer: DFG

AG Betontechnologie

7.3.8. Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton-Auslagerungsversuch
Bearbeitung: Dipl.-Ing. C. Thiel
Förderer: AiF/FTB

7.3.9. Schalen aus gradierten Betonfertigteilen
Bearbeitung: S. Illguth, M.Sc., Dr.-Ing. D. Lowke
Förderer: DFG – Im Rahmen des SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“

7.3.10. Einfluss von CO_2-Druck und Betonfeuchtegehalt auf das Porengefüge des Betons während der Carbonatisierung

Bearbeitung: Dipl.-Ing. C. Thiel
Förderer: DFG

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

Bearbeitung: Dipl.-Ing. J. Skarabis
Förderer: BMVI / bast

7.3.12. Additive Fertigung frei geformter Betonbauteile durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen

Bearbeitung: D. Weger M.Sc., Dr.-Ing. D. Lowke
Förderer: DFG – Im Rahmen des SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“

7.3.13. Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze

Bearbeitung: Nicolai Klein, S. Illguth
Förderer: BMVI / BASt

7.3.14 Rheology and Workability Testing of Deep Foundation Concrete

Bearbeitung: T. Kränkel
Förderer: European Federation of Foundation Contractors (EFFC)

AG Stahl und Korrosion

7.3.15. Korrosionsmonitoring in Rissbereichen realer Stahlbetonbauteilen zur Wirksamkeitskontrolle des Instandsetzungsprinzips W-CI

Bearbeitung: Florian Hiemer, M.Sc.
Förderer: DAfStb

7.3.16. Mechanische Verankerung aus Hochleistungsbeton (UHPC) zum Vorspannen von Stäben aus glasfaserverstärkten Kunststoffen

Bearbeitung: Dr.-Ing. Kai Osterminski, Daniel Elner, B.Sc.
Förderer: AIF

7.3.17. Potentialfeldmessung: Bewertung der Prüfqualität und koordinierte Einbindung der Daten in Schädigungsmodelle

Bearbeitung: Dr.-Ing. Sylvia Keßler
Förderer: DFG

7.3.18. Lebensdauerakte Windenergieanlage – Lifetime Identity Documentation (LIDOC) im Rahmen von "Monitoring and Inspection of Structures At Large Wind Turbines (MISTRALWIND)

Bearbeitung: Dr.-Ing. Kai Osterminski
Förderer: BMWi

7.3.19. Diffusion potentials in concrete – error and information source (In Kooperation mit dem ifB, ETH Zürich)

Bearbeitung: Elke Ziehensack, M.Sc.
Förderer: DFG/ SNF (Schweizer Nationalfond)

AG Chemie

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

Bearbeitung: L. Irbe, M.Sc.
Förderer: DFG

AG Zerstörungsfreie Prüfung

7.3.21. COST TU1404

Bearbeitung: Prof. Christian Große
Förderer: EU-COST-TU1404

7.3.22. MISTRALWind: Monitoring and Inspection of Structures At Large Wind Turbines

Bearbeitung: Christian T. Geiss, M.Sc., Manuel Raith, M.Sc., Max Botz, M.Sc., Dipl.-Ing. Bernhard Wondra
Förderer: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen-Nr. 0325795E)

7.4. Neue Forschungsvorhaben

AG Bindemittel und Zusatzstoffe

7.4.1. Eigenschaften von Belit-Calciumsulfoaluminatzement aus flugaschehaltigem Rohmehl

Bearbeitung: Dr.-Ing. A. Heisig
Förderer: VGB-Forschungsstiftung

Im September 2016 wurde ein Forschungsantrag zum Thema: „Eigenschaften von Belit-Calciumsulfoaluminatzement aus flugaschehaltigem Rohmehl“ durch die VGB bewilligt.

Die Zementherstellung führt weltweit zu hohen CO_2-Emissionen. Momentan werden jedes Jahr weltweit etwa 2,8 Mrd. Tonnen Zement hergestellt. Schon jetzt trägt die Herstellung von Portlandzementklinker zu etwa 5% der globalen, anthropogenen CO_2-Emission bei. Bis zum Jahr 2050 wird ein Anstieg der Produktion auf bis zu 4 Mrd. Tonnen prognostiziert [1, 2]. Im Zuge der Verringerung des CO_2-Ausstoßes wird unter anderem auch die Reduzierung des CO_2-Gehaltes angestrebt. Dies kann durch den Einsatz von Belit-basierten Zementen erreicht werden. Der Einsatz von industriellen Nebenprodukten als Sekundärrohstoffe (z. B. Braun- oder Steinkohlenflugasche) für das Rohmehl trägt ebenfalls zu einer Verringerung der CO_2-Bilanz solcher Zemente bei.

Um die hydraulische Aktivität zu erhöhen, werden den Belit-basierten Zementen hydraulisch aktive Stoffe beigemischt (z. B. Calciumsulfoaluminat). Die sogenannten Belit-Calciumsulfoaluminatzemente (BCSA-Zemente) können bei niedrigeren Brenntemperaturen und niedrigeren CaO-Gehalten hergestellt werden und entwickeln doch gute Frühfestigkeiten. BCSA-Zemente bestehen hauptsächlich aus den Klinkerphasen Belit (40 – 50 M.-%) und Ye'elimit (20 – 30 M.-%) [3] und können verglichen mit einem herkömmlichen Portlandzement bei niedrigeren Brenntemperaturen sowie geringeren Kalksteingehalten hergestellt werden. Gewöhnlich wurden BCSA-Zemente aus Kalkstein, Gips und Bauxit produziert. Dabei belasten der Abbau von Bauxit, seine Weiterverarbeitung und der Transport die Umwelt enorm. Die positiven ökologischen und ökonomischen Aspekte eines BCSA-Zements werden durch den Einsatz von Bauxit deutlich geschmälert. In den vergangenen Jahren wurden daher auch industrielle Nebenprodukte für die Herstellung in Betracht gezogen [4, 5], z. B. ein Austausch von Bauxit gegen Flugasche als Aluminiumquelle [6, 7]. Dennoch können sich verschiedene Zusammensetzungen der Flugaschen auf die Klinkerzusammensetzung und den Hydratationsverlauf der BCSA-Zemente auswirken.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, Belit-Calciumsulfoaluminatklinker aus flugaschehaltigen Rohmehlen zu brennen und daraus Zement herzustellen. Dabei sollen zunächst eine Braun- und eine Steinkohlenflugasche zum Einsatz kommen, um den Einfluss der unterschiedlichen Zusammensetzung dieser beiden Flugaschen auf die Klinkerphasenbildung zu untersuchen.

Außer der zwei aluminiumreichen Flugaschen wird als Kalkträger ein Kalkstein verwendet, als Sulfatträger – REA-Gips, bzw. aus REA-Gips hergestellter Anhydrit eingesetzt. Als Korrekturmaterial zur Erhöhung des Al-Gehaltes wird ggf. ein Schluff aus der Kaolinitherstellung verwendet. Ausgehend von der chemischen Zusammensetzung der Ausgangstoffe werden die Zusammensetzungen der Rohmehle berechnet. Dabei wird ein möglichst hoher Anteil an Calciumsulfoaluminat im Brennprodukt angestrebt.

[1] International Energy Agency (IEA) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD): Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050, 2009

[2] M. Schneider: Nachhaltige Zementproduktion in Gegenwart und Zukunft, 18. Internationale Baustofftagung - Ibausil, Weimar, 2012, Band 1, S. 58 – 66

[3] G. Álvarez-Pinazo, et al.: Rietveld quantitative phase analysis of yeelimite-containing cements, Cem. Concr. Res., 42 (2012) S. 960 – 971

[4] J. Beretka, et al.: The influence of C_4A_3S content and WS ratio on the performance of calcium sulfoaluminate-based cements, Cem. Concr. Res., 26 (1996) S. 1673–1681

[5] F.P. Glasser, L. Zhang: High-performance cement matrices based on calcium sulphoaluminate-belite compositions, Cem. Concr. Res., 31 (2001) S. 1881–1886

[6] F. Bullerjahn, et al.: Effect of raw mix design and clinkering procedure on the formation and mineralogical composition of (ternesite) belite calcium sulfoaluminate ferrite clinker, 1st International Conference on the Chemistry of Construction Materials, Berlin, 2013, S. 139-142

[7] W. Dienemann, et al.: Belit-Calciumsulfoaluminate-Ternesite (BCT) – a new low-carbon clinker technology, Cem. Int., 11 (2013) S. 100 – 109

7.4.2. Expansionsverhalten von Mörtel mit Granit unter Zugabe von NaCl bei 60 °C (AKR-Performance-Test-Bedingungen)

Bearbeiter: Kai Fischer, M. Sc.
Förderer: Verein Deutscher Zementwerke e. V.

Das bewilligte Forschungsvorhaben knüpft an die nachgewiesenen Zusammenhänge zwischen Schäden durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) in Mörtel und einer konzentrationsabhängigen NaCl-Exposition aus dem abgeschlossenen Forschungsvorhaben „Lagerung von Mörtel mit Granit in KOH-Lösung unter NaCl-Zugabe bei 80 °C – Einflüsse auf eine AKR“ (s. Kapitel 7.2.) an. Analog zum Vorgängerprojekt, werden identisch zusammengesetzte Mörtelproben gemäß

AKR- Schnellprüfverfahren der Alkali-Richtlinie des DAfStb hergestellt und über einen Zeitraum von 6 Monaten in KOH-Lösungen mit teilweisem Zusatz von 0,5 bzw. 2 mol NaCl gelagert. Durch die Reduzierung der Lagerungstemperatur von 80 auf 60 °C, sollen die Versuche eine Anbindung zum etablierten 60 °C Betonversuch mit externer NaCl-Zufuhr [1] liefern, welcher für die Beurteilung von Fahrbahndeckenbetonen angewendet wird. Im Zusammenhang mit diesem AKR-Performance-Test steht insbesondere das unterschiedliche Schädigungsverhalten von Betonrezepturen mit Granit in Abhängigkeit vom verwendeten Sand in der Feinfraktion im Fokus [2]. Vor diesem Hintergrund werden in dem Versuchsprogramm zwei weitere Mörtelrezepturen geprüft, in welchen der Granit zu 30 Prozent durch einen unbedenklichen sowie reaktiven Natursand ausgetauscht wird. Neben der Längen-, Massen- und E-Modul-Änderungen werden nach einer Beanspruchungsdauer von 28 Tagen und nach 6 Monaten in den Lagerungslösungen die Untersuchung der Porenlösungszusammensetzung der Mörtelproben sowie lichtmikroskopische Untersuchungen durchgeführt.

[1] MÜLLER, C., et al. (2007): AKR-Prüfverfahren: Auf dem Weg zur Performance-Prüfung. Beton- und Stahlbetonbau, 102, S. 528 – 538
[2] FISCHER, K. et al. (2016): Alkali Silica Reaction in Concrete with Granite - Laboratory Tests and real Service Conditions. 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Sao Paulo, Brazil.

7.4.3. Variierte Vorlagerungszeiten und deren Auswirkungen auf flugaschehaltige Betone im 40 °C-Betonversuch (AKR-Performance-Prüfung) – Fortsetzung

Bearbeiter: Kai Fischer, M. Sc.
Förderer: VGB

Im Oktober 2016 wurde ein Fortsetzungsantrag zum Thema: „Variierte Vorlagerungszeiten und deren Auswirkungen auf flugaschehaltige Betone im 40 °C-Betonversuch“ durch die VGB bewilligt.

Im abgeschlossenen Vorgängerprojekt VGB-Projekt 349 wurden u.a. flugaschehaltige Betone mit EIII-OF Material (Kies mit Opalsandstein und Flint) bis zu 3 Jahren in der Nebelkammer (40 °C / 100 r. F.) sowie in freier Bewitterung gelagert, wobei die Betone vor der Nebelkammerbeanspruchung 1, 28 und 91 Tage vorlagert wurden. Durch Herstellung und Lagerung identisch zusammengesetzter Betone sollte durch die Vorlagerung eine beschleunigte praxisferne puzzolanische Reaktion durch eine verfrühte Einlagerung in die Nebelkammer unterbunden werden. Die Untersuchungsergebnisse zeigen jedoch, dass gegenwärtig in allen Betonen mit Flugasche keine Schäden infolge einer AKR durch die

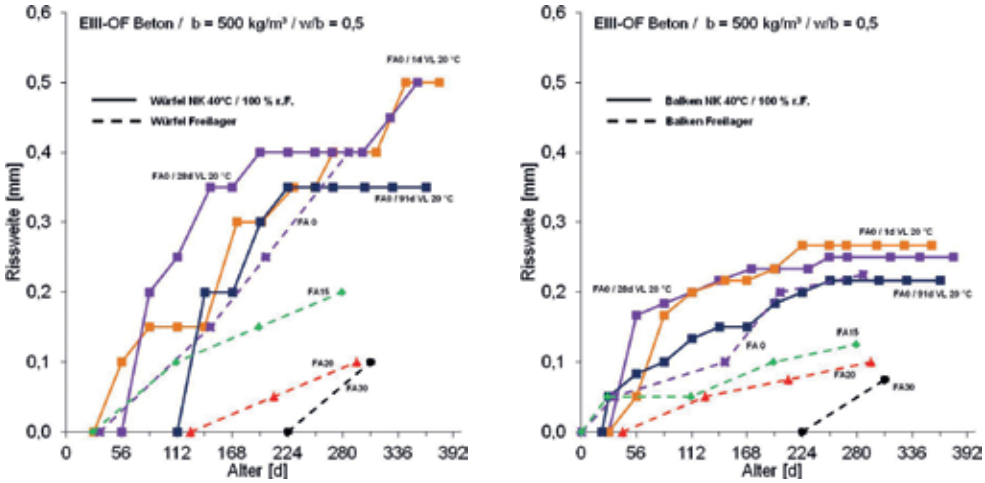


Abbildung 1: Rissbreitenentwicklung der EIII-OF-Betone mit Flugasche in der Nebelkammerlagerung (40 °C; 100 % r. F.) nach Vorlagerungszeiten (VL) von 1, 28 und 91 Tagen sowie Freilagerung (gestrichelte Linien): Würfel (links) und Balken (rechts), [1] Si-Konzentration (rechts)

Beanspruchung in der Nebelkammer entstanden sind. Demgegenüber treten im Freilager nach mehr als einem Jahr Risse in allen flugaschehaltigen Proben auf. Entsprechend kann aus den variierten Vorlagerungsarten bisher kein gleichartiges Verhalten der flugaschehaltigen Betone zwischen der freien Bewitterung und des Laborprüfverfahrens mittels Nebelkammerlagerung abgeleitet werden.

Gleichwohl liefert allein die Feststellung von makroskopischen Rissen in den frei bewitterten Betonen noch keine definitive Bestätigung für den Nachweis einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Aus diesem Grund liegt der Schwerpunkt des neu bewilligten Forschungsvorhabens VGB-Projekt 402 auf Charakterisierung des Mikrogefüges der Betone – v.a. in Hinblick auf eine AKR. In diesem Zusammenhang werden an Betonen aus der Freilagerung und der Nebelkammerlagerung (ohne Flugasche und mit 15, 20 und 30 M.-% Flugasche) Untersuchungen mittels Polarisationsmikroskopie und REM-EDX durchgeführt.

Das Untersuchungsprogramm soll eine zuverlässige Aussage darüber liefern, ob die Risse in den frei bewitterten flugaschehaltigen Betonen mit EIII-OF Material tatsächlich durch eine AKR hervorgerufen werden oder gegebenenfalls durch eine andere Ursache.

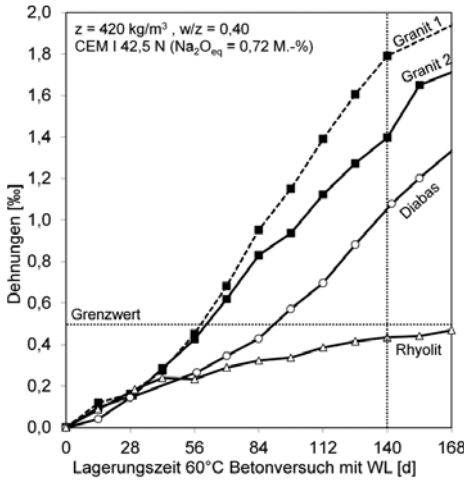
[1] Heinz, D., Urbonas, L., Fischer, K. (2015): Variierte Vorlagerungszeiten und deren Auswirkungen auf flugaschehaltige Betone im 40 °C- und 60 °C-Betonversuch (Performance Prüfung). VGB-Vorhaben Nr. 349. Forschungsbericht TU München

7.4.4. Verhalten verschiedener Gesteine unter beschleunigenden Bedingungen in AKR-Prüfverfahren

Bearbeiter: K. Fischer, M.Sc.
Förderer: AiF

Im März 2016 wurde ein Forschungsantrag zum Thema: „Verhalten verschiedener Gesteine unter beschleunigenden Bedingungen in AKR-Prüfverfahren“ durch die AiF bewilligt.

Fahrbahndecken aus Beton werden aufgrund des Eintrags von Alkalien aus Taumitteln bei gleichzeitig hoher dynamischer Belastung durch den Verkehr der Feuchtigkeitsklasse WS zugeordnet. Im Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau (ARS 04/2013) wird gefordert, alle Betonrezepturen bzw. Gesteinskörnungen (> 2 mm) für Neubauten und Erneuerungen von



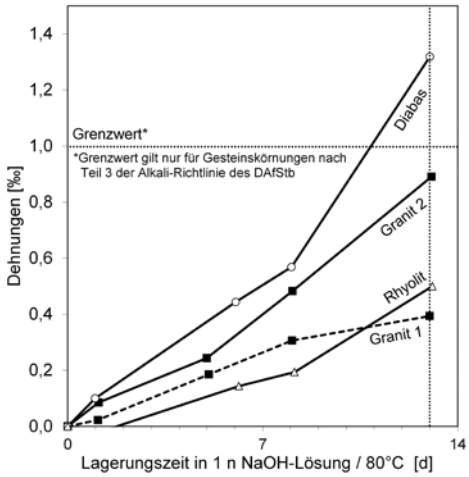


Bild 1 (links): Dehnungsverhalten von Fahrbahndeckenbeton mit verschiedenen groben Gesteinskörnungen im AKR-Betonversuch mit NaCl-Zufuhr

Bild 2 (rechts): Dehnungsverhalten der Gesteinskörnungen im AKR-Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie

Fahrbahndecken (Bk 100 bis 1,8 nach RStO 12) hinsichtlich ihrer Eignung für die Feuchtigkeitsklasse WS gutachterlich zu bewerten. Mit Hilfe der dabei genutzten Performance-Test-Verfahren bzw. WS-Grundprüfungen ist eine sichere Bewertung von reaktiven Gesteinskörnungen in den von Schäden betroffenen Regionen möglich, so dass der Einsatz dieser Materialien in Fahrbahndecken aus Beton und somit eine schädigende AKR vermieden werden kann. Mit Einführung des ARS sind die zuvor genannten Nachweisinstrumente nun auch in Regionen anzuwenden, aus denen nach Aussage der Länderverwaltungen keine Schäden bekannt sind. In einigen Fällen bestehen daher Diskrepanzen zwischen der Aussage der Länderverwaltungen und den Ergebnissen in den nun zu verwendenden Prüfungen (vgl. Bild 1). Einige Gesteine aus derartigen Vorkommen überschreiten z. B. den bisher verwendeten Grenzwert von 0,5 mm/m nach 10 Zyklen Wechsellagerung im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen mit einer 10 %igen NaCl-Lösung bzw. bei der entsprechenden FIB-Klimawechsellagerung. Auch die Abstufung der Ergebnisse aus dem Schnelltests nach ARS 04/2013 entsprechen nicht immer den Ergebnissen der Betonversuche (60 °C Betonversuch mit Wechsellagerung: siehe Bild 1 und Bild 2, z. B. Granit 1). Aufgrund derartiger Prüfergebnisse laufender Untersuchungen wurden oben genannte Gesteinsarten als nicht geeignet für den Einsatz in Fahrbahndeckenbetonen eingestuft, obwohl dies nach Aussage einiger Länderverwaltungen nicht notwendig wäre.

Für eine wirtschaftliche Nutzung von Gesteinsvorkommen gilt es einerseits, Schäden und Mängel an Bauwerken infolge unzureichender Qualität der Baustoffe zu vermeiden, jedoch andererseits keine überhöhten Anforderungen zu stellen, durch die brauchbare, preisgünstige Rohstoffe ausgeschlossen würden.

Vor diesem Hintergrund soll das Projekt grundlegende Erkenntnisse über das Verhalten verschiedener Gesteine unter den beschleunigenden Bedingungen innerhalb der AKR-Prüfverfahren generieren.

Aufgrund der Vielfalt an natürlich vorkommenden Gesteinstypen mit stark variierender chemischer und mineralogischer Zusammensetzung, auch innerhalb definierter Gesteinstypen und unterschiedlicher Gefüge, ist es nicht möglich, pauschale Aussagen zur Alkali-Reaktivität einzelner Gesteinsvorkommen ohne eine nähere Prüfung zu treffen. Die Vielfalt naturgegebener Variationen von Gesteinen gleichen Typs stellt für die Gutachter eine nicht zu unterschätzende Erschwernis dar, da zusätzlich zu den ingenieurtechnischen Aspekten auch

geomaterialwissenschaftliche Fakten zu beachten sind. So kann es bei der Prüfung unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Prüfverfahren in Einzelfällen zu scheinbar widersprüchlichen Ergebnissen kommen. Unklar ist in diesem Zusammenhang, wie solche Ergebnisse zu interpretieren sind, insbesondere vor dem Hintergrund noch begrenzter Erfahrungswerte. Weiterhin gilt es zu bewerten, inwiefern die beobachteten Effekte für die Praxis von Bedeutung sind oder ob diese ausschließlich auf die beschleunigenden Prüfverfahren zurückzuführen sind. Einerseits könnte es sich um untersuchungsbegleitende Prüfartefakte handeln, die durch Besonderheiten der Gesteinskörnung (chemische und mineralogische Zusammensetzung, Korngefüge, Freisetzung von Alkalien aus der Gesteinskörnung) unter diesen Prüfbedingungen verstärkte Dehnungen am Probekörper auslösen können. Diese müssen jedoch nicht zwangsläufig einer im Prüfkörper ablaufenden AKR zugeordnet werden. Andererseits kann auch ein tatsächliches AKR-Schädigungspotential vorhanden sein, welches durch die Prüfung erkannt und hinreichend bewertet werden muss.

Genau hier soll das geplante Forschungsvorhaben ansetzen. Es soll zu einem besseren Verständnis der Prüfmethoden führen und Antworten zu folgenden Fragen finden:

- Sind die derzeit genutzten Prüfverfahren für die Beurteilung der Alkaliunempfindlichkeit von Gesteinskörnungen innerhalb einer WS-Grundprüfung geeignet oder müssen einzelne Prüfparameter modifiziert werden?
- Welchen Einfluss üben die im Sinne einer Beschleunigung der Schadreaktion erhöhten Lösungskonzentrationen und Temperaturen aus? Wird der Schadmechanismus durch die gewählten Parameter lediglich beschleunigt oder wird der Mechanismus der Schädigung grundlegend verändert?
- Welche anderen nicht AKR-bedingten Mechanismen führen während der Prüfung ggf. ebenfalls zu Dehnungserscheinungen?
- Wie lassen sich die teilweise stark unterschiedlichen Dehnungsergebnisse von Gesteinskörnungen gleichen petrographischen Typs erklären?
- Welche Rolle spielt der Sand für die Schädigung?

Die durch das Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse sollen bei der zukünftigen Bewertung der Alkaliunempfindlichkeit von Gesteinskörnungen berücksichtigt werden und in geltende Regelwerke eingehen. Es soll gewährleistet werden, dass das bislang erreichte Sicherheitsniveau nicht verlassen wird ohne dabei jedoch brauchbare, lokal verfügbare Gesteinskörnungen auszuschließen.

AG Betontechnologie

7.4.5. Optimale Verdichtung Leichtverarbeitbarer Betone mit hoher Robustheit

Bearbeitung: D. Weger, M.Sc
Förderer: AiF / VDZ gGmbH

Um die Leistungsfähigkeit Leichtverarbeitbarer Betone (LVB) hinsichtlich der leichten Verdichtbarkeit bei gleichzeitig hoher Mischungsstabilität zu gewährleisten, müssen LVB an ihre Verarbeitungseigenschaften angepasst bedarfsgerecht verdichtet werden. Bei einer ungeplanten Überverdichtung kann es zum Bluten oder zur Sedimentation der groben Gesteinskörnung kommen. Dies kann die Qualität, die Festigkeits-, Verformungs- und Dauerhaftigkeitseigenschaften des Festbetons beeinträchtigen. Zur Wahl des Betrags einer solchen bedarfsgerechten Verdichtung liegen bislang jedoch nur wenige objektive Bewertungskriterien vor.

Das Ziel ist daher die Entwicklung objektiver Empfehlungen zur bedarfsgerechten Verdichtung der LVB in Abhängigkeit ihrer Verarbeitungseigenschaften, Bild 1.

Bild 1: Verarbeitungsklassen der LVB (schematisch)

Die Erarbeitung dieser Empfehlungen soll zunächst auf Basis rheologischer Kenngrößen erfolgen. Anschließend sollen die gewonnenen Erkenntnisse in ein praxistaugliches Konzept unter Verwendung einfach zu handhabender Verarbeitungstests transferiert werden. Dabei sollen die Konsistenz (z. B. Ausbreitmaß) und die Zähigkeit (z. B. Fließzeit) als Bewertungskriterien für die Verarbeitungseigenschaften der LVB herangezogen werden.

Aus den Untersuchungsergebnissen sollen schließlich praxisgerechte Arbeitshilfen für die Baustelle abgeleitet werden. Die Empfehlungen zur bedarfsgerechten Verdichtung sollen in Abhängigkeit der Verarbeitungseigenschaften sowohl den Betrag der Verdichtungsenergie als auch die Dauer der Verdichtung definieren. Die Auswahl der Verdichtungsmethode in Abhängigkeit der Frischbetoneigenschaften vermeidet Fehlanwendungen durch eine mangelhafte Verdichtung. Durch die Umsetzung der Anwendungsregeln in entsprechende Normen oder Richtlinien vermeiden die bauausführenden Firmen somit in Zukunft material- und verfahrensbedingte Bauschäden.

7.4.6. Optimierung von Grinding und Grooving von Betonfahrbahndecken

Bearbeitung: N. Klein, M.Sc.
Förderer: FFG / ASFINAG

Das Grinding (Schleifen) von Fahrbahndecken ist in Österreichischen Regelwerken bisher nur rudimentär beschrieben. Gleichzeitig steigt jedoch aufgrund der erhöhten Verkehrsbelastung der Anteil an Fahrbahnen in Betonbauweise und somit der zukünftig erforderliche Instandhaltungs- bzw. Instandsetzungsbedarf.

In diesem Vorhaben wird in Kooperation mit der Austrian Institute of Technology GmbH und der PMS-Consult GmbH durch Laboruntersuchungen, Monitoring von frisch durchgeführten Instandsetzungs-Grindings sowie einer Lebenszyklusbetrachtung der Maßnahme eine Empfehlung für die österreichische Richtlinie zur Erstellung dauerhafter Grindingoberflächen erarbeitet.

Im Rahmen der Laboruntersuchungen im cbm werden mit Gesteinskörnungen unterschiedlicher Petrografie Fahrbahndeckenbetone hergestellt. Diese werden mit jeweils drei verschiedenen Texturen versehen. Bei der ersten Textur wird eine reine Griffigkeitsverbesserung, bei der zweiten eine zusätzliche Verbesserung der Entwässerung und bei der dritten eine verbesserte Lärmreduzierung angestrebt. Die Texturen basieren auf einem vorrangegangenen Projekt bei denen die Eigenschaften der Texturen in Erprobungsstrecken untersucht wurden.

Die Fahrbahndeckenbetone werden im Rahmen dieses Projekts hinsichtlich ihres Widerstands gegen die wesentlichen, während der Nutzungsphase auftretenden Einwirkungen untersucht.

- Mechanische Belastung:
  Durch eine rein mechanische Polierbeanspruchung soll die maximal mögliche Schwächung der Textur beziehungsweise dessen Griffigkeit durch den Verkehr dargestellt werden.
- Frost-Tau(mittel)-Belastung:
  Hierbei wird die Texturbeständigkeit gegen winterliche Temperaturen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einwirkung von taumitteln (Winterdienst) quantifiziert.
- Kombinierte Belastung:
  Anhand eines kombinierten Zyklus aus Umwelteinwirkung, bestehend aus Frost- und Säurebelastung sowie Verkehrseinwirkung wird die Dauerhaftigkeit unter realitätsnahen Bedingungen simuliert, vgl. Bild 2.

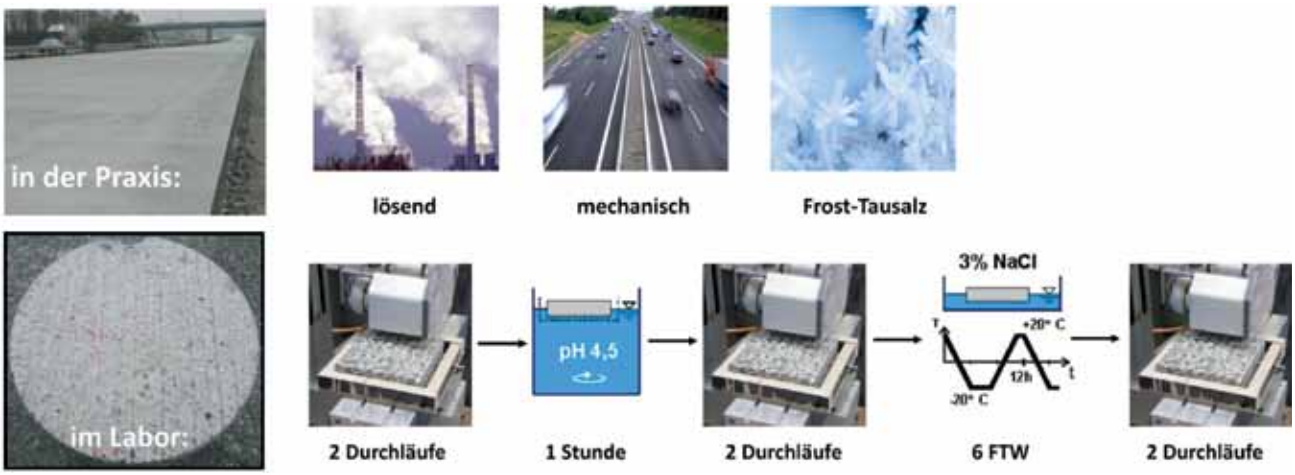


Bild 2: Kombinierte Belastung von Fahrbahndeckenbetonen in der Praxis (oben) und deren Simulation im Labor (unten)

Durch die Untersuchungen lässt sich die Langlebigkeit der Instandhaltungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahme und somit das Kosten-Nutzen-Verhältnis abschätzen. Durch die Einführung eines Regelwerks zur Herstellung von Grindingoberflächen lassen sich solche Maßnahmen von einem Bauherrn sicherer umsetzen. Somit lassen sich die Vorteile des Grinding, bestehend aus einer hohen Griffigkeit, guten Lärmminderungseigenschaften, verbessertem Fahrkomfort sowie Langlebigkeit besser umsetzen.

7.4.7. Rheometrische Quantifizierung der scherratenbezogenen Fließcharakteristik von PAE-verflüssigten Betonen

Bearbeitung: D. Weger, M.Sc.
Förderer: BASF

Für eine gute Betonqualität sind Verarbeitbarkeitseigenschaften wie die Pumpbarkeit, die Verdichtbarkeit, das Fließverhalten oder die Oberflächenbearbeitung von großer Bedeutung. Diese werden maßgeblich von der Viskosität der Betone beeinflusst. Je geringer die Viskosität ist desto besser sind die Verarbeitungseigenschaften. Aus diesem Grund wurden sog. Polyaryl-Ether-(PAE)-Fließmittel auf den Markt gebracht, die im Vergleich zu herkömmlichen PCE-Fließmitteln eine Verringerung der Viskosität bei gleichem Ausbreitmaß bzw. gleicher Fließgrenze ermöglichen sollen.

Ziel ist es, die Wirksamkeit der PAE-Fließmittel zur Reduzierung der Viskosität zementgebundener Systeme zu quantifizieren. Zu diesem Zweck werden rheometrischen Untersuchungen am Bindemittelleim, am Mörtel sowie am Beton durchgeführt.

Dabei soll berücksichtigt werden, dass jede betontechnologische Verarbeitungseigenschaft mit einer charakteristischen Scherrate verknüpft ist. Während für die Entlüftung des Betons Scherraten von ca. 10^{-3} - 10^{-2} s^{-1} charakteristisch sind, liegt die Scherrate bei Fließvorgängen im Bereich 10^{-1} – 10^{0} s^{-1} sowie beim Pumpen im Bereich 10^{1} – 10^{2} s^{-1}. Daher werden diese Scherratenbereiche gezielt im Rotationsrheometer mit einem Platte-Platte Messsystem (Leimphase) und einer Vane-Geometrie (Leim, Mörtel und Beton) untersucht. Es sollen sowohl verschiedene Feststoffgehalte (gesteuert über den w/z-Wert) als auch verschiedene Fließmitteldosierungen vergleichend für PCE- und PAE-Fließmittel untersucht werden.

AG Stahl und Korrosion

7.4.8. Materialermüdung von On- und Offshore Windenergieanlagen aus Stahlbeton und Spannbeton unter hochzyklischer Beanspruchung – Ermüdung von Betonstahl

Bearbeitung: Florian Hiemer, M.Sc.
Förderer: BMWE (PtJ)

Tragwerke für Windenergieanlagen (WEA) werden heutzutage entweder aus Stahl, aus bewehrtem Beton oder aus einer Mischung beider Werkstoffbereiche in Hybridbauweise hergestellt. Der Vorteil der im Verbundvorhaben betrachteten Stahlbeton- und Spannbetonbauweise (bewehrter Beton) liegt insbesondere darin, dass die Vorfertigung der Turmelemente und insbesondere deren Transportierbarkeit auch Nabenhöhen von mehr als 100 m ermöglichen, die für Anlagenleistungen von mehr als 2 MW notwendig sind.

Infolge der fortschreitenden Entwicklung von immer höheren und leistungsfähigeren WEAs bewegt sich die technische Bemessung der Anlagentürme aus bewehrtem Beton an der Grenze des derzeitigen Kenntnisstands. Ausschlaggebend hierfür sind vor allem die hochdynamischen Beanspruchungen der Tragwerke durch Wind und Wellen. I. d. R. für eine 20-jährige Nutzungsdauer bemessen, müssen diese Tragwerke mehrere Zehnmillionen Lastwechsel ertragen. Der Bereich von sehr hohen Lastwechselzahlen $N > 10^{7}$ ist aufgrund der erforderlichen Versuchszeiten weitgehend unerforscht. Ermüdungsfestigkeiten für eben diese sehr hohen Lastwechselzahlen wurden bisher aus den wenigen vorhandenen Daten extrapoliert. Die nach den derzeitigen Bemessungsnormen anzuwendenden Wöhlerlinien haben speziell in diesem Lastwechselbereich einen überwiegend hypothetischen Charakter, so dass hohe Sicherheitsreserven in das Bemessungskonzept integriert werden mussten.

In dem Vorhaben soll diese Lücke geschlossen werden. Durch neu generiertes Wissen über die Beton-, Betonstahl- und Verbundermüdung im Bereich sehr hoher Lastwechselzahlen soll die Grundlage für eine wirtschaftliche und sichere Nachweisführung von WEA-Tragstrukturen geschaffen werden, u. a. auch um die Vorteile neuer, auf dem Markt befindlichen Werkstoffe, z. B. hochfester Betone, für höhere und leistungsstärkere WEA zu nutzen. Der Schwerpunkt des Gesamtverbundvorhabens liegt in der wissenschaftlichen Beschreibung und der versuchstechnischen Ermittlung des Ermüdungsverhaltens von Beton, Betonstahl und deren Verbund im Bereich sehr hoher Lastwechselzahlen (Very-High-Cycle-Fatigue

Bereich, kurz: VHCF-Bereich mit $N > 10^7$). Das am Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung bearbeitete Vorhaben fokussiert den Materialbereich Betonstahl.

Im Zuge der Versuche sollen neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu materialspezifischen Teilaspekten der Ermüdung des Betonstahls gewonnen werden. Bestehende Wissenslücken insbesondere zur Übertragbarkeit von Ermüdung des Betonstahls auf die Ermüdung eines bewehrten Betonbauteils und zum Einfluss von Umweltbedingungen (z. B. gleichzeitig einwirkende korrosive Medien, Korrosionsermüdung) werden geschlossen. Der Lückenschluss soll u. a. durch Ermüdungsversuche im sogenannten VHCF-Bereich erfolgen. Dabei soll überprüft werden, inwieweit das derzeit bei Dauerschwingversuchen aufgebrachte Lastregime einschließlich der dahinter stehenden Bemessung mit Wöhlerlinien reale Beanspruchungen wirklichkeitsnah genug beschreibt (Zugschwell- bzw. Wechselbeanspruchung). Weitere Dauerschwingversuche (auch unter Wechselbeanspruchung), die unter gleichzeitig wirkender Korrosionsbeanspruchung durchgeführt werden, sollen eine für Offshore-Bauwerke erwartete und vermutlich auch maßgebende Beanspruchungskombination abbilden.

Eine Weiterverwertung der Forschungsergebnisse kann zur Entwicklung konkreter Praxishilfsmitteln und damit zu einer Umsetzung einer weiterentwickelten Bauweise führen. Das Verbundforschungsvorhaben schließt somit die Lücke zwischen Grundlagenforschung und Anwendung in der Praxis.

7.5. Ausgewählte Materialprüfung

AG Betontechnologie

7.5.1. Wechselwirkung von PCE- und PAE-basierten Fließmitteln mit Erstarrungsbeschleunigern auf Calciumnitratbasis

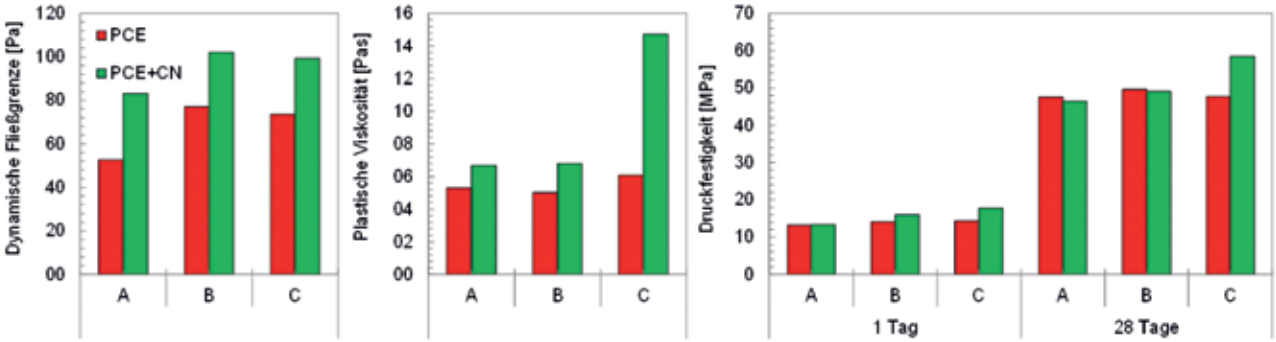
Calciumnitrat (CN) ist ein üblicher Erstarrungsbeschleuniger gemäß EN 934-2, Tabelle 6. In der Fachliteratur wurden von unserem Auftraggeber Hinweise gefunden, dass Calciumnitrat und einige Fließmittel, insbesondere Polycarboxylat-Ether (PCE) Synergien aufweisen, die sich sowohl auf die Frisch- als auch die Festbetoneigenschaften auswirken.

Wir wurden beauftragt, die Wechselwirkung von Calciumnitrat und mehreren kommerziell erhältlichen PCEs (A, B, C) in einer selbstverdichtenden Betonrezeptur, im Vergleich zum Beton ohne CN zu prüfen. Der Auftrag umfasste die Herstellung selbstverdichtender Betone mit vergleichbarem Setzfließmaß für die unterschiedlichen PCEs (ohne CN) sowie die Quantifizierung der Auswirkung der Zugabe des CN auf die Frischbetonrheologie. Dazu wurden die rheologischen Eigenschaften aller Betone (ohne und mit CN) in einem Vane-Rheometer bestimmt. Weiterhin wurden wir beauftragt, das Erstarrungsverhalten (Erstarrungsbeginn und -ende mit dem Vicat-Nadelgerät) sowie die Druckfestigkeit der selbstverdichtenden Betone (ohne und mit CN) im Alter von 1 und 28 Tagen zu bestimmen.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Interaktion von CN mit den PCEs produktspezifisch ist. Während die Zugabe des CN bei allen Betonen zu einem vergleichbaren Anstieg der Fließgrenze führte (Bild 1, links), kam es zu einer unterschiedlich stark ausgeprägten Variation der Viskosität. So besaß die Zugabe des CN bei einigen Betonen (A, B) lediglich einen geringfügigen Effekt auf die Viskosität, bei einem weiteren Beton (C) erhöhte sich die

Viskosität jedoch auf rd. den doppelten Betrag, Bild 1, mittig. Erwartungsgemäß kam es bei allen Betonen durch die Zugabe von CN zu einem beschleunigen Erstarren, unabhängig vom verwendeten PCE. Auch auf die Druckfestigkeitsentwicklung konnte ein produktspezifischer Einfluss festgestellt werden. Durch die Zugabe des CN erhöhte sich die Druckfestigkeit der Betone nach einem Tag für die verschiedenen PCEs zwischen 0 und 20 % (Bild 1, rechts). Nach 28 Tagen wies lediglich ein Beton (C) eine um rd. 20 % erhöhte Druckfestigkeit auf, die übrigen Betone verhielten sich mit und ohne Zugabe von CN vergleichbar, Bild 1, rechts.

Bild 1: Dynamische Fließgrenze (links), plastische Viskosität (mittig) und Druckfestigkeiten (rechts) der selbstverdichtenden Betone mit verschiedenen PCEs (A, B, C) ohne CN (PCE) sowie mit CN (PCE+CN)



7.6. Sonstiges

AG Stahl und Korrosion

7.6.1. Forschungsaufenthalt bei Prof. Alberto A. Sagüés an der University of South Florida

Frau Dr. Keßler konnte im Jahr 2016 einen achtmonatigen Forschungsaufenthalt bei Prof. Alberto A. Sagüés an der University of South Florida (USF) realisieren. Die University of South Florida ist eine staatliche Universität in Tampa im US-Bundesstaat Florida. Mit über 44.000 Studenten gehört sie zu einer der größten Universitäten in den USA.

Alle Fotos des Beitrags: Dr. Sylvia Keßler privat

Diese einmalige Erfahrung wurde durch ein Stipendium der University of South Florida und durch ein Forschungsstipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft ermöglicht. Der Forschungsschwerpunkt lag auf der Korrosionsschutzwirkung von epoxidharzbeschichteter Bewehrung (ECR) und der Korrosionsdetektion von ECR am Bauwerk.

In Florida ist die Dauerhaftigkeit von Meerwasserbauwerken von großer Bedeutung. Zusätzlich zum Meerwasser verstärkt das subtropische / tropische Klima in Florida jeden Schädigungsmechanismus. Aufgrund der geografischen Lage mit vielen vorgelagerten Inseln gibt es in Florida besonders viele Meerwasserbauwerke, von denen ca. 300 mit epoxidharzbeschichteter Bewehrung ausgeführt wurden. Besonders Bauwerke mit epoxidharzbeschichteter Bewehrung, z. B. Florida Key Bridges, zeigten unerwartet frühe Korrosionsschäden. Drei dieser Brücken der Florida Keys konnte Frau Dr. Keßler in Begleitung des Korrosionsteams der Florida Department of Transportation (FDOT) mitinspizieren. Vom Boot aus wurden die Stützen in der Wasserwechselzone untersucht und kathodische Korrosionsschutzsysteme auf ihre Funktionalität hin überprüft. Zum Glück mussten nur Kormorane und Pelikane und keine Alligatoren vertrieben werden.

Zusätzlich war Frau Dr. Keßler bei der vielversprechenden Pilotanwendung eines neuartigen Verfahrens zur Korrosionsdetektion von Stahlbetonbauwerken auf Basis der Kelvin Sonde dabei. Getestet wurde das Verfahren auf den Auslegern der alten Sunshine Skyway Bridge. Zugegen war auch der Chef der Korrosionsabteilung des FDOT, Ivan Lasa.

Die Erkenntnisse, die in Florida am Bauwerk und in der laufenden Forschung gewonnen wurden, können direkt in die Entscheidungsfindung für mögliche Anwendungen von epoxidharzbeschichteter Bewehrung in Europa und weltweit einfließen. Als ein Ergebnis der erfolgreichen Zusammenarbeit werden in dem gemeinsamen Paper „Extent of Cathodic Reaction on Epoxy Coated Rebar with Partially Disbonded Coating“ die neuen Erkenntnisse auf der NACE 2017 präsentiert. Weitere Zusammenarbeit und Veröffentlichungen sind in Planung.

Dr. Sylvia Keßler und Ivan Lasa

An dieser Stelle herzlichen Dank an Prof. Alberto A. Sagüés und an die Deutsche Forschungsgemeinschaft, ohne deren Unterstützung dieser Forschungsaufenthalt nicht möglich gewesen wäre. Ein besonderer Dank geht an das ganze Team von Prof. Sagüés, das mit Rat und Tat immer behilflich war, und an Prof. Sagüés für die stete Diskussionsbereitschaft und dass er seinen Erfahrungsschatz so bereitwillig teilt.

Prof. Alberto A. Sagüés mit Dr. Sylvia Keßler

8. Mitarbeit in Ausschüssen, Arbeitskreisen, Gremien und Fachkommissionen

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

TC CCH	„Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of concrete-reinforcing steels”	Keßler
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/Thiel
TC PSC	„Performance-based specifications and control of concrete durability”	Gehlen/Große
TC SCI	„Characteristics of the steel/concrete interface and their effect on initiation of chloride-induced reinforcement corrosion”	Gehlen

Comité Européen de la Normalisation (CEN)

TC 104/WG 4	Concrete and Related Products „EN 450 Fly Ash for Concrete”	Heinz
TC 104/SC 1/TG 5	Concrete and Related Products „Use of additions”	Heinz
TC 51/WG 12/TG 5	„Corrosion of Reinforcement”	Gehlen
ECISS/TC 104/ WG 1	„Weldable reinforcing steels”	Meyer
ECISS/TC 104/ WG 3	„Corrosion Resistant Reinforcing Steels”	Gehlen
ECISS/TC 104/ WG 4	„Prestressing steels”	Meyer
ISO TC 71/SC/WG 4	„Durability – Service Life Design of Concrete”	Gehlen
TC 154/SC 6/TG 11	„Test methods for general, geometrical, mechanical and physical properties of aggregates”	Neidinger
TC 154/SC 3	„Bituminous bound aggregates"	Westiner

fib (fédération internationale du béton)

Commission 3	„Existing concrete structures”	
T3.3	„Assessment/evaluation procedures for existing structures”	Gehlen/Keßler/
Commission 8	„Durability”	Gehlen
T8.6	„Calibration of Code deemed to satisfy provisions for durability”	Gehlen**

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton / DAfStb

TA	„Betontechnik“	Gehlen/Heinz
	AG „Dauerhaftigkeitsbemessung“	Gehlen*
	Ad hoc Gruppe „Sulfatwiderstand“	Heinz*
	UA UHPC	Heinz/Lowke
	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
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 005-07-15 AA	„Gesteinskörnungen“ (SpA zu CEN/TC 154/SC 1-5/WG 11 und SpA zu CEN/TC 227/WG 4)	Westiner
NA 005-07-24 AA	„Betonzusatzstoffe“ (Sp CEN/TC 104/WG 4, 9, 15)	Heinz*
NA 005-07-27 AA	„Betonangreifende Stoffe – DIN 4030“	Heinz
NA 005-10-10	„Asphalt“	Wörner
NA 062-01-71 AA	„Korrosion und Korrosionsschutz“	Keßler
NA 062-01-78 AA	„Kathodischer Korrosionsschutz“	Keßler
NA 062-03-13 AA	„Gesteinskörnungen; Prüfverfahren, Petrographie, Probenahme“	Neidinger
NA 062-03-32	„Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel“	Wörner

Sachverständigenausschüsse d. Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt)

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 „Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff“	Gehlen
PG	Projektgruppe „Sulfat-Widerstandsprüfung“	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

KOA Bau	Koordinierungsausschuss "Bau"	Westiner
AA 5.6	Grundbau	Westiner
AK 5.6.3	TL Gabionen	Westiner*
LA 6.0	Gesteinskörnungen, ungebundene Bauweisen	Westiner*
AA 6.1	Gesteinskörnungen	Westiner

AK 6.1.1	Polierresistenz und Polierprüfung	Westiner
AK 6.1.3	Füller- und Sandeigenschaften	Westiner
AK 6.1.2	Füller- und Sandeigenschaften	Westiner
AA 6.2	Industrielle Nebenprodukte und Recycling-Baustoffe	Westiner
AA 6.3	Schichten ohne Bindemittel	Neidinger
AK 6.3.1	Infiltrationsverfahren, Merkblatt für Schichten ohne Bindemittel	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	Prüfverfahren	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
AK 8.4.2	Akustisches Grinding	Skarabis
Kommentar-Gruppe	„Asphaltstraßen“	Wörner*
Kommentierungs-Gruppe	„Gesteinskörnungen, ungebundene Bauweisen und Präzision“	Westiner*

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

Meyer
Osterminski

Nationale Kontaktstelle NKS

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

DGZfP – Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung

FA	ZfP im Bauwesen, UA „Baugrunduntersuchungen“	Große
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Dauerüberwachung von Bauwerken“	Keßler
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Feuchte“	Große
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Impakt-Echo“	Große
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Korrosionsnachweis“	Keßler
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Ultraschallprüfungen“	Große
FA	Hochschullehrer ZfP	Große
FA	Schallemissionsprüfverfahren	Große
FA	Thermographie	Große
FA	ZfP in der Luftfahrt	Große
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Qualitätssicherung“	Große
FA	Faserkunststoffverbunde	Große

Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.

Gehlen
Heinz

Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. – GFKORR

AK	„Korrosion im Bauwesen“	Gehlen
AK	„Grundlagen und Simulation“	Keßler

DGEG (Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.

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

VDI/VDE-GMA

FA 2.12	Strukturanalyse und -überwachung i. d. Bautechnik	Große

GCTP – German Construction Technology Platform

	AG Networks	Große
	AG Cultural Heritage	Große
	AG Underground Construction	Große

American Concrete Institute (ACI)

Committee 215	"Fatigue of concrete"	Gehlen

American Society for Testing and Materials (ASTM international)

Committee A01	"Steel, Stainless Steel and Related Alloys"	Meyer

Baustoffüberwachungs- und Zertifizierungsverein Bayern – BAYBÜV – e.V., LG	Neidinger*
Bundesverband Windenergie (BWE)	Große
Deutsche Geophysikalische Gesellschaft (DGG)	Große
Deutsche Geologische Gesellschaft – Geologische Vereinigung (DGGV)	Westiner
European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE), Voting Member	Große
German Scholars Organisation (GSO)	Große
TAA Sand und Kiesindustrie / Natursteinindustrie	Wörner/Westiner

Gutachtertätigkeit

Alexander von Humboldt-Stiftung	Große
Austrian Science Fund (FWF)	Gehlen
BASt – AKR-Empfindlichkeit von Gesteinskörnungen im Straßenbau	Heinz
Carl Zeiss Stiftung (Wissenschaftler-Rückkehrprogramm GSO/CZS)	Große
Chinesisch-Deutsches Zentrum für Wissenschaftsförderung	Heinz
Croatian Science Foundation (CSF)	Große
DFG – Fachkollegium Bau	Gehlen/Große/Heinz
DFG – Fachkollegium Maschinenbau	Große
Estonian Research Council (ETAG)	Gehlen
Fraunhofer Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst Mach Institut	Große
Fund for Scientific Research – FNRS, Brüssel, Belgien	Große
FWO, Fonds Wetenschappelijk Onderzoek (Research Foundation in Flandern), Brüssel, Belgien	Große
German Scholars Organisation (GSO)	Große
Land Thüringen / Thüringer Aufbaubank	Heinz
MIT Massachusetts Institute of Technology; ”Sustainability of Kuwait’s Built Environment”	Große
Netherlands Organization for Scientific Research (NWO)	Gehlen/Heinz
Österreichische Forschungsförderungsges.mbH, Wien, Österreich	Große/Heinz/ Westiner/Wörner
Studienstiftung des Deutschen Volkes, Bonn	Gehlen/Große
Swiss National Science Foundation (SNF)	Gehlen/Heinz
Wissenschaftsrat der Bundesrepublik Deutschland	Große

* = Obmann / ** = Chairman

9. Dissertationen

9.1 Laufende Dissertationen

AG Bindemittel und Zusatzstoffe (Betreuung Prof. D. Heinz)

Ying Wang, M.Sc. seit 01.07.2011	Hydratations- und Erhärtungsmechanismen der wasserbeständigen Bindemittelmischungen auf Gipsbasis
Kai Fischer, M.Sc. seit 15.05.2012	Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen in Beton unter beschleunigenden und praxisgerechten Bedingungen
Linda Irbe, M.Sc. seit 01.10.2013	Die Rolle des Aluminiums in C-A-S-H bei chemischem Angriff auf Beton
Matthias Wagner, M.Sc. seit 15.01.2016	Expansionsspannung beim Sulfatangriff auf Beton – Einfluss von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen

AG Betontechnologie (Betreuung Prof. C. Gehlen)

Jens Skarabis, Dipl.-Ing. seit 01.05.2006	Anwendung der Mikroindentation zur Beurteilung der Gefügeeigenschaften von Straßenbetonen
Thomas Kränkel, Dipl.-Ing. seit 15.04.2007	Nichtlinear viskoelastisches Deformationsverhalten von Verbunddübeln in Abhängigkeit der Belastungsdauer und -höhe
Charlotte Thiel, Dipl.-Ing. seit 01.04.2008	Einfluss von CO_2-Druck und Betonfeuchtegehalt auf das Porengefüge von Beton während der Carbonatisierung
Sandy Illguth, M.Sc. seit 01.05.2009	Faserbewehrter Feinkornbeton für filigrane Betonfertigbauteile
Daniel Weger, M.Sc. seit 01.01.2014	Additive Fertigung im Bauwesen

AG Stahl und Korrosion (Betreuung Prof. C. Gehlen)

Florian Hiemer, M.Sc. seit 25.11.2013	Korrosionsverhalten von Stahl in gerissenem chloridbelasteten Beton bei Anwendung des Instandsetzungsprinzips W-Cl
Elke Ziehensack, M.Sc. seit 01.04.2016	Diffusionspotentiale

AG Chemie (Betreuung Prof. D. Heinz)

Tobias Gutberlet, M.Sc. seit 01.02.2009	Hydratation der Calciumsilikate

Marco Decker, M.Sc. seit 01.10.2016	Optimierung der Laserablations-ICP-MS für Untersuchungen an zementgebundenen Bauwerkstoffen

AG Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine (Betreuung Prof. C. Gehlen)

Thomas Patzak, Dipl.-Ing.(FH) seit 01.10.2007	Entwicklung einer praxisgerechten Probenvorbehandlung zur Griffigkeitsprognose

AG Zerstörungsfreie Prüfung (Betreuung Prof. C. Große)

Robin Groschup, Dipl.-Geophys. seit 01.10.2011	Luftgekoppelte Impakt-Echo Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Beton
Fabian Malm, M.Sc seit 01.01.2013	Zerstörungsfreie Prüfung von Beton mit Selbstheilungseigenschaften
Manuel Raith, M.Sc. seit 01.01.2014	Zustandserfassung und Dauerüberwachung an Windenergieanlagen zur optimierten Betriebsführung
Philipp Jatzlau, Dipl.-Ing. seit 01.12.2014	Eskalationsmodelle für die numerische Simulation zerstörungsfreier Prüfverfahren auf Basis elastischer Wellen
Max Botz, M.Sc. seit 01.01.2015	Structural-Health-Monitoring der Tragstruktur von Windkraftanlagen

externe Promotionen

Martin Radlmeier, Dipl.-Phys. seit März 2011	Acoustic emission on CFRP-structures
Denis Kiefel, Dipl.-Ing. seit 01.05.2012	Quantitative CFRP Porosity Characterization Using µ-Computed Tomography
Peter Föhr, Dipl.-Ing. seit 08.12.2012	Combined mechanical loading and ultrasonic evaluation of articular cartilage
Christian Geiss, M.Sc. seit 01.04.2013	Entwicklung eines integrierten holistischen Instandhaltungssystems für Windenergieanlagen
Sebastian Heckner, Dipl.-Ing. seit 01.09.2013	Erweiterte zerstörungsfreie Prüfmethoden für strukturelle Klebungen
Jan-Carl Grager, M.Sc. seit 01.05.2014	Datenfusion für multi-modale zerstörungsfreie Prüfung auf Basis von statistischen Ansätzen

Bernhard Wondra, Dipl. Ing. seit 22.01.2015	Drahtloses Monitoring der Tragstruktur von Windenergieanlagen
Michael Mosch, Dipl.-Inf. Dipl.-Ing. seit 09.03.2015	Automatisierte Bewertbarkeit zerstörungsfreier Prüfsituationen mittels eines generischen Modells
Julia Frisch, M.Sc. Dipl.-Phys. seit 01.11.2015	Quantitative Methoden zur Auswertung thermografischer Prüfdaten

Exzellenzzentrum am Campus Garching (rechts) mit der TUM-GS Geschäftsstelle (Bild: Astrid Eckert)

9.2 Dissertation Fact Sheets

9.2.1 The Role of Aluminium in C-A-S-H during Chemical Attack on Concrete

Name: Linda Irbe
E-Mail: linda.irbe@tum.de
Supervisor: Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz
Chair of Mineral Engineering

Started: 10/2013
Status: ongoing

Introduction

Concrete structural components are exposed to attack by solutes such as sulphates, alkalis, acids, chlorides or atmospheric CO2. This reduces the service life of exposed concrete resulting in high costs for restoration or replacement. Dissolution and precipitation processes lead to changes in the phase composition of the hardened binder material and ultimately deterioration in the strength and stability of the components.

The current trend towards higher proportions of aluminium-rich supplementary cementitious materials (SCMs), such as fly ash, ground granulated blast-furnace slag and metakaolin is environmentally beneficial [1]. However, this means an increased aluminium content in the binder compared to pure Portland cement.

The properties of the strength-giving C-S-H phases are of primary importance regarding concrete durability. The incorporation of aluminium from SCM into C-S-H, as well as its dissolution out of C-A-S-H, plays a significant role in the resistance of concrete to chemical attack. Although the development of crystalline phases during chemical attack has been extensively studied experimentally and with thermodynamic simulations [2-5], the role of C-(A)-S-H is not well understood.

Experimental

The first part of the study focuses on the synthesis and characterization of C-A-S-H phases using various techniques. In addition to the direct synthesis of C-A-S-H, which essentially simulates its formation during the early hydration of clinker minerals, the subsequent (indirect) aluminium incorporation into C-S-H reproduces C-A-S-H formation on the release of aluminium from the later reaction of pozzolanic additions.

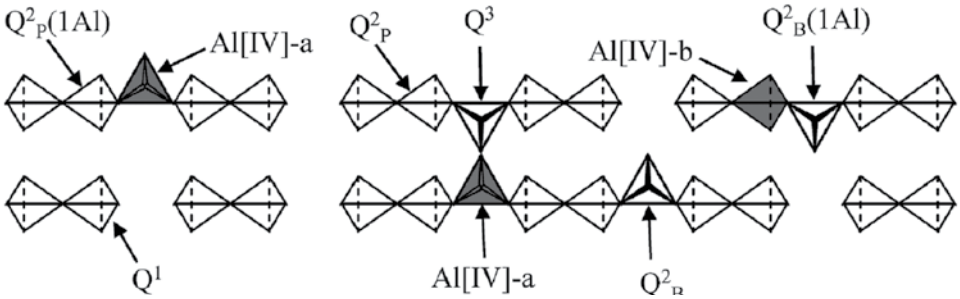


Figure 1: Scheme of the alumina-silicate chains in the C-A-S-H structure [6].

The relationships between the nanostructure of C-A-S-H (Al content, average chain length, Al/Si and Ca/Si ratios, alkali content) (Fig.1) and the chemical composition of the pore

solution (concentrations of Ca, Si, Al, alkalis; pH) are investigated using XRD, NMR and chemical analysis.

In the second part of the research project, storage tests with Na2SO4, NaCl and HCl solutions provide new findings on changes in the C-A-S-H nanostructure during chemical attack. Particular attention is paid to the availability and stability of aluminium and alkalis during sulphate attack, damaging alkali-silica reaction, carbonation and acid attack.

References

[1] Habert, G., et al., Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. Cement and Concrete Research, 2010. 40(5): p. 820-826.

[2] Haha, M.B., et al., Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag — Part II: Effect of Al2O3. Cement and Concrete Research, 2012. 42(1): p. 74-83.

[3] Blanco-Varela, M.T., J. Aguilera, and S. Martínez-Ramírez, Effect of cement C3A content, temperature and storage medium on thaumasite formation in carbonated mortars. Cement and Concrete Research, 2006. 36(4): p. 707-715.

[4] Dressler, A., L. Urbonas, and D. Heinz, Effect of alkali ingress and binder composition on damaging ASR, in 14th Internat. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction. 2012: Austin.

[5] Müllauer, W., R.E. Beddoe, and D. Heinz. Mechanisms of sulfate attack for plain and fly ash cements at different storage temperatures and sulfate concentrations. in ICDC - Int. Congr. Durability of Concrete. 2012. Trondheim.

[6] Pardal, X., et al., 27Al and 29Si Solid-State NMR Characterization of Calcium-Aluminosilicate-Hydrate. Inorganic chemistry, 2012. 51(3): p. 1827-1836.

9.2.2 Additive manufacturing in civil engineering

Name:	Daniel Weger, M. Sc.
E-Mail:	daniel.weger@tum.de
Supervisor:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
	Chair of Materials Science and Testing
Started:	11/2015
Status:	ongoing

Motivation

For economic and ecological reasons civil engineers try to construct highly material-saving structures. One way is to use the principal “form follows force” to build bionic-optimized components. Because of their unique shape, the production of these components, using conventional construction techniques, leads to high costs. However, additive manufacturing methods (“3D printing / 3DP”) can produce free form structures without formwork or other special tools. With 3DP methods, the production costs become independent of quantity and complexity of the produced components [1]. Therefore, 3DP is predestined for producing components with individual shape like bionic structural elements. However, unlike in other industries additive manufacturing methods are not state-of-the-art in civil engineering. Therefore, 3DP is nowadays more and more focussed in research and pilot projects.

This doctoral thesis investigates the basics of production of free form concrete structures and the appropriate materials for an application of additive manufacturing methods in concrete construction.

Process description

There are mainly two techniques which are used for 3DP of concrete structures: extrusion and selective binding. Both methods generate a component layer by layer based on a computer model. The extrusion technique uses already mixed concrete which is pressed though a nozzle for a fast production of great elements such as walls. In contrast to extrusion the selective binding technique applies a thin layer of a dry material followed by a local application of a fluid for hardening (see Fig.1) which facilitates to produce overhanging structures only by support of the unhardened dry material.

The selective binding technique is already implemented in a self-designed, semiautomatic 3D printing set-up (see Fig. 2).

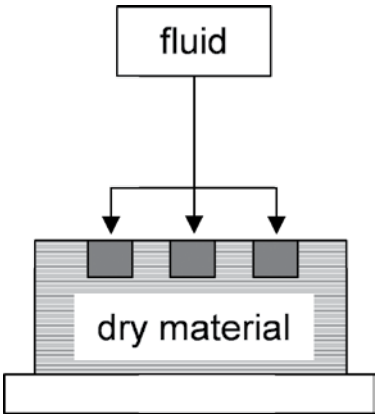


Figure 1: selective binding method

Figure 2: 3D printing set-up for selective binding objective targets

Goal of the research is the development of the technical principles regarding material as well as process technology. Target values are high contour precision for an accurate shape, high strength, high durability and fast construction speed.

For the selective binding method a high penetration depth of the fluid should be achieved for increasing the layer thickness and production speed controlled by the material properties of the fluid and the dry material.

For the extrusion method among others the density of the concrete is focused to produce light weight structures with high strength. By using this material complex overhanging elements can be produced more easily. In contrast to the selective binding method extrusion can so far generate overhanging components only with help of supporting structures. Another advantage would be to get simultaneously high heat-insulating elements.

Shape accuracy and production speed can be controlled by the flow properties of the fluid and the concrete. Therefore the rheological properties are measured and connected the contour precision and the production speed. At the end of this research both methods should be thus far investigated to put them into praxis by use of prototypes produced together with an industrial partner.

References

[1] M. F. Zäh, Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien – Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren, München: Hanser, 2006.

9.2.3 Corrosion behaviour of steel in cracked chloride-contaminated concrete using the repair procedure W-Cl

Name: Florian Hiemer, M.Sc.
E-Mail: florian.hiemer@tum.de
Supervisor: Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Chair of Materials Science and Testing

Started: 2017
Status: ongoing

Motivation

Even if properly designed, crack formation in reinforced concrete (RC) structures is inevitable to activate the reinforcements' full tensile capacity. In car parks these cracked RC surfaces are particularly endangered during winter. Cracks allow a locally limited but rapid ingress of aggressive agents like chlorides which accumulate in the crack area. When they exceed a critical chloride content the crack crossing reinforcement is locally depassivated. This discrete depassivation promotes the formation of macro-cell corrosion, in which the anodic and cathodic sub-processes are spatially separated (Figure 1).

Figure 1:
Chloride induced corrosion pit

Therefore, German standards demand further measures to permanently protect such structures from chloride ingress. The DBV Bulletin "multi-storey "or underground car parks" [1] provides various design principles for the construction of these RC" surfaces, one of which is a crack-bridging surface protection coating (SPC) of the RC surface (repair procedure W-Cl). The coating avoids further intake of water and corrosion promoting agents, minimizing the risk of depassivation as well as reducing the moisture content of the concrete. Due to the increasing resistances, the corrosion rate is expected to be reduced to technically tolerable extents. The DBV Bulletin [1] recommends to coat the concrete surface after crack formation is finished. A potentially initiated corrosion process is not expected to endanger the load bearing capacity of the structure in future.

The aim of this doctoral thesis is to investigate the effect of an applied SPC on the corrosion process in cracked concrete after a short-term chloride exposure, with respect to the provided design principles given in [1]. Especially in cracked concrete, the decisively influencing factors (e.g. moisture content, critical chloride content) on chloride corrosion can scatter widely, making it necessary to consider laboratory and practical experiments as well as numerical studies.

Experimental description

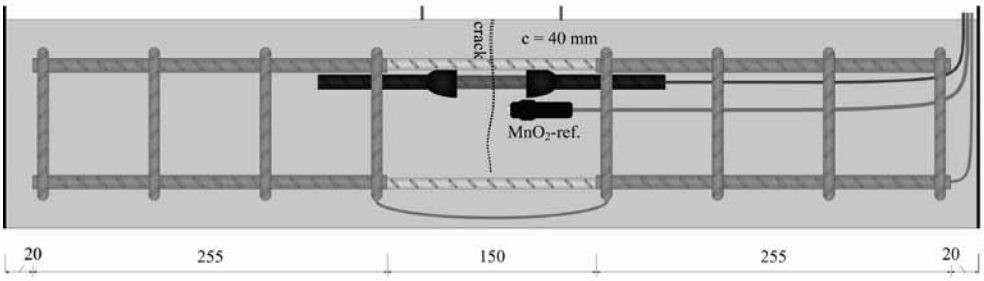
In order to reproduce the structural situation of a multi-storey car park in laboratory investigations reinforced concrete specimens with different crack types (bending an separating cracks) orthogonal to a depassivating anode bar are used (Figure 2).
Anode bar and cathode cages are electrically separated to assess all electrochemical parameters on each half cell individually, making it possible to measure macro element cur-

rents, open circuit potentials, polarisation resistances and the electrolytic resistance of the concrete. After a short term chloride exposure the surface of the specimens is sealed with a SPC to investigate the influence of the SPC on all electrochemical parameters and therefore on the corrosion activity. Subsequently, the parameters are used to numerically investigate structural components.

Furthermore the dominating mechanisms influencing the corrosion activity when an SPC is applied are determined. By continuously extracting chloride profiles the chloride redistribution due to the SPC is analyzed and then projected via numerical studies. On other specimens electrochemical measurements are used to determine the formation of oxidation products, whereas on further specimens the ratio of micro- to macro-corrosion is quantified.

The installation of a monitoring system comparable to the laboratory specimens in real RC components of three car parks allows for a validation of the laboratory results.

Figure 2:
Setup of the specimens, [mm]



At the end of the research, the limit boundary conditions (crack geometry, chloride content before the repair measure, moisture content of the concrete, significance of micro corrosion) will be determined, which allow for a successful application of a SPC to increase the durability of RC surfaces which are directly driven upon.

References

[1] DBV German Society for Concrete and Construction Technology 2010. DBV Bulletin: Multi-storey and Underground Car Parks.

9.2.4. Non-destructive testing of construction materials

Name: Manuel Raith
E-Mail: manuel.raith@tum.de
Supervisor: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Geophys. Christian U. Große, Chair of Non-Destructive Testing
Started: 01/2017
Status: ongoing

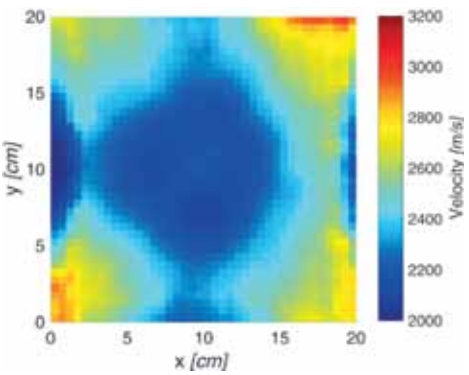
Introduction

Non-destructive testing methods are used for a long time in the field of mechanical engineering. In civil engineering however the development of practical methods has started in the late 1980s. The on-going development of micro electronic systems and computational

power has made it possible to produce handheld radar and ultrasound systems which can be used on construction sites and laboratory. Most applications are the identification and localization of voids and construction details like grouts for prestressing tendons. Nevertheless some applications are not yet widely used. For example the determination of the dynamic modulus of elasticity or three dimensional degradation evolution is not available for commercial use. Especially elastic waves in the form of ultra sound or other frequencies show a great potential for these applications.

Ultrasound tomography

In order to evaluate sub crater alteration in laboratory scale impact experiments an ultrasound tomography system is developed. Figure 1 show a cross-section obtained from a sandstone impact target at two centimetre depth below the impact surface. Using a semi three dimensional measurement of the impact target we were able to map the damaged volume and to derive a relation between epicentral distance and the degree of damage. Furthermore a relation between impact energy and damage volume has been derived. The results are compared with numeric simulations and natural crater structures. On-going work addresses the automation of the tomographic measurements in order to enhance resolution and measurement speed.



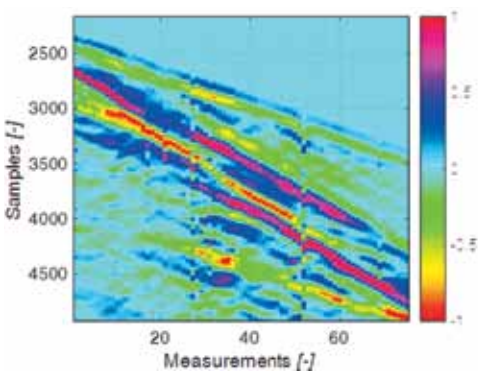


Figure 1 (l.): Cross-section obtained by ultrasound tomography measurements.

Figure 2 (r.): Recorded wave field obtained from mortar specimen.

Dynamic modulus of elasticity

The determination of elastic properties by using ultra sound measurements is in use in narrow applications. An example is observing the setting process of mortar and concrete. Due to the need for determine the longitudinal and transversal wave velocity the proposed methods are restricted to specific specimen geometries. This restriction also applies for modal analysis approaches. To overcome this short-falling an automated measurement for the two different wave velocities is developed. Preliminary results are compared with results from modal analysis and show correlation. Future developments will expand the measurement method to arbitrary geometries and pre-fabricated shell-structures.

References

[1] Raith, M., Grosse C.U., 2016. "Ultrasound tomography on hyper velocity impact targets." 19th World Conference on Non-Destructive Testing, Munich

9.3 Beendete Dissertationen

9.3.1 Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung

Name:	Amir Rahimi
E-Mail:	amir.rahimi@baw.de
Beginn:	2011
Ende:	2016
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz (TU München)
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen (TU München)
	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit (TU Kaiserslautern)
	Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine (TU Dresden)

Die derzeitige Normung (DIN EN 206 / DIN 1045-2 / DIN EN 1992-1/NA) regelt die Dauerhaftigkeit neu zu errichtender Betonbauwerke deskriptiv durch die Einhaltung von bestimmten, auf Erfahrungswerten beruhenden Mindestanforderungen an Betonzusammensetzung und Betondeckung. Eine leistungsbezogene Bewertung nach dem Performance-Konzept, wie bei der Tragwerksbemessung, ist nicht gegeben. Dem zuverlässigkeitsbezogenen Konzept der *DIN EN 1990:2010* wird nicht Folge getragen.

An bestehenden Bauwerken gesammelte Erfahrungen und Erkenntnisse zeigen, dass mit dem aktuellen deskriptiven Normungsansatz die angestrebten Nutzungsdauern hinsichtlich chloridinduzierter Betonstahlkorrosion nicht in jedem Fall mit ausreichender Wahrscheinlichkeit erreicht und teilweise sogar deutlich verfehlt werden. Leistungsbezogene Dauerhaftigkeitsbemessungen mit vollprobabilistischen Berechnungen (z. B. *Gehlen et al. 2008, fib bulletin 76:2015*) weisen gleicherweise nach, dass für Bauwerke unter Chlorideinwirkung das normativ beabsichtigte Sicherheitsniveau durch die Einhaltung der deskriptiv gestellten normativen Anforderungen an Material- und Bauteilwiderstand zum Teil nicht erreicht wird.

Leistungsbezogene Entwurfsverfahren dürfen nach *DIN EN 206:2014* (nur) im Zusammenhang mit einem bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis angewendet werden. Das einzig verfügbare geregelte Instrument zur Bemessung von der Chlorideinwirkung ausgesetzten Bauteilen ist das in *BAW-Merkblatt 2012 „Chlorideindringwiderstand“* beschriebene Laborprüfverfahren Schnellchloridmigrationsversuch mit den dort vorgegebenen pauschalen Abnahmekriterien. Die Bewertung erfolgt dabei lediglich aufgrund des im frühen Alter ermittelten Materialwiderstands. Das entscheidende Langzeitverhalten des Materials bleibt unberücksichtigt, genauso die expositionsbedingten Gegebenheiten und die Konstruktion des Bauteils. Die vollprobabilistischen Bemessungskonzepte (insbesondere in *fib bulletin 34:2006: fib Model Code for Service Life Design*) ermöglichen eine begründete Dauerhaftigkeitsbemessung, sie sind jedoch aufwendig und benötigen gesonderte Fachkenntnisse und spezielle numerische Software. Einfache Instrumente für Ingenieure und Sachkundige Planer sind nicht vorhanden.

Bei der Beurteilung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke unter Dauerhaftigkeitsaspekten ohne bzw. nach Ausführung von Instandsetzungsmaßnahmen sind die deskriptiven Ansätze zumeist nicht ausreichend bzw. mangels entsprechender Informationen zur Zusammensetzung der Baustoffe nicht anwendbar; praxisgeeignete Bemessungsverfahren auf Performance-Basis stehen nicht zur Verfügung.

In dieser Doktorarbeit wurden Nachweiskonzepte entwickelt, um eine transparente und leistungsbezogene Bemessung und Bewertung von Stahlbetonbauten unter dem dauerhaftigkeitsrelevanten Aspekt „chloridinduzierte Betonstahlkorrosion“ bei der

- Errichtung von Neubauten,
- Abschätzung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke und
- Instandsetzung mittels Betonersatz

zu ermöglichen. Damit wird das zuverlässigkeitsbezogene Konzept der DIN EN 1990:2010 umgesetzt und den dort vorgegebenen Sicherheitsanforderungen Folge getragen.
Die Nachweiskonzepte wurden jeweils auf vollprobabilistischer Ebene entwickelt und beschrieben, mit der Erarbeitung von Teilsicherheitsbeiwerten in ein semiprobabilistisches Format überführt und durch Erstellung von Nomogrammen für die praktische Anwendung vereinfacht (Abbildung 1).

Abbildung 1: Nachweisformate und ihr Zusammenhang

Die Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung mit Nomogrammen erfolgt für zwei verschiedene Sicherheitsanforderungen (β_0 = 1,5 und 0,5) unter Berücksichtigung der erwarteten / vorhandenen Einwirkung (Expositionsklasse und Chloridangebot), des im Labor oder am Bauwerk ermittelten Materialwiderstands, der erforderlichen / gewünschten / vorhandenen Betondeckung und der vorgesehenen Nutzungsdauer. Ein Bemessungsnomogramm ist beispielhaft in Abbildung 2 dargestellt.

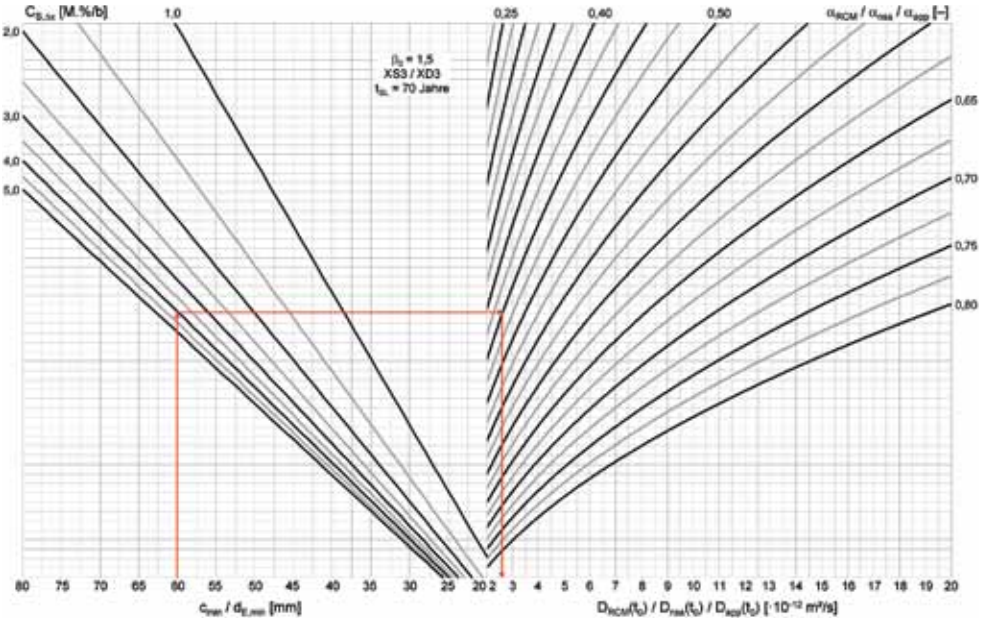


Abbildung 2: Bemessungsnomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer t_{SL}=70 Jahre, Zielzuverlässigkeit b_0=1,5, 2 ≤ $D(t_0)$ ≤ 20 • 10^{-12} m²/s

Der potentielle Chlorideindringwiderstand des Bauteils kann durch die in dieser Arbeit entwickelten Methoden ermittelt werden, die die Verschiedenartigkeit der Materialien (herkömmliche Betone, neue Materialien), den Informationsstand (Zusammensetzung des Materials, Datengrundlage aus Labor- oder Bauwerksuntersuchungen etc.), den realisierbaren Zeit- und Kostenaufwand und die notwendige Zuverlässigkeit berücksichtigen.

Die erarbeiteten praxistauglichen Instrumente ermöglichen für alle am Baugeschehen beteiligten (Planer, Produkthersteller, Ausführer, Bauherr etc.) ein transparentes Umgehen mit der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken.

Amir Rahimi mit (v. l.) Prof. Viktor Mechterine, Prof. Christoph Gehlen, Prof. Wolfgang Breit, Prof. Detlef Heinz am Tag seines Rigorosums, 10.06.2016 (Foto: Kai Osterminski)

9.3.2. Zur quantitativen Bewertung des Korrosionsschutzpotentials epoxidharzbeschichteter Bewehrung

Name:	Marc Zintel
E-Mail:	zintelmarc@gmail.com
Beginn:	2010
Ende:	2016
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz (TU München)
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen (TU München)
	Prof. Dr. Bernhard Elsener (ETH Zürich)

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. Bei der chloridinduzierten Korrosion unterscheidet man grundsätzlich zwischen einer Einleitungs- und einer Schädigungsphase. Das Ende der Einleitungsphase beschreibt die Korrosionsinitiierung, bei der eine bestimmte kritische Chloridkonzentration bei ECR in der Fehlstelle erreicht wird. Mit dem experimentellen Nachweis zunehmender kritischer Chloridgehalte bei abnehmender Fehlstellengröße von ECR (siehe Abbildung 1) konnte eine verlängerte Einleitungsphase gegenüber unbeschichtetem Betonstahl (BSt) quantifiziert werden. Betrachtet man auch den Korrosionsprozess setzt sich dieser anteilig aus Makro- und Mikrozellkorrosion zusammen. Anhand in Lösung und Beton durchgeführter Makrokorrosionsversuche (ECR-Serien mit unterschiedlichen Fehlstellenflächen vs. BSt) wurden über die Versuchsdauer Parameter für ein Makrokorrosionsmodell bestimmt.

Zur Bestimmung der Modellparameter wurden elektrochemische Untersuchungen sowie numerische Simulationen durchgeführt. Das Korrosionsmodell wurde anschließend über gemessene Korrosionsströme erfolgreich validiert und entscheidende Modelleinflussgrößen quantifiziert. Aufgrund stark reduzierter Makrokorrosionsraten bei ECR, ist von einem hohen Mikrokorrosionsanteil auszugehen. Der gesamte Masseverlust von ECR aus Makro- und Mikrokorrosion wurde nach Versuchsende mittels Konfokal-Mikroskopie bestimmt. Der ermittelte gesamte Masseverlust von ECR war erheblich kleiner als der Masseverlust von BSt infolge reiner Makrokorrosion.

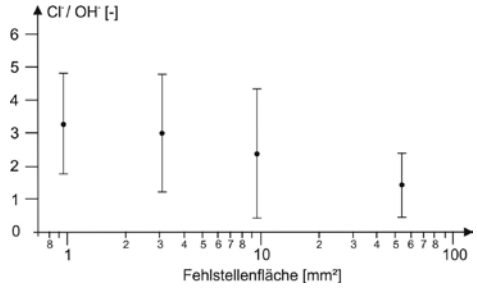


Abbildung 1: Kritischer Chloridgehalt in Abhängigkeit der Fehlstellengröße von ECR (Mittelwerte und Standardabweichung)

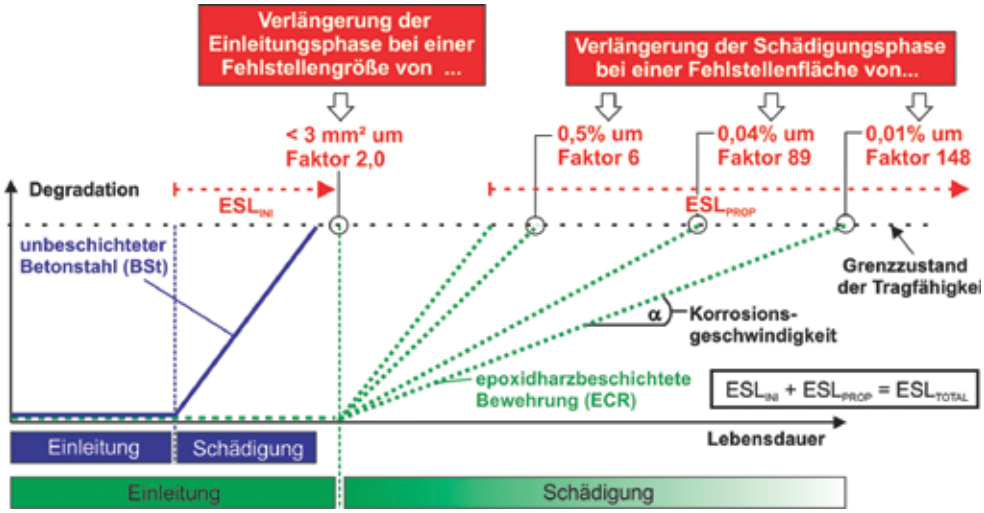


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Vorteile von ECR gegenüber BSt hinsichtlich einer verlängerten Lebensdauer getrennt nach Einleitungsphase (ESLINI) und Schädigungsphase (ESLPROP)

Der erbrachte quantitative Nachweis zur Wirksamkeit von ECR mit tolerierbaren Fehlstellen (siehe Abbildung 2) eröffnet neue Anwendungsfelder im Stahlbetonbau, wo höchste Ansprüche an die Dauerhaftigkeit auch unter aggressiven Umgebungsbedinungen gestellt werden.

v.l.: Prof. Heinz, Prof. Gehlen, M. Zintel, Prof. Elsener am Tag des Rigorosums, 20.06.2016

10. Liste aller Veröffentlichungen

Prof. Christoph Gehlen

Gehlen, C.:
Inter National
Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 111, 2016, S. 187, Wiley-Blackwell

Gehlen, C.; Mayer, T. F.; Schießl-Pecka, A.:
Monitoring und Instandhaltung instandgesetzter Bauwerke.
Bauwerkserhaltung – Instandsetzung im Beton- und Stahlbetonbau, 12. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 10.03.2016

Gehlen, C.; Osterminski, K.; Weirich, T.:
High-cycle fatigue behaviour of reinforcing steel under the effect of ongoing corrosion.
Structural Concrete, 01.08.2016

Greve-Dierfeld v., S.; Gehlen, C.:
Performance based durability design, carbonation part 1 – BENCHMARKING OF EUROPEAN PRESENT DESIGN RULES.
Structural Concrete, 01.07.2016, Wiley-Blackwell

Greve-Dierfeld v., S.; Gehlen, C.:
Performance based durability design, carbonation part 2 – CLASSIFICATION OF CONCRETE.
Structural Concrete, 01.09.2016, Wiley-Blackwell

Greve-Dierfeld v., S.; Gehlen, C.:
Performance based durability design, carbonation part 3 – PARTIAL SAFETY FACTOR (PSF) APPROACH AND A PROPOSAL FOR THE REVISION OF DEEMED-TO-SATISFY RULES.
Structural Concrete, 01.09.2016, Wiley-Blackwell

Hiemer, F.; Keßler, S.; Gehlen, C.:
Development of chloride induced reinforcement corrosion in cracked concrete after application of a surface protection system.
In: Proceedings Concrete Solutions 2016, 6th International Conference on Concrete Repair, 20.-22.06.16, Thessaloniki, Greece

Keßler, S.; Gehlen, C.:
Reliability of corrosion detection in reinforced concrete structures – impact of the half-cell potential evaluation.
IALCCE 2016, Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems
16.-19.10.2016, Delft University, Delft, NL
ISBN 978-1-138-02847-0

Keßler, S.; Gehlen, C.:
Influence of concrete moisture condition on half-cell potential measurement.
5th International Conferene on the Durability of Concrete Structures (ICDCS), June 30 – July 1, 2016
Shenzhen, Guangdong, China

Keßler, S.; Angst, U.; Zintel, M.; Elsener, B.; Gehlen, C.:
Epoxy-coated reinforcement in concrete structures: Results of a Swiss pilot project after 24 years of field exposure.
Materials and Corrosion 67, 03/2016, pp. 631-638

Kränkel, T.; Lowke, D.; Gehlen, C.:
Langzeittragverhalten von Verbundankern – Nachträglicher Anschluss von Beton- und Stahlbtonbauteilen (Long-term structural behaviour of bonded anchors – Subsequent connection of structural concrete and reinforced concrete components).
BFT International, Heft 2, 2016, S. 93-95

Raupach, M.; Bastert, H.; Eßer, A.; Gehlen, C.; Hintzen, W.; Hohberg, I.; Kühne, H.-C.; Reichling, K.; Westendarp, A.; Wiens, U.; Wolff, L.:
Neue Regeln braucht das Land – Die neue Instandhaltungs-Richtlinie des DAfStb, Teil 1.
B+B Bauen im Bestand 39. Jg (2.2016), S. 16-23

Raupach, M.; Bastert, H.; Eßer, A.; Gehlen, C.; Hintzen, W.; Hohberg, I.; Kühne, H.-C.; Reichling, K.; Westendarp, A.; Wiens, U.; Wolff, L.:
Das Bauwerk stellt die Anforderungen – Die neue Instandhaltungs-Richtlinie des DAfStb, Teil 2.
B+B Bauen im Bestand 39. Jg (03.2016), S. 51-55

Raupach, M.; Bastert, H.; Eßer, A.; Gehlen, C.; Hintzen, W.; Hohberg, I.; Kühne, H.-C.; Reichling, K.; Westendarp, A.; Wiens, U.; Wolff, L.:
Nichts hält ewig – Die neue Instandhaltungsrichtlinie des DAfStb, Teil 3.
B+B Bauen im Bestand 39. Jg (4.2016), S. 42-45

Skarabis, J.; Gehlen, C.; Lowke, D.; Durán, F.:
Lärmarmes Betonsteinpflaster.
BETON – Neue Konzepte, Förderverein Baustoff-Forschung e.V., 13. Münchener Baustoffseminar, 15.03.2016

Thiel, C.; Beddoe, R. E.; Lowke, D.; Gehlen, C.:
Investigating the role of moisture on concrete carbonation using single-sided 1H-NMR.
International RILEM Conference Materials, Systems and Structures in Civil Engineering 2016, 25.–29.08.2016, Lyngby, Denmark, RILEM Publications S.A.R.L

Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.:
3D printing of concrete structures using the selective binding method – Effect of concrete technology on contour precision and compressive strength.
11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, University of Tokyo, 29.-31.08.2016

Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.:
3D printing of Concrete Structures with Calcium Silicate based Cements using the Selective Cinding Method – Effects of Concrete Technology on Penetration Depth of Cement Paste in: Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials.
HiPerMat 2016 , 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Materials, March 9-11, 2016, Universität Kassel, Germany

Weger, D.; Lowke, D.; Henke, K.; Talke, D.; Gehlen, C.; Winter, S.:
Partikelbett-3D-Druckverfahren zur Herstellung freigeformter Betonbauteile.
IAB-Wissenschaftstage 2016, Institut für Angewandte Bauforschung Weimar, 16.-17.11.2017

Weger. D; Lowke, D.; Gehlen, C.:
3D-Druck von Betonbauteilen durch selektives Binden.
BETON – Neue Konzepte, Förderverein Baustoff-Forschung e.V., 13. Münchener Baustoffseminar, 15.03.2016

Prof. Christian Große

Große, C.:
Der Brückenarzt.
In: Welt am Sonntag (Nr. 47), 20.11.2016

Grosse, C. U.:
Modules for an efficient and holistic application of NDT methods for fiber reinforced polymers.
ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials, 26-30th June, 2016, Munich

Grosse, C. U.; Aggelis, D.G.; Shiotani, T.:
Concrete Structures – Chapter 2.
In: Masayasu Ohtsu (ed.): Innovative AE and NDT Techniques for On-Site Measurement of Concrete and Masonry Structures, pp 5-25, Springer, 2016-01

Grosse, C. U.; Goldammer, M.; Grager, J.-C.; Heichler, G.; Jahnke, P.; Jatzlau, P.; Kiefel, D.; Mosch, M.; Oster, R.; Sause, M. G. R.; Stößel, R.; Ulrich, M.:
Comparison of NDT Techniques to Evaluate CFRP – Results Obtained in a MAIzfp Round Robin Test.
WCNDT, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, 13.-17.6.16, Munich

Grosse, C.; Malm, F.:
Combination of inspection and monitoring techniques for the detection of fractures in concrete with self-healing properties.
9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-9), May 29-June 1, 2016, Berkeley, CA, USA

Algernon, D.; Grosse, C. U.:
Einsatz von Modellierung und Simulation bei der Planung, Analyse und Interpretation von Ultraschallprüfungen.
Fachtagung Bauwerksdiagnose, 25.-26.02.2016, Berlin

Botz, M.; Oberländer, S.; Raith, M.; Grosse, C. U.:
Monitoring of Wind Turbine Structures with Concrete-steel Hybrid-tower Design.
8th European Workshop On Structural Health Monitoring (EWSHM 2016), 05.-08.07.2016, Bilbao, Spain

Föhr, P.; Groschup, R.; Eigner, H.; Malm, F.; Raith, M.; von Deimling, C.; Burgkart, R.; Große, C. U.:
Spatial And Temporal Fracture Prediction In The Femur During Compression Using Acoustic Emission Analysis.
Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie (DKOU 2016), 25.-28.10.2016, Berlin

Grager, J.-C.; Grosse, C. U.; Schrapp, M.; Mooshofer, H.; Sause, M. G. R.; Zelenyak, A.-M.:
Ultrasonic Imaging of Carbon Fiber-Reinforced Plastics Using the Full Matrix Capture Data Acquisition Technique.
WCNDT, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, 13.-17.6.16, Munich

Groschup, R.; Grosse, C. U.:
Mikrofon-Array-Technik für scannendes Impakt-Echo-System.
Messtechnik im Bauwesen 2016 (Ernst & Sohn Sonderheft 2016), S. 49-56

Groschup, R.; Große, C. U.:
Development of an Efficient Air-Coupled Impact-Echo Scanner for Concrete Pavements.
WCNDT, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, 13.-17.6.16, Munich

Grumbein, S., Minev, D., Tallawi, M., Boettcher, K., Prade, F., Pfeiffer, F., Grosse, C. U., Lieleg, O. (2016):
Hydrophobic Properties of Biofilm-Enriched Hybrid Mortar.
In: Advanced Materials, 28: 8138–8143.

Heckner, S.; Geistbeck, M.; Grosse, C. U.; Eibl, S.; Helwig, A.:
FTIR Spectroscopy as a non-destructive testing method for CFRP surfaces in arerospace.
7th International Symposium on NDT in aerospace, 16.-18.11.2015, 01/2016, Bremen

Heckner, S.; Grosse, C. U.; Eibl, S.; Helwig, A.; Geistbeck, M.:
Mobile Non-Destructive Testing Methods for Surface Characterization of CFRP in Aerospace.
ECCM17 – 17th European Conference on Composite Materials, 26-30th June, 2016, Munich

Jatzlau, P.; Müller, M.; Grosse, C. U.:
Identification of Flawed CFRP Samples Using Local Acoustic Resonance Spectroscopy (LARS).
WCNDT, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, 13.-17.6.16, Munich

Kocur, G. K.; Saenger, E. H.; Grosse, C. U.; Vogel, Th.:
Time reverse modeling of acoustic emissions in a reinforced concrete beam.
In: Ultrasonics, Vol. 65, 02/2016, pp 96-104, Elsevier BV

Malm, F.; Grosse, C. U.:
Efficiency of self-healing agents for cementitious materials characterized by NDT.
WCNDT, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, 13.-17.6.16, Munich

Malm, F.; Grosse, C. U.:
The applicability of NDT methods for monitoring the performance of self healing concrete.
HealCON conference, 28-29 November, 2016, Delft, The Netherlands

Malm, F.; Grosse, C. U.:
Ultraschallmesstechnik: Time-of-flight-Verfahren zur Risstiefendetektion in Betonstrukturen.
Messtechnik im Bauwesen 2016 (Ernst & Sohn Sonderheft 2016), S. 46-48

Mosch, M.; Oster, R.; Grosse, C. U.:
Non-Destructive Testing of CFRP in the Design Process – a Generic Approach to Describe and Optimize Non-Destructive Testing.
WCNDT, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, 13.-17.6.16, Munich

Sause, M. G. R.; Stößel, R.; Oster, R.; Söhnchen, R.; Jahnke, P.; Seemann, A.; Goldammer, M.; Grosse, C. U.:
MAIzfp – A Joint Research Effort on NDT of Fiber Reinforced Composites within the Leading-Edge Cluster MAI Carbon.
WCNDT, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, 13.-17.6.16, Munich, Germany

Wondra, B.; Botz, M.; Grosse, C. U.:
Wireless monitoring of structural components of wind turbines including tower and foundations.
Journal of Physics: Conference Series 01.09.2016, B Wondra et al 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 753 072033

Prof. Detlef Heinz

Heinz, D.; Urbonas, L.:
Bindung durch gezielte Carbonatisierung.
BETON – Neue Konzepte, Förderverein Baustoff-Forschung e.V., 13. Münchener Baustoffseminar, 15.03.2016

Heinz, D.; Urbonas, L.:
Modification of cementitious building materials by treatment with CO_2.
Chemical Technology 67 (1), 2016, ISSN 1392 – 1231

Beddoe, R. E.; Lowke, D.; Heinz, D.:
Klinkerarme Betone: Entwicklungsziele und Konzepte.
BETON – Neue Konzepte, Förderverein Baustoff-Forschung e.V., 13. Münchener Baustoffseminar, 15.03.2016

Fischer, K., Urbonas, L., Heinz, D.:
ASR in granite – microscopic characterization and behaviour in concrete performance tests.
PhD-Symposium, Alkali-Silica Reaction In Concrete Structures – Cyclic Loading, Fluid Transport And Modeling / DFG For 1498, 05. – 06.10.16, Ruhr University Bochum

Fischer, K.; Urbonas, L.; Heinz, D.:
Lagerung von Mörtel mit Granit in KOH-Lösung unter NaCl-Zugabe bei 80 °C – Einflüsse auf eine AKR.
Kurzbericht Nr. 37, TUM / cbm – Centrum Baustoffe und Materialprüfung, 10/2016

Fischer, K.; Urbonas, L.; Heinz, D.:
Alkali Silica Reaction in Concrete with Granite – Laboratory Tests and Real Service Conditions.
15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, 03.-07.07.2016, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Brazil, proceedings p 7

Fischer, K.; Wunderlich, C.; Urbonas, L.; Heinz, D.:
Pozzolanity of Alkali Reactive Mineral Fillers.
2nd International Conference on the Chemistry of Construction Materials – ICCCM 2016, 10.-12.10.2016, TUM, Garching/ Munich

Heisig, A.; Stangl, T. M.; Hilbig, H.; Urbonas, L.; Heinz, D.:
Effect of alkali content of raw meal on composition and hydration of belite-calcium sulfoaluminate cement.
ZKG international 69 (6), 06/2016, pp 26-32, Bauverlag

Heisig, A.; Urbonas, L.; Beddoe, R. E.; Heinz, D.:
Ingress of NaCl in concrete with alkali reactive aggregate: effect on silicon solubility.
Materials and Structures (2016) 49: 4291, Springer Nature, doi:10.1617/s11527-015-0788-y

Hilbig, H.; Huber, M.; Gmell, A.; Heinz, D.:
Determination of Heavy Metals in Highly Porous Sorptive Filter Material with LA-ICP-MS.
13th European Workshop on Laser Ablation (EWLA), 12.-15.07.2016, Ljubljana (Slovenia)

Irbe, L.; Beddoe, R. E.; Hilbig, H.; Heinz, D.:
The Role of Aluminium in C-A-S-H during Chemical Attack on Concrete.
2nd International Conference on the Chemistry of Construction Materials – ICCCM 2016, 10.-12.10.2016, TUM, Garching/ Munich

Mihuta, V.; Decker, M.; Hilbig, H.; Heinz, D.:
Bestimmung von organischen Zusatzmitteln in Zementmörteln.
Kurzbericht Nr. 38,TUM / cbm – Centrum Baustoffe und Materialprüfung, 12/2016

Prade, F.; Fischer, K.; Heinz, D.; Meyer, P.; Mohr, J.; Pfeiffer, F.:
Time resolved X-ray Dark-Field Tomography Revealing Water Transport in a Fresh Cement Sample.
Scientific Reports 6, Article number: 29108 (2016), Springer Nature, doi:10.1038/srep29108

Pätzold, M., Lechner, T., Heinz, D.:
Design-engineering-based and material-based improvement of precast concrete facade elements.
New Concepts in Energy Science and Engineering, 6th Colloquium of the TUM / Munich School of Engineering, July 7, 2016, Proceedings p 76

Pätzold, M.; Musso, F.; Lechner, Th.; Fischer, O.; Heinz, D.:
Design-engineering-based and material-based improvement of precast concrete-facade-elements.
In: Sustainable Built Environment Conference, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 06/2016, pp 650-655

Urbonas, L., Heisig, A.; Heinz, D.:
Belite Calcium Sulfoaluminate Cements from Different Raw Materials.
The 7th International Conference on Silicate Materials "BaltSilica 2016", 26-27 May, 2016, Kaunas, Lithuania

Urbonas, L.; Heisig, A.; Stangl, T. M.; Niggl, K.; Heinz, D.:
Calciumsulfoaluminatzemente.
BETON – Neue Konzepte, Förderverein Baustoff-Forschung e.V., 13. Münchener Baustoffseminar, 15.03.2016

Urbonas, L.; Leno, V.; Heinz, D.:
Effect of carbonation in supercritical CO_2 on the properties of hardened cement paste of different alkalinity. Construction and Building Materials, Vol. 123, pp 704-711, 01.10.2016

AG 1 Bindemittel und Zusatzstoffe

Beddoe, R.E.; Lowke, D.; Heinz, D.:
Klinkerarme Betone: Entwicklungsziele und Konzepte.
BETON – Neue Konzepte, Förderverein Baustoff-Forschung e.V., 13. Münchener Baustoffseminar, 15.03.2016

Fischer, K., Urbonas, L., Heinz, D.:
ASR in granite – microscopic characterization and behaviour in concrete performance tests.
PhD-Symposium, Alkali-Silica Reaction In Concrete Structures – Cyclic Loading, Fluid Transport And Modeling / DFG For 1498, 05. – 06.10.16, Ruhr University Bochum, Germany

Fischer, K.; Urbonas, L.; Heinz, D.:
Lagerung von Mörtel mit Granit in KOH-Lösung unter NaCl-Zugabe bei 80 °C – Einflüsse auf eine AKR.
Kurzbericht Nr. 37, TUM / cbm – Centrum Baustoffe und Materialprüfung, 10/2016

Fischer, K.; Urbonas, L.; Heinz, D.:
Alkali Silica Reaction in Concrete with Granite – Laboratory Tests and Real Service Conditions.
15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, 03.-07.07.2016, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Brazil, proceedings p 7

Fischer, K.; Wunderlich, C.; Urbonas, L.; Heinz, D.:
Pozzolanity of Alkali Reactive Mineral Fillers.
2nd International Conference on the Chemistry of Construction Materials – ICCCM 2016, 10.-12.10.2016, TUM, Garching/ Munich

Gendvilas, R.; Urbonas, L.; Heisig, A.:
Effect of Temperature and NaCl on the Stability of Ettringite and the Pore Solution pH of Hardened Cement Paste.
The 7th International Conference on Silicate Materials "BaltSilica 2016", 26-27 May, 2016, Kaunas, Lithuania

Heinz, D.; Urbonas, L.:
Bindung durch gezielte Carbonatisierung.
BETON – Neue Konzepte, Förderverein Baustoff-Forschung e.V., 13. Münchener Baustoffseminar, 15.03.2016

Heinz, D.; Urbonas, L.:
Modification of cementitious building materials by treatment with CO_2.
Chemical Technology 67 (1), 2016, ISSN 1392 – 1231

Heisig, A.; Stangl, T.M.; Hilbig, H.; Urbonas, L.; Heinz, D.:
Effect of alkali content of raw meal on composition and hydration of belite-calcium sulfoaluminate cement.
ZKG international 69 (6), 06/2016, pp 26-32, Bauverlag

Heisig, A.; Urbonas, L.; Beddoe, R. E.; Heinz, D.:
Ingress of NaCl in concrete with alkali reactive aggregate: effect on silicon solubility.
Materials and Structures (2016) 49: 4291, Springer Nature, doi:10.1617/s11527-015-0788-y

Irbe, L.; Beddoe, R. E.; Hilbig, H.; Heinz, D.:
The Role of Aluminium in C-A-S-H during Chemical Attack on Concrete.
2nd International Conference on the Chemistry of Construction Materials – ICCCM 2016, 10.-12.10.2016, TUM, Garching/ Munich

Prade, F.; Fischer, K.; Heinz, D.; Meyer, P.; Mohr, J.; Pfeiffer, F.:
Time resolved X-ray Dark-Field Tomography Revealing Water Transport in a Fresh Cement Sample.
Scientific Reports 6, Article number: 29108 (2016), Springer Nature, doi:10.1038/srep29108

Thiel, C.; Beddoe, R. E.; Lowke, D.; Gehlen, C.:
Investigating the role of moisture on concrete carbonation using single-sided 1H-NMR.
International RILEM Conference Materials, Systems and Structures in Civil Engineering 2016, 25.–29.08.2016, Lyngby, Denmark, RILEM Publications S.A.R.L

Urbonas, L., Heisig, A.; Heinz, D.:
Belite Calcium Sulfoaluminate Cements from Different Raw Materials.
The 7th International Conference on Silicate Materials "BaltSilica 2016", 26-27 May, 2016, Kaunas, Lithuania

Urbonas, L.; Heisig, A.; Stangl, T. M.; Niggl, K.; Heinz, D.:
Calciumsulfoaluminatzemente.
BETON – Neue Konzepte, Förderverein Baustoff-Forschung e.V., 13. Münchener Baustoffseminar, 15.03.2016

Urbonas, L.; Leno, V.; Heinz, D.:
Effect of carbonation in supercritical CO_2 on the properties of hardened cement paste of different alkalinity. Construction and Building Materials, Vol. 123, pp 704-711, 01.10.2016

AG 2 Betontechnologie

Beddoe, R. E.; Lowke, D.; Heinz, D.:
Klinkerarme Betone: Entwicklungsziele und Konzepte.
BETON – Neue Konzepte, Förderverein Baustoff-Forschung e.V., 13. Münchener Baustoffseminar, 15.03.2016

Kränkel, T.; Lowke, D.; Gehlen, C.:
Langzeittragverhalten von Verbundankern – Nachträglicher Anschluss von Beton- und Stahlbtonbauteilen (Long-term structural behaviour of bonded anchors – Subsequent connection of structural concrete and einforced concrete components).
BFT International, Heft 2, 2016, S. 93-95

Skarabis, J.; Gehlen, C.; Lowke, D.; Durán, F.:
Lärmarmes Betonsteinpflaster.
BETON – Neue Konzepte, Förderverein Baustoff-Forschung e.V., 13. Münchener Baustoffseminar, 15.03.2016

Thiel, C.:
Einfluss verschiedener Auftausalze auf die Dauerhaftigkeit von Straßenbeton.
Werwerk- und Prüfstellenleiter-Schulung 2016 der Verbände Nord und Ost, 19.– 20.01.2016, Leipzig

Thiel, C.; Beddoe, R. E.; Lowke, D.; Gehlen, C.:
Investigating the role of moisture on concrete carbonation using single-sided 1H-NMR.
International RILEM Conference Materials, Systems and Structures in Civil Engineering 2016, 25.–29.08.2016, Lyngby, Denmark, RILEM Publications S.A.R.L.

Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.:
3D printing of concrete structures using the selective binding method – Effect of concrete technology on contour precision and compressive strength.
11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, University of Tokyo, 29.-31.08.2016

Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.:
3D printing of Concrete Structures with Calcium Silicate based Cements using the Selective Cinding Method – Effects of Concrete Technology on Penetration Depth of Cement Paste
HiPerMat 2016 , 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Materials, March 9-11, 2016, Universität Kassel, Germany

Weger, D.; Lowke, D.; Henke, K.; Talke, D.; Gehlen, C.; Winter, S.:
Partikelbett-3D-Druckverfahren zur Herstellung freigeformter Betonbauteile.
IAB-Wissenschaftstage 2016, 16.-17.11.2017, Institut für Angewandte Bauforschung Weimar

Weger. D; Lowke, D.; Gehlen, C.:
3D-Druck von Betonbauteilen durch selektives Binden.
BETON – Neue Konzepte, Förderverein Baustoff-Forschung e.V., 13. Münchener Baustoffseminar, 15.03.2016

AG 3 Stahl und Korrosion

Gehlen, C.; Osterminski, K.; Weirich, T.:
High-cycle fatigue behaviour of reinforcing steel under the effect of ongoing corrosion.
Structural Concrete, 01.08.2016

Greve-Dierfeld v., S.; Gehlen, C.:
Performance based durability design, carbonation part 1 – BENCHMARKING OF EUROPEAN PRESENT DESIGN RULES.
Structural Concrete, 01.07.2016, Wiley-Blackwell

Greve-Dierfeld v., S.; Gehlen, C.:
Performance based durability design, carbonation part 2 – CLASSIFICATION OF CONCRETE.
Structural Concrete, 01.09.2016, Wiley-Blackwell

Greve-Dierfeld v., S.; Gehlen, C.:
Performance based durability design, carbonation part 3 – PARTIAL SAFETY FACTOR (PSF) APPROACH AND A PROPOSAL FOR THE REVISION OF DEEMED-TO-SATISFY RULES.
Structural Concrete, 01.09.2016, Wiley-Blackwell

Hiemer, F.; Keßler, S.; Gehlen, C.:
Development of chloride induced reinforcement corrosion in cracked concrete after application of a surface protection system.
In: Proceedings Concrete Solutions 2016, 6th International Conference on Concrete Repair, 20.-22.06.16, Thessaloniki, Greece

Keßler, S.:
Zur Verwertbarkeit von Potentialfeldmessungen für die Zustandserfassung und -prognose von Stahlbetonbauteilen – Validierung und Einsatz im Lebensdauermanagement. , Hrsg.: DAfStb / Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. – DAfStb, Beuth Verlag GmbH (Berlin) , 2016

Keßler, S.; Angst, U.; Zintel, M.; Elsener, B.; Gehlen, C.:
Epoxy-coated reinforcement in concrete structures: Results of a Swiss pilot project after 24 years of field exposure.
Materials and Corrosion 67, 03/2016, pp. 631-638

Keßler, S.; Gehlen, C.:
Influence of concrete moisture condition on half-cell potential measurement.
5th International Conferene on the Durability of Concrete Structures (ICDCS), June 30 - July 1, 2016, Shenzhen, Guangdong, China

Keßler, S.; Gehlen, C.:
Reliability of corrosion detection in reinforced concrete structures – impact of the half-cell potential evaluation.
IALCCE 2016, Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems, 16.-19.10.2016, Delft University, Delft, NL

Kessler, S., Strauss A., Caspeele R.:
Present and future probabilistic challenges for maintenance of reinforced concrete structures.
In: Robby Caspeele, Luc Taerwe, Dirk Proske (ed.): 14th International Probabilistic Workshop, Ghent, Belgium

AG 4 Chemie

Heisig, A.; Stangl, T. M.; Hilbig, H.; Urbonas, L.; Heinz, D.:
Effect of alkali content of raw meal on composition and hydration of belite-calcium sulfoaluminate cement.
ZKG international 69 (6), 06/2016, pp 26-32, Bauverlag

Hilbig, H.:
Beton in Kontakt mit Abwasser: Ausgewählte laboranalytische Methoden.
Seminar „V1640 Instandsetzung von Betonbauteilen bei Abwasseranlagen“, Ingenieurakademie Bayern, 10.11.2016, München

Hilbig, H.; Huber, M.; Gmell, A.; Heinz, D.:
Determination of Heavy Metals in Highly Porous Sorptive Filter Material with LA-ICP-MS.
13th European Workshop on Laser Ablation (EWLA), 12.-15.07.2016, Ljubljana (Slovenia)

Huber, B. ; Hilbig, H. ; Mago, M. M.; Drewes, J. E.; Müller, E.:
Comparative analysis of biogenic and chemical sulfuric acid attack on hardened cement paste using laser ablation-ICP-MS. Cement and Concrete Research, Vol. 87, 09/2016, pp 14-21

Huber, M., Fassnacht, J., Hilbig, H., Drewes, J. E., Helmreich, B.:
Auftausalzeinfluss auf die Remobilisierung von auf Filtermaterialien zur Behandlung von Verkehrsflächenabflüssen zurückgehaltenen Schwermetallen.
Wasser 2016, Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), 02.-04.05.2016, Bamberg

Huber, M.; Hilbig, H.; Badenberg, S. C.; Fassnacht, J.; Drewes, J. E.; Helmreich, B.:
Heavy metal removal mechanisms of sorptive filter materials for road runoff treatment and remobilization under de-icing salt applications.
Water Research, Vol. 102, 10/2016, pp 453-463, Elsevier BV

Huber, M.; Hilbig, H.; Drewes, J.E.; Helmreich, B.:
Heavy Metal Removal and Remobilization under De-icing Salt Applications using Lab-scale Column Experiments.
NOVATECH 2016, 28.06 – 01.07.2016, Lyon, France

Irbe, L.; Beddoe, R. E.; Hilbig, H.; Heinz, D.:
The Role of Aluminium in C-A-S-H during Chemical Attack on Concrete.
2nd International Conference on the Chemistry of Construction Materials – ICCCM 2016, 10.-12.10.2016, TUM, Garching/ Munich

Mihuta, V.; Decker, M.; Hilbig, H.; Heinz, D.:
Bestimmung von organischen Zusatzmitteln in Zementmörteln.
Kurzbericht Nr. 38, TUM / cbm – Centrum Baustoffe und Materialprüfung, 12/2016

AG 5 Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine

Grafmüller, H.-K., Plachkova-Dzhurova, P., Hase, M., Roos, R., Wörner, Th.:
Additional knowledge of low temperature behaviour of asphalt characterized by maximum indirect tensile strength reserve.
6th Euroasphalt & Eurobitume Congress, Proceedings Paper 183, EAPA & Eurobitume, 1-3 June, 2016, Prague, Czech Republic

Milch, J., Plachkova-Dzhurova P., Hase M., Roos R., Wörner, Th.:
About the influence of several boundary conditions to results of the cyclic compression test.
6th Euroasphalt & Eurobitume Congress, Proceedings Paper 179, EAPA & Eurobitume, 1-3 June, 2016, Prague, Czech Republic

Patzak, Th., Hase, M., Roos, R., Wörner, Th.:
Friction of different surface courses.
6th Euroasphalt & Eurobitume Congress, Proceedings Paper 256, EAPA & Eurobitume, 1-3 June, 2016, Prague, Czech Republic

Wörner, Th., Hase, M., Roos, R.:
Change in Bitumen Quality during the workling stations.
6th Euroasphalt & Eurobitume Congress, Proceedings Paper 255, EAPA & Eurobitume, 1-3 June, 2016, Prague, Czech Republic

Wörner, Th.; Hase, M.; Roos, R.:
Performance-relevante Asphalteigenschaften als Grundlage für neue Vertragsbedingungen.
Straße und Autobahn (67), 2016, S. 26-30

AG 6 Zerstörungsfreie Prüfung

Botz, M.; Oberländer, S.; Raith, M.; Grosse, C. U.:
Monitoring of Wind Turbine Structures with Concrete-steel Hybrid-tower Design.
8th European Workshop On Structural Health Monitoring (EWSHM 2016), 05.-08.07.2016, Bilbao, Spain

Föhr, P.; Groschup, R.; Eigner, H.; Malm, F.; Raith, M.; von Deimling, C.; Burgkart, R.; Große, C. U.:
Spatial And Temporal Fracture Prediction In The Femur During Compression Using Acoustic Emission Analysis.
Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie (DKOU 2016), 25.-28.10.2016, Berlin

Grosse, C. U. ; Goldammer, M.; Grager, J.-C.; Heichler, G.; Jahnke, P.; Jatzlau, P.; Kiefel, D.; Mosch, M.; Oster, R.; Sause, M. G. R.; Stößel, R.; Ulrich, M.:
Comparison of NDT Techniques to Evaluate CFRP – Results Obtained in a MAIzfp Round Robin Test.
WCNDT, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, 13.-17.6.16, Munich

Groschup, R.; Grosse, C. U.:
Mikrofon-Array-Technik für scannendes Impakt-Echo-System.
Messtechnik im Bauwesen 2016 (Ernst & Sohn Sonderheft 2016), S. 49-56

Groschup, R.; Große, C. U.:
Development of an Efficient Air-Coupled Impact-Echo Scanner for Concrete Pavements.
WCNDT, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, 13.-17.6.16, Munich

Grosse, C.; Malm, F.:
Combination of inspection and monitoring techniques for the detection of fractures in concrete with self-healing properties.
9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-9), May 29-June 1, 2016, Berkeley, CA, USA

Jatzlau, P.; Müller, M.; Grosse, C. U.:
Identification of Flawed CFRP Samples Using Local Acoustic Resonance Spectroscopy (LARS).
WCNDT, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, 13.-17.6.16, Munich

Jatzlau, P.; Seybold, F.:
Numerical Vibration Analysis of Impacted CFRP Specimens Using COMSOL Multiphysics®.
COMSOL Conference 2016, 12.-14.10.2016, Munich

Malm, F.:
Selbstheilender Beton.
BETON – Neue Konzepte, Förderverein Baustoff-Forschung e.V., 13. Münchener Baustoffseminar, 15.03.2016

Malm, F.; Grosse, C. U.:
Efficiency of self-healing agents for cementitious materials characterized by NDT.
WCNDT, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, 13.-17.6.16, Munich

Malm, F.; Grosse, C. U.:
The applicability of NDT methods for monitoring the performance of self healing concrete.
HealCON conference, 28-29 November, 2016, Delft, The Netherlands

Malm, F.; Grosse, C. U.:
Ultraschallmesstechnik: Time-of-flight-Verfahren zur Risstiefendetektion in Betonstrukturen.
Messtechnik im Bauwesen 2016 (Ernst & Sohn Sonderheft 2016), S. 46-48

Wondra, B.; Botz, M.; Grosse, C. U.:
Wireless monitoring of structural components of wind turbines including tower and foundations.
Journal of Physics: Conference Series 01.09.2016, B Wondra et al 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 753 072033

Zelenyak, A.-M.; Oster, R.; Mosch, M.; Jahnke, P.; Sause, M. G. R.:
Numerical Modeling of Ultrasonic Inspection in Fiber Reinforced Materials with Explicit Microstructure.
WCNDT, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, 13.-17.6.16, Munich

In: Materials and Structures, Oct. 2016, Vol. 49, Issue 10, pp 4291-4303

„Outstanding Paper 2016 Award“, s. Kapitel 6 Ehrungen S. 38

11.1. Ingress of NaCl in Concrete with Alkali Reactive Aggregate – Effect on Silicon Solubility

Anne Heisig, Liudvikas Urbonas, Robin E. Beddoe, Detlef Heinz

Abstract

Enhanced damage due to the alkali-silica reaction (ASR) in concrete exposed to deicing salt (NaCl) is usually attributed to binding of chloride ions in the hydration products of cement. To balance charge, OH^- ions are released into the concrete pore solution which increases alkalinity. However, during NaCl ingress a decrease the OH^- concentration in the concrete pore solution should decrease due to potassium leaching which affects SiO_2 solubility. This should therefore reduce ASR damage.

The present work combines expansion measurements with pore solution analysis by ICP-OES and XRD measurements on concretes and hydrated cement pastes. For comparison solubility equilibria calculations were performed with the hydrogeochemical simulation program PHREEQC.

The investigations show that the OH^- concentration of the pore solution is mainly lowered by potassium leaching during NaCl ingress. The OH^- concentration also decreases owing to the formation of Friedels salt from ettringite, associated with the release of sulphate. Although the OH^- concentration with NaCl is lower, ASR damage is intensified and the silicon concentration in the pore solution is higher. Higher silicon solubility is explained by the higher total alkali concentration which increases surface silicate solubility, the formation of an aqueous complex $NaHSiO_3^0$ and a higher ionic strength. These effects promote the sensitivity of silicate minerals to ASR, the formation of alkali silica gel and finally ASR damage.

Keywords: Alkali-Silica Reaction; OH^- concentration; Pore solution; SiO_2 solubility

Abbreviations: ASR: alkali-silica reaction; HA: cement with a high alkali equivalent ; LA: cement with a low alkali equivalent; Na_2O_{eq}: alkali equivalent; ICP-OES: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry; XRD: X-Ray Diffraction; PHREEQC: computer program for hydrogeochemical simulations; WATEQ: activity calculation of species; LLNL: data base

11.1.1. Introduction

In recent years, cracks were often observed in German motorway pavement and other concrete structures exposed to deicing salt (Breitenbücher and Sievering 2012). Investigations of the concrete revealed the presence of alkali silica gel in the cracked concrete indicating the occurrence of a damaging alkali-silica reaction (ASR) (Giebson et al. 2012). The enhancement of ASR damage in concrete structures and pavement exposed to deicing salt has also been observed in many other countries and has been the subject of numerous laboratory and field investigations (Chatterji et al. 1987; Helmuth et al. 1993; Katayama et al. 2004; Kawamura et al. 2000; Sibbick and Page 1996; Sibbick and Page 1998; Swamy 1992; West 1996).

To investigate the effect of alkali ingress on concrete expansion, Chatterji et al. (1987) observed the expansion of mortar prisms (4x4x16 cm^3) made with highly reactive sand during

storage at 50 °C in 3 mol/L NaOH or in NaCl solutions with different concentrations (3, 2, 1 and 0.5 mol/L). During the first weeks, the samples stored in the NaOH solution exhibited the larger expansion. However, after about 9 weeks, the expansion of the samples in the NaCl solutions was considerably higher. Moreover, with increasing NaCl concentration (0.5 mol/L to 1 mol/L to 2 mol/L), the expansion began earlier and the final expansion after 56 weeks was higher.

In investigations with concrete structures and laboratory concretes, Sibbick and Page (1996, 1998) assessed the effect of NaCl exposure on ASR in concrete with regard to the alkali content of the concrete and the C_3A content of the cement. The authors proposed a reaction scheme in which, firstly, the ingress of NaCl increases the NaOH concentration of the pore solution owing to the reaction of chloride with the C_3A hydration products and portlandite. Secondly, the increase in OH^- concentration promotes the neutralization of the acidic silanol groups (≡SiOH) at the SiO_2 surface and thus the formation of negatively charged $≡SiO^-$ surfaces.

It is well known that the dissolution of silica, i.e. SiO_2, is controlled by the concentration of OH^- ions because it changes the solubility equilibrium between solid SiO_2 and the aqueous $H_4SiO_4^0$ species. At pH above 11, $H_4SiO_4^0$ exists with an increasing amount of its deprotonated forms causing more SiO_2 to dissolve. Cations, e.g. Na^+, K^+ or Ca^{2+}, are preferentially bound at the negative surface sites. The SiO_2 network disintegrates forming a loose gel structure (Helmuth et al. 1993; Iler 1979). According to the reaction scheme of Sibbick and Page (1996, 1998) a fluid alkali-rich silica gel is formed which takes up calcium and water and is able to develop an expansion pressure.

In laboratory and field investigations, Bérubé et al. (2003) estimated the effect of NaCl ingress on ASR with regard to the alkali content and thickness of the samples. Exposure of concrete to NaCl solutions was found to result in an increase in sodium and chloride concentration in the concrete pore solution. At the same time the potassium and OH^- concentrations decreased owing to leaching in the near-surface layers of the concrete. Thus the pH of the concrete pore solution was lower in the regions affected by NaCl ingress. Based on these results, the authors suggest that ASR damage in thin structures is reduced by leaching. With increasing structure thickness the effect of NaCl is limited by its penetration depth. In thick concrete structures containing high-alkali cements, ASR takes place as usual, i.e. is not affected by the external alkalis. In this case the formation of a swelling alkali silica gel in the inner, unaffected region of the concrete leads to inhomogeneous expansion which induces cracks.

However, the effect of NaCl ingress on the composition of the concrete pore solution and the dissolution rate of SiO_2 was not considered in the laboratory and field investigations mentioned above (Chatterji et al. 1987; Sibbick and Page 1996; Sibbick and Page 1998, Bérubé et al. 2003). According to Bérubé et al. (2003), leaching effects should also be taken into account because exposure of concrete to NaCl solutions results in a decrease in the potassium and OH^- concentrations of the concrete pore solution. This would lead to a reduction in pH of the concrete pore solution, SiO_2 solubility and consequently less ASR damage (Bérubé et al. 2003). Nevertheless, as described previously (Chatterji et al. 1987; Helmuth et al. 1993; Katayama et al. 2004; Kawamura et al. 2000; Sibbick and Page 1996; Sibbick and Page 1998; Swamy 1992; West 1996), NaCl ingress in hardened concrete can promote damage due to ASR significantly. It also increases capillary porosity which accelerates transport properties (Efes 1980; Hoffmann 1984), the phase composition of hydration products (Sibbick and Page 1996; Sibbick and Page 1998; Taylor 1997) and, in particular,

the composition of the pore solution (Taylor 1997). It is often assumed that during chloride binding the negative charge of the chloride ions is compensated by the release of OH^- ions into the pore solution. This would mean an increase in the pH of the concrete pore solution and consequently more ASR damage (Balonis et al. 2010; Birnin-Yauri and Glasser 1998; Brown and Bothe 2004; Sibbick and Page 1998; Suryavanshi et al. 1996). In contrast, Chatterji et al. (1986, 1987) suggested that alkali salts can directly participate in the ASR and that chloride binding is not relevant for damaging ASR.

Although the mechanisms responsible for ASR are well understood, there are conflicting interpretations on how ASR proceeds in presence of NaCl. This paper considers the changes in the pore solution and cement hydration phases caused by NaCl ingress in concrete and its effect on the solubility of silicon in borosilicate glass as a model for reactive aggregate in concrete.

11.1.2. Materials and Methods

11.1.2.1. Materials and Mix Design

Two Portland cements CEM I 32.5 R were used representing cements with high (HA) and low (LA) alkali equivalents, i.e. 1.02 and 0.56 wt.% Na_2O_{eq}, respectively (Table 1).

CEM I 32.5 R	Chemical analysis[1)]		
	K_2O	Na_2O	Na_2O_{eq} [3)]
HA	1.20	0.24	1.02
LA	0.46	0.26	0.56

X-Ray diffraction (XRD)[2)]				
$CaCO_3$	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
4.86	56.64	11.32	6.63	12.68
5.25	45.68	23.75	8.70	8.79

Table 1:
Alkali content[1)] (left) and mineralogy[2)] (right) of the cements, wt.%

[1)] extraction with lithiummetaborate and ICP-OES
[2)] with Rietveld refinement
[3)] alkali equivalent: $Na_2O_{eq} = Na_2O + 0.658\ K_2O$

Concrete bars (40×40×160 mm^3) were produced with end gauge marks using aggregate composed of 45 vol.% (= 660 kg/m^3) borosilicate glass (fraction 2/8 mm) as a model reactive aggregate (ASTM C441 – 05 2005; Lane and Ozyildirum 1999) with a homogeneous composition (Table 2), 5 vol.% inert diabase (fraction 2/8 mm) and 50 vol.% inert quartz sand (fraction 0/2 mm). The concretes were produced with 400 kg/m^3 cement and a w/c ratio of 0.5.

Borosilicate glass								
SiO_2	B_2O_3 [3)]	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	P_2O_5	K_2O	Na_2O	Na_2O_{eq} [2)]
82.04	12.52	2.58	0.32	0.13	0.14	0.65	3.41	3.84

Table 2:
Chemical composition[1)] of the borosilicate glass, wt.%

[1)] extraction with lithiummetaborate and ICP-OES
[2)] alkali equivalent: $Na_2O_{eq} = Na_2O + 0.658\ K_2O$
[3] digestion in fused NaOH and ICP-OES

Additionally, storage experiments with finely ground hardened cement paste (i.e. without reactive aggregate) in an artificial pore solution were also performed in order to investigate the chemical balance between the pore solution and the solid phases while minimizing the effect of transport (porosity) and leaching. Cement pastes of the same composition (w/c = 0.5) were mixed and poured into PE bottles which were sealed and rotated for 24 h to prevent segregation. The pastes were then stored in the bottles up to an age of 91 d at 20 °C. After then pore solutions were expressed (Table 3, left) and powder specimens were pro-

duced by grinding part of the solid material for 60 seconds in isopropanol in a disc mill and then drying at 40 °C for about 2 h. The hydrated cement paste powders were stored for 14 days at 20 °C under rotation in artificial pore solutions (Table 3, right), water/solid ratio w/s = 1, corresponding to the expressed pore solution of the particular hydrated cement. This procedure was necessary to ensure hydration of the freshly fractured surface of the residual clinker phases produced during grinding. The amount of water bound in hydrates was then added to adjust the w/s back to 1. Afterwards artificial pore solution was added to increase the w/s ratio to 2:1. Different amounts of finely ground NaCl were then added to the solutions to produce concentrations of 0, 3, 10 and 20 wt.% NaCl.

11.1.2.2. Expansion Measurements

The concrete bars were cast for each particular cement, demoulded after 24 h and also stored at 20 °C in moist air (over water) for a period of 91 d (pre-storage). Afterwards, the bars were subsequently stored in moist air or a 20 wt.% NaCl solution for 274 d (age: one year) at 20 °C. The volume ratio of the solution to the specimens was 2 ± 0.5.
Changes in the length and mass of the bars were recorded during moist pre-storage at ages of 1, 28, 91 d and thereafter every four weeks.

11.1.2.3. Pore Solution Analysis

Pore solutions were expressed at high pressure (500 MPa) from the concrete bars at ages of 91 (i.e. immediately after pre-storage), 231 d and one year. From each hardened paste pore solutions were also expressed at an age of 91 d and the chemical composition analysed as described (Table 3, left).

Table 3:
Chemical composition of the pore solutions of the hardened cement pastes after 91 d hydration at 20 °C (left) and weights of compounds for the production of the corresponding artificial pore solutions (right)

Component [mmol/L]	CEM I 32.5 R	
	HA	LA
	w/c = 0.50	
OH^- [1]	611.4	338.5
CaO	1.3	1.9
Na_2O	125.9	134.4
K_2O	514.1	200.2
SiO_2	0.6	0.5
Al_2O_3	0.1	0.1
Cl^- [2]	19.9	1.6
SO_4^{2-}	14.5	2.6

Material [g/L]	CEM I 32.5 R	
	HA	LA
	w/c = 0.50	
$Ca(OH)_2$	-- [3]	
NaOH	21.78	28.80
KOH	135.03	54.56
K_2SO_4	12.60	2.23
KCl	1.42	0.23
$Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$	0.66	0.55
NaCl	4.61	0.20
$AlCl_3 \cdot 6H_2O$	0.12	0.10

[1] by titration (indicator: toluene red)
[2] photometric analysis
[3] dissolved from binder during storage for ease of preparation

Additionally, after a storage period of 28 d under rotation the suspensions of the hydrated cement paste powders and the artificial pore solution were centrifuged, the solutions filtered off and their composition was analysed. The solid material was dried at 40 °C and investigated by X-ray diffraction. The chemical composition of all the solutions was analysed by ICP-OES (inductively coupled plasma optical emission spectrometry) as well as photometry and the pH determined by titration.

11.1.2.4. X-ray Diffraction (XRD)

For the X-ray investigations the hydrated cement paste powder was ground for five minutes in isopropyl alcohol in a laboratory ball mill and then dried at 40 °C for 30 min. The samples were stored in an argon atmosphere until measurement. The XRD measurements were performed with a XRD 3003 TT diffractometer of GE Sensing & Inspection Technologies GmbH with θ-θ configuration und CuKα radiation (λ = 1.54 Å). Intensities were recorded over scattering angles of 5 to 70 ° 2 θ with a step width of 0.02 ° and a measuring time of 6 s/step.

11.1.3. Results and Discussion

11.1.3.1. Concrete Specimens

As expected, the expansion of the prisms with the high alkali cement during moist storage is significantly larger (Figure 1): 3.59 mm/m for concrete with cement HA and 1.46 mm/m with the low-alkali cement LA. The expansion rate of the bars with the high alkali cement during moist storage is significantly faster. In earlier investigations (Dressler et al. 2012 and Dressler 2013) internal damage was characterized by the reduction in the frequency of resonance (arrows) at each sample. The specimens with the LA cement were not damaged by ASR after one year storage whereas the specimens with the HA cement were. The ASR expansion of the specimens made with HA cement is obviously derived from the alkalis in this cement.

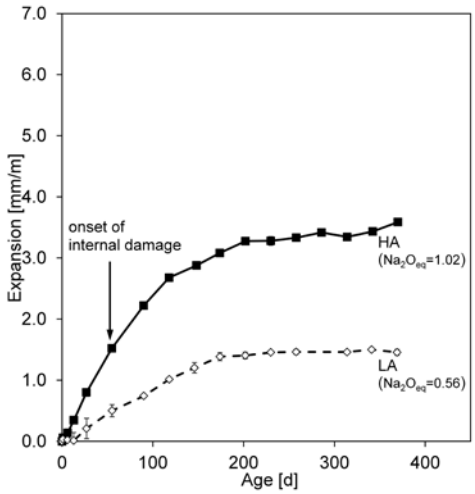


Figure 1:
Expansion of concrete bars (average over three specimens, error bars often smaller than symbols) with borosilicate glass for high and low alkali cements during 91 d moist storage at 20 °C

The effect of cement alkali content on the expansion of the concretes during subsequent NaCl exposure is shown in Figure 2 for up to an age of one year. In the pre-storage period, the expansion of sample HA is 2.6 times more than that of sample LA. During subsequent NaCl exposure, the expansion of the bars with HA and LA cement increased up to 6.11 and 4.33 mm/m, respectively, over a period of 274 d.

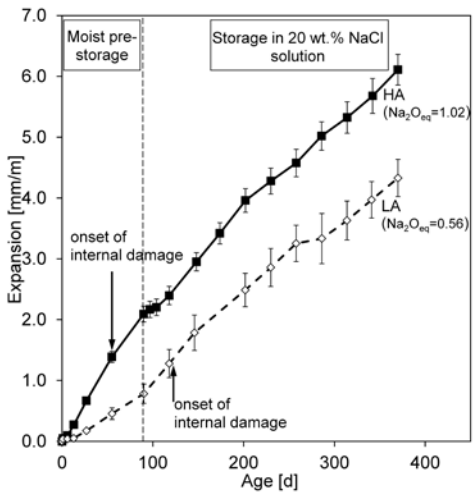


Figure 2:
Expansion of concrete bars (average over three specimens) with borosilicate glass for high and low alkali cements during 91 d moist pre-storage and subsequent 274 d storage in 20 wt.% NaCl solution at 20 °C

The rates of expansion of samples HA and LA during subsequent storage in NaCl solution are similar (HA is 1.1 times faster than LA) for both concretes, i.e. 4.02 and 3.55 mm/m over 274 d, for HA and LA cement, respectively. The concrete made with LA cement expanded rapidly with an onset of internal damage between 118 and 140 d. This behaviour can only be explained by ASR due to NaCl ingress.

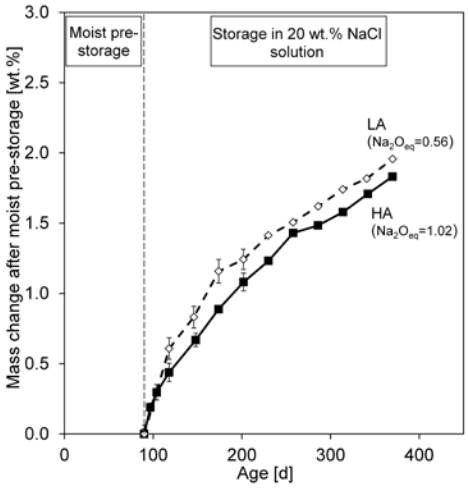
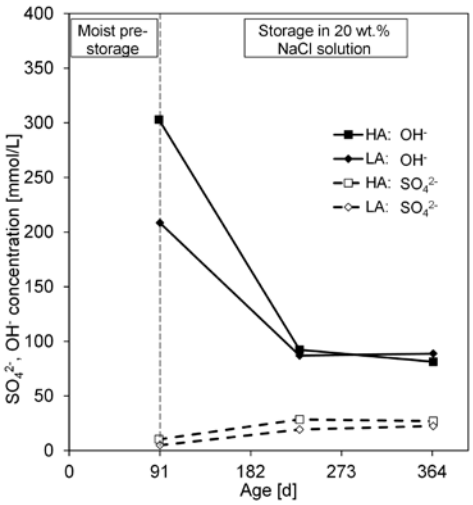


Figure 3:
Increase in mass of concrete bars (average over three specimens, error bars often smaller than symbols) with borosilicate glass for high and low alkali cements after pre-storage and subsequent storage in 20 wt.% NaCl solution at 20 °C

Figure 3 shows the mass change of the specimens during NaCl storage. In view of a similar change in mass of the concretes produced by the uptake of storage solution, it may be assumed that the ingress of NaCl is also similar. These results indicate that the alkali content of the cement is no longer decisive for damaging ASR in concrete exposed to external alkalis, i.e. low alkali cements in concrete exposed to deicing salt do not always prevent ASR damage as also observed by Giebson et al. (2010). Similar results were obtained in earlier experiments by the present author (Dressler 2013) in a performance test including NaCl ingress. Different concrete compositions with natural alkali reactive aggregates, e.g. Precambrian greywacke or reactive crushed material originating from the upper Rhine Valley were considered.

Opposed to this, investigations on laboratory and field concretes by Bérubé et al. (2003) show no effect of external alkalis on ASR in concrete with low-alkali cement. The authors suggest that ASR in near surface layer is reduced owing to low OH concentrations produced by potassium leaching although sodium and chloride are present. ASR in deeper layers is, as would be expected, not affected by leaching and chloride ingress. Differences in the behaviour observed for low-alkali cement may originate in the different storage conditions (temperature and chloride concentration) and sample geometry.

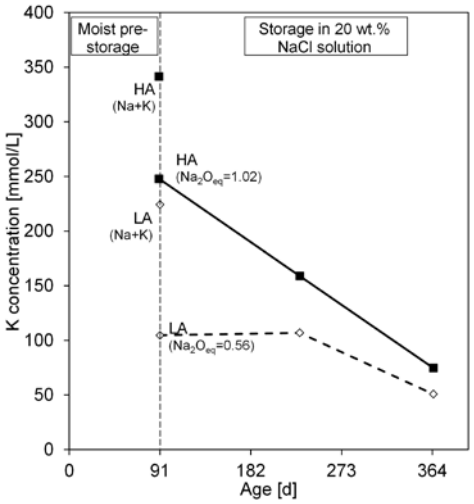
Figure 4:
OH^- and SO_4^{2-} concentration in the pore solution of concretes with borosilicate glass stored in 20 wt.% NaCl solution for high and low alkali cements



The results of the pore solution analysis after different storage periods reveal a decrease in both OH^- (Figure 4) and potassium concentration (Figure 5) (Bérubé et al. (2003) and an increase of sulphate concentration (Figure 4) in both concretes.

In the case of ASR without external alkali exposure, the hydroxide ion concentration is approximately calculated from the alkali concentrations, i.e. $[OH^-] \approx [Na^+] + [K^+]$ (Herr and Wieker 1992). Due to the ingress of external alkalis (NaCl) combined with an enrichment of sodium and chloride ions in the pore solution a strong shift occurs towards the negative charged ions. In this case the approximation is
$[Na^+] + [K^+] \approx [OH^-] + [SO_4^{2-}] + [Cl^-]$.

As expected, the pore solution of the concrete with low alkali cement has a lower OH^- concentration. During the following storage in 20 wt.% NaCl solution, the OH^- concentration in both concretes drops to a minimum of about 85 mmol/L (pH 12.9) irrespective of the initial



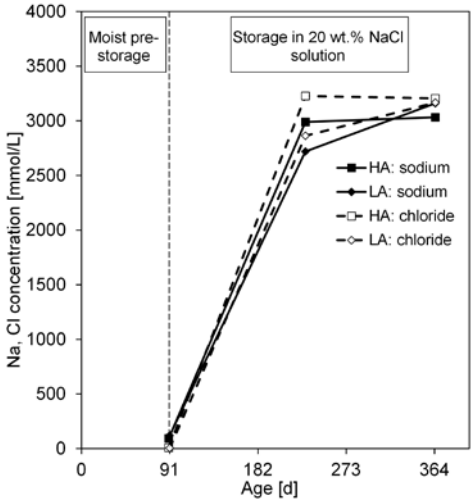


Figure 5 (left): K concentration in the pore solution of concretes with borosilicate glass stored in 20 wt.% NaCl solution for high and low alkali cements. The symbols labelled (Na+K) represent the total alkali concentration after 91 d moist pre-storage

Figure 6 (right): Na and Cl concentration in the pore solution of concretes with borosilicate glass stored at 20 °C in 20 wt.% NaCl solution for high and low alkali cements

alkalinity of the pore solution (Figure 4). Figure 5 also shows the total alkali concentrations (Na+K) after 91 d moist pre-storage. These values are in agreement with the corresponding OH^- concentrations in Figure 4.

Changes in the OH^- concentration of the pore solution may be explained by the following mechanisms.

- A decrease due to diffusion of potassium ions into the storage solution (leaching).
- A decrease due to the binding of alkalis (Na and K) in alkali silica gel.
- An increase due to chloride binding in the hydration products.
- A decrease due to sulphate release into the pore solution and the corresponding charge balance.

It is apparent in Figure 5 that the loss in alkalinity is mainly due to potassium leaching into the surrounding storage solution against the flux of sodium and chloride ions into the concrete specimens (Figure 6). Measurements of the formed ASR gels showed a significant excess of sodium to potassium inside of the gel structure.

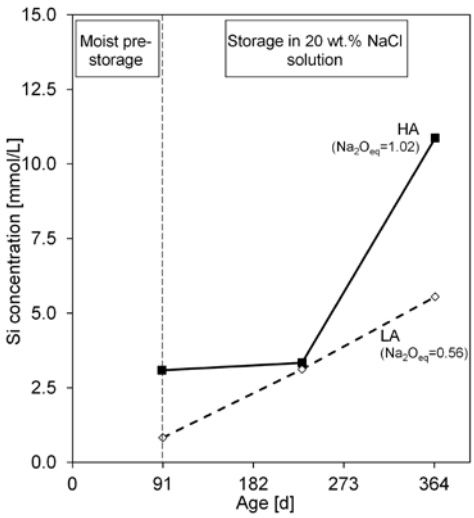


Figure 7:
Si concentration in the pore solution of concretes with borosilicate glass stored at 20 °C in 20 wt.% NaCl solution for high and low alkali cements

As expected, the concentrations of sodium and, correspondingly, chloride increase with the duration of NaCl exposure (Figure 6) as sodium and chloride ion diffuse into the concrete. Concentrations close to the external storage solution were reached over a period of 274 days (age: one year). Despite the continuous reduction in OH^- concentration during storage, the concentration of silicon in fact increases (Figure 7). This enhanced silicon solubility can only be explained by the high concentrations of sodium and chloride ions which outweigh the effect of the pH reduction due to potassium

leaching. This effect is confirmed by the investigations of Dove and Elston (1992) who considered the solubility of quartz in different NaCl solutions. The solubility of silicon was found to increase in the presence of NaCl, see details in Section 11.1.3.3.

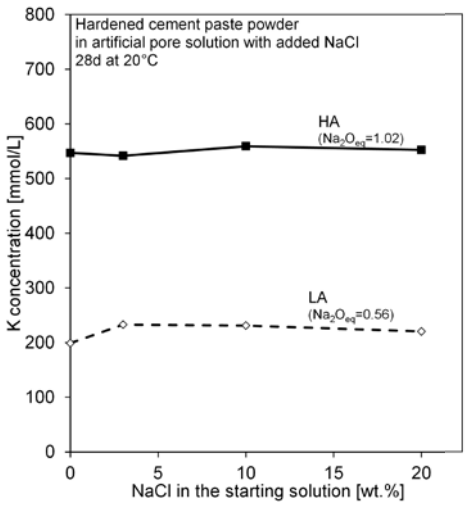
Similar changes in pore solution composition were observed by the present author in earlier experiments with concretes containing natural aggregates (Dressler 2013).

11.1.3.2. Hydrated Cement Paste Powder

The results of the storage experiments with hydrated cement paste powder in artificial pore solutions are presented in Figure 8 and Figure 9. Like the concrete, the NaCl storage started at an age of 91 d, but was terminated after 28 d when equilibrium between cement phases and pore solution was reached. Owing to the use of pure cement paste powders and the appropriate artificial pore solution, the effect of potassium leaching as well as alkali binding by ASR gel formation on the OH^- concentration were eliminated in these experiments. Transport effects are minimized as well owing to the use of finely ground, hydrated cement paste powder (< 63 µm).

Figure 8 (left):
Effect of addition of NaCl on the K concentration of the artificial pore solution after 28 d storage of hydrated cement paste powder for high and low alkali cements

Figure 9 (right):
Effect of addition of NaCl on the OH^- and SO_4^{2-} concentration of the artificial pore solution after 28 d storage of hydrated cement paste powder for high and low alkali cements



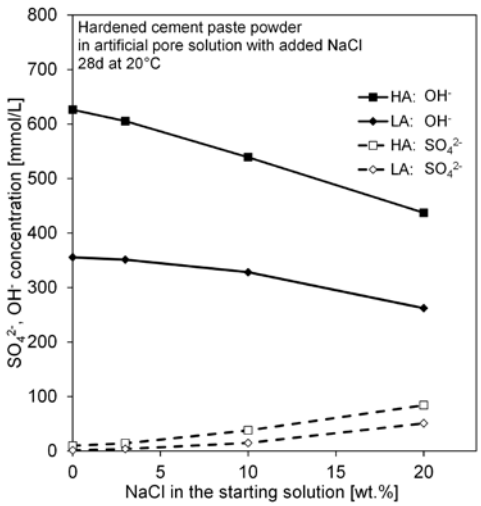
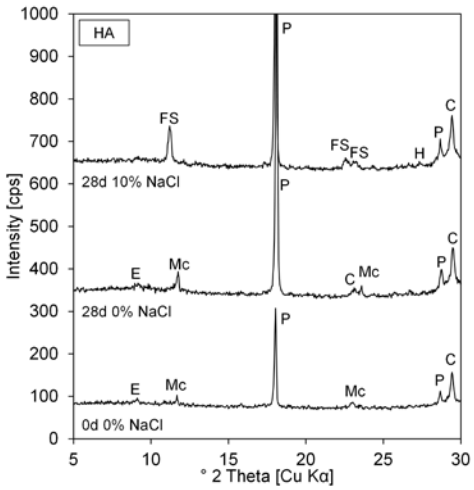


Figure 8 shows the potassium concentration in the artificial pore solution for increasing amounts of NaCl. The concentration is constant because in these experiments leaching was excluded. Nevertheless, the OH^- concentration clearly decreases when more NaCl is added to the initial storage solution (Figure 9). At the same time, the concentration of sulphate increases maintaining constant negative charge with the OH^- ions.

According to the XRD measurements with the powder specimens Friedel's salt is formed consuming AFm (monocarbonate) and AFt (ettringite) phases of the hydrated cements (Figure 10 and Figure 11).

The increase in sulphate concentration in Figure 9 is due to the reaction of chloride with ettringite ($3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O$) resulting in the formation of Friedel's salt ($3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}CaCl_2{\cdot}10H_2O$) and release of sulphate ions (Eq. 1). The available phases and solution pH are favourable for the formation of Friedel's salt.



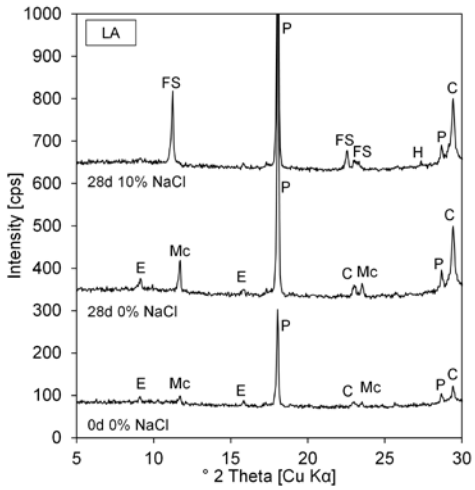


Figure 10 (left): Effect of addition of 10 wt.% NaCl to the artificial pore solution on the phase composition of the hydrated cement paste powder for cement HA (CEM I 32.5 R, Na_2O_{eq} = 1.02 wt.%); C: Calcite, E: Ettringite, FS: Friedel's salt, H: Halite, Mc: Monocarbonate, P: Portlandite

Figure 11 (right): Effect of addition of 10 wt.% NaCl to the artificial pore solution on the phase composition of the hydrated cement paste powder for cement LA (CEM I 32.5 R, Na_2O_{eq} = 0.56 wt.%); C: Calcite, E: Ettringite, FS: Friedel's salt, H: Halite, Mc: Monocarbonate, P: Portlandite

$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O + 2Na^+ + 2Cl^- + 4OH^- \Rightarrow$$
$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaCl_2\cdot 10H_2O + 22H_2O + 3SO_4^{2-} + 2Na^+ + 2Ca(OH)_2 \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Monosulphate ($3CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaSO_4\cdot 12H_2O$) was not detected by XRD in this investigation, but this phase also releases sulphate on forming Friedel's salt (Eq. 2) (Jones et al. 2003).

$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaSO_4\cdot 12H_2O + 2Na^+ + 2Cl^- \Rightarrow$$
$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaCl_2\cdot 10H_2O + 2H_2O + 2Na^+ + SO_4^{2-} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

The formation of Friedel´s salt also results in a change in pH of the pore solution depending on the phase participating in the reaction with NaCl. In case of ettringite, the pH is lowered owing to the formation of portlandite ($Ca(OH)_2$) (Eq. 1). Monosulphate transformation has no effect on pH (Eq. 2), but AFm containing hydroxide ($3CaO\cdot Al_2O_3\cdot Ca(OH)_2\cdot 18H_2O$) (Eq. 3) or carbonate ($3CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaCO_3\cdot 10H_2O$) (Eq. 4) can increase the pH of the pore solution.

$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot Ca(OH)_2\cdot 18H_2O + 2Na^+ + 2Cl^-$$
$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaCl_2\cdot 10H_2O + 8H_2O + 2Na^+ + 2OH^- \qquad \text{(Eq. 3)}$$

$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaCO_3\cdot 10H_2O + 2Na^+ + 2Cl^- + Ca(OH)_2$$
$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaCl_2\cdot 10H_2O + CaCO_3 + 2Na^+ + 2OH^- \qquad \text{(Eq. 4)}$$

The pore solution analysis and XRD results indicate that the decrease in pH and increase in sulphate concentration observed for the cements HA and LA are mainly due to the transformation of ettringite to Friedel's salt.

Similar changes in OH^- and SO_4^{2-} concentration were also observed for the pore solutions expressed from concrete specimens made with the same cements (Figure 4 and Figure 9) and using natural aggregates (Dressler 2013). The concentration of OH^- in the storage solution of the powder specimens (91 d sealed storage and 28 d in artificial pore solution) is generally higher (Figure 9) than that of the concretes after 91 d moist storage (Figure 4). Although the absolute concentrations in the artificial and concrete pore solutions differ, the general trends are similar. This difference is due to, for example, alkali consumption of the

reaction products of ASR (Helmuth et al. 1993), different storage conditions (e.g. pre-storage sealed or over water, leaching effects, prism sizes, Lindgård et al. 2013a; Lindgård et al. 2013b), amount of water in contact with solids (solution to solid ratio) etc.

11.1.3.3. Solubility Calculations

Owing to the effects considered above, the OH^- concentration in the pore solution of the concretes drops to values below 100 mmol/L (< pH 13.0) after 231 d storage in 20 wt.% NaCl solution (Figure 4). As a result, damaging ASR should, in theory, cease (Thaulow and Geiker 1992; Wieker and Herr 1989) because the necessary OH^- concentration for high silicon solubility and alkali silica gel formation is no longer reached. However, the above results show that exposure to NaCl increases the solubility of silicon in siliceous aggregate and therefore ASR expansion and damage significantly. This indicates that the promotion of ASR in the presence of externally supplied alkalis is linked to the increase in sodium chloride concentration in the pore solution by mechanisms other than the effect of pH on aggregate solubility. In particular, the expansion of the concrete with the low-alkali cement is accelerated markedly (65% more expansion in comparison to the pre-storage) in the presence of external alkalis. As mentioned above, this confirms the results of other authors (Giebson 2013) showing that low-alkali cements cannot in all cases inhibit damaging ASR in concrete exposed to deicing salt.

Dove and Elston (1992) considered the effect of dissolved sodium chloride on the dissolution of quartz between pH 1.4 and 12.3 and proposed the following mechanism. In the alkaline environment, negatively charged silicon surfaces dominate according to Helmuth et al. (1993). The sodium ions with their solvation shells are drawn towards the surface where the surface complexes $\equiv SiO^-$ are protonated by the water molecules in the shells (Figure 12). Thus OH^- ions form directly at the surface locally enhancing SiO_2 solubility. At pH > 6, more and more surface complexes $\equiv SiO^-$-Na^+ are expected which are, according to Dove (1994) and Dove and Elston (1992), associated with faster SiO_2 dissolution rates.

This effect can explain how sufficient silicon solubility for damaging ASR is achieved at relatively low OH^- concentrations in the presence of NaCl. It should be remembered that ASR usually occurs in concrete whose pore solution has a high pH (>13.5). Based on the results of Dove (1994; Dove and Elston 1992), the dissolution mechanisms of silicon in concrete containing reactive aggregates exposed to NaCl is summarized below (Figure 12).

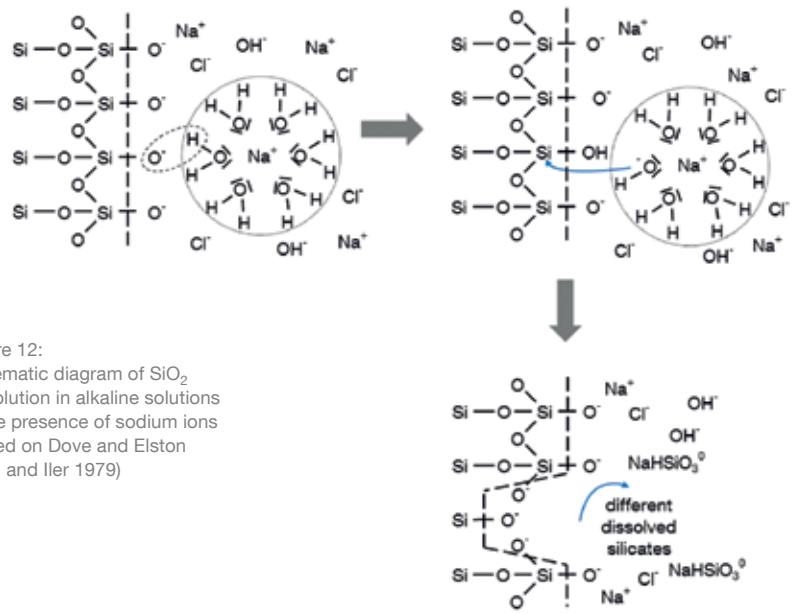


Figure 12:
Schematic diagram of SiO_2 dissolution in alkaline solutions in the presence of sodium ions (based on Dove and Elston 1992 and Iler 1979)

In order to study the effect NaCl on silicon solubility of the present concrete samples (at pH > 12.3) in more detail, simplified solubility equilibria in contrast to the ion-rich concrete pore solution were computed with the hydrogeochemical simulation program PHREEQC (Parkhurst and Appelo 1999) using the LLNL data base with

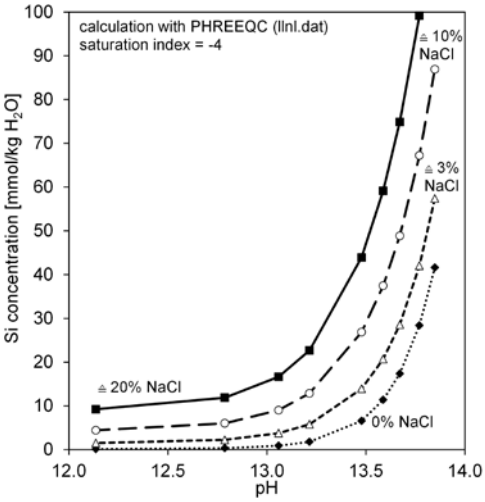


Figure 13:
Effect of NaCl concentration on silicon solubility in the model system; calculations with PHREEQC on the solubility of amorphous SiO_2 in KOH solution in the presence of excess portlandite (database: llnl.dat)

which the activity coefficients are specified by the WATEQ Debye Hückel equation. Leemann et al. (2011) observed that silica dissolution is also controlled by the amount of portlandite in contact with alkaline solutions. Thus the solubility of amorphous SiO_2 was calculated for a range of KOH solutions buffered by excess portlandite (to avoid depletion), Figure 13. In order to obtain realistic silicon concentrations near those measured for the pore solution in concrete at the end of the moist prestorage period (e.g. HA cement 0% NaCl: pH 13.5; 3 mmol/L Si, Figure 4 and Figure 7) the target saturation index was set to -4, i.e. the solubility of amorphous SiO_2 given in the data base was, in effect, reduced from $10^{-2.74}$ to $10^{-6.74}$ mol/kg H_2O. The reduced saturation index accounts for the removal of Si from the pore solution by the ASR gel. Different amounts of NaCl were then added to the solutions yielding silicon solubility curves as a function of pH and NaCl concentration. Although the calculation becomes increasingly inaccurate at ionic strengths above one, i.e. NaCl concentrations above roughly 6 wt.%, the data reveal a general increase in the solubility of silicon with NaCl concentration in approximate agreement with the experimental observations (e.g. HA cement 20% NaCl: pH 13.0; 11 mmol/L Si, Figure 4 and Figure 7). Thus, as observed in the present experiments, silicon solubility is shifted to a lower pH in the presence of dissolved NaCl. This would mean that silicate minerals become more sensitive to ASR on NaCl ingress.

According to the simulation results, the solubility of silicon is enhanced by the formation of an aqueous complex $NaHSiO_3^0$ which increases in concentration with pH and the amount of dissolved NaCl (Figure 14). This effect and the general decrease in activity of the aqueous silicate species produced by dissolved NaCl increase the solubility of silicon significantly. Moreover, the complex could be a precursor to the formation of alkali silica gel.

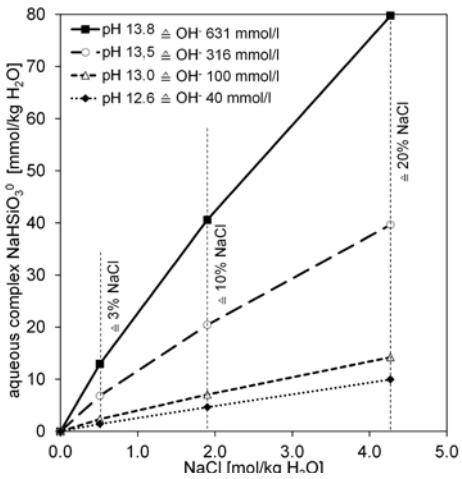


Figure 14:
Effect of NaCl concentration on formation of an aqueous complex $NaHSiO_3^0$ in the model system; calculations with PHREEQC on the solubility of amorphous SiO_2 in KOH solution in the presence of excess portlandite (database: llnl.dat)

11.1.4. Conclusions

Up to now the question whether damaging ASR in concrete is promoted by penetrating NaCl and which mechanisms can occur has not been adequately resolved. The effect of the exposure of concrete containing reactive siliceous aggregate to NaCl solutions on the chemical composition of the pore solution and expansion due to ASR has been investigated. Changes in pore solution composition due to the reaction of dissolved NaCl with the hardened paste matrix were determined in storage experiments with powder samples stored in artificial pore solutions containing NaCl. Based on the present experimental results and model calculations, the following conclusions were drawn for the effect of chloride ingress on ASR in concrete.

- Penetration of sodium and chloride ions causes a significant increase in expansion and ASR damage of concrete exposed to NaCl solutions.
- The use of low-alkali cements cannot inhibit damaging ASR due to NaCl exposure.
- The OH^- concentration, and therefore pH, of the concrete pore solution is mainly lowered by potassium leaching. The OH^- concentration is also lowered by the formation of Friedel's salt from ettringite. Sulphate is released and portlandite is formed accordingly.
- Despite a lower OH^- concentration, the Si concentration in the pore solution increases in the presence of dissolved NaCl. Probable causes are the reaction of protons in the solvation shell of the sodium ions with the SiO_2 surface, the formation of an aqueous complex $NaHSiO_3^0$ and the reduction in activity of the aqueous species because dissolved NaCl increases ionic strength.
- Moreover, the aqueous complex $NaHSiO_3^0$ could be a precursor to the formation of alkali silica gel.
- Chloride binding on hydrated cement phases and the corresponding release of OH^- ions does not significantly promote ASR. Decisive for ASR damage in concrete exposed to external NaCl is the total alkali content in the pore solution. This determines silicon solubility and thus gel formation.

Similar results were obtained for concretes containing natural, inhomogeneous aggregates, e.g. greywacke, in earlier investigations by the present author (Dressler 2013). Thus the present conclusions for borosilicate glass are also valid for natural aggregates.

11.1.5. Acknowledgements

The investigations were financed by the German Research Foundation (HE 3217/12-1).

References

[1] Breitenbücher R, Sievering C (2012) Cracking in concrete pavements due to alkali-silica-reactions. 10th International Conference on Concrete Pavements, Québec, Canada, pp 511 – 521

[2] Giebson C, Seyfarth K, Ludwig H-M (2012) Correlation of ASR performance testing for highway pavement concretes with field performance and investigations into boosting the alkali level. In: 14th International conference on alkali aggregate reaction, Austin, USA

[3] Bérubé MA, Dorion JF, Duchesne J, Fournier B, Vézina D (2003) Laboratory and field investigations of the influence of sodium chloride on alkali-silica reactivity. Cem Concr Res 33:77-84

[4] Chatterji S, Thaulow N, Jensen AD (1987) Studies of alkali-silica reaction. Part 4. Effect of different alkali salt solutions on expansion. Cem Concr Res 17:777-783

[5] Helmuth R, Stark D, Diamond S, Moranville-Regourd M (1993) Alkali-silica reactivity: an overview of research. Strategic highway research programm – national research council, Washington, D.C., USA

[6] Katayama T, Tagami M, Sarai Y, Izumi S, Hira T (2004) Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district. Japan Mater Charact 53:105-122

[7] Kawamura M, Arano N, Katafuta K (2000) ASR gel composition, secondary ettringite formation and expansion of mortars immersed in NaCl solution. 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec, Canada, pp 199-208

[8] Sibbick RG, Page CL (1996) Effects of sodium chloride on the alkali-silica reaction in hardened concrete. 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Melbourne, Australia, pp 822-829

[9] Sibbick RG, Page CL (1998) Mechanisms affecting the development of alkali-silica reaction in hardened concretes exposed to saline environments. Mag Concr Res 50:147-159

[10] Swamy RN (1992) The alkali-silica reaction in concrete. Blackie and Son Ltd, London, UK

[11] West G (1996) Alkali-aggregate reaction in concrete roads and bridges. Thomas Telford Publications, London, UK

[12] Iler RK (1979) The chemistry of silica. John Wiley & Sons, London, UK

[13] Efes Y (1980) Porengrößenverteilung von Mörteln nach Lagerung im Wasser und in einer Chloridlösung. Cem Concr Res 10:231-242

[14] Hoffmann DW (1984) Changes in structure and chemistry of cement mortars stressed by a sodium chloride solution. Cem Concr Res 14:49-56

[15] Taylor HFW (1997) Cement chemistry. second edition. Thomas Telford Service Ltd, London, UK

[16] Balonis M, Lothenbach B, Le Saout G, Glasser FP (2010) Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems. Cem Concr Res 40:1009-1022

[17] Birnin-Yauri UA, Glasser FP (1998) Friedel's salt, $Ca_2Al(OH)_6(Cl,OH)\cdot 2H_2O$: its solid solutions and their role in chloride binding. Cem Concr Res 28:1713-1723

[18] Brown P, Bothe J (2004) The system $CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}CaCl_2\text{-}H_2O$ at 23±2°C and the mechanisms of chloride binding in concrete. Cem Concr Res 34:1549-1553

[19] Suryavanshi AK, Scantlebury JD, Lyon SB (1996) Mechanism of Friedel's salt formation in cements rich in tri-calcium aluminate. Cem Concr Res 26:717-727

[20] Chatterji S, Jensen AD, Thaulow N, Christensen P (1986) Studies of alkali-silica reaction. Part 3. Mechanisms by which NaCl and $Ca(OH)_2$ affect the reaction. Cem Concr Res 16:246-254

[21] ASTM C441 – 05 (2005). ASTM International, West Conshohocken, USA

[22] Lane D, Ozyildirum H (1999) Evaluation of the effect of Portland cement alkali content, fly ash, ground slag, and silica fume on alkali-silica reactivity. Cement, Concrete and Aggregates 21:126-140

[23] Giebson C (2013) Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton für Fahrbahndecken und Flugbetriebsflächen unter Einwirkung alkalihaltiger Enteisungsmittel. Dissertation, Bauhaus Universität Weimar

[24] Giebson C, Seyfarth K, Stark J (2010) Influence of acetate and formate-based deicers on ASR in airfield concrete pavements Cem Concr Res 40:537-545

[25] Dressler A (2013) Effect of de-icing salt and pozzolanic, aluminous supplementary cementitious materials on the mechanisms of damaging alkali-silica reaction in concrete. PhD thesis, Technische Universität München

[26] Herr R, Wieker W (1992) The hydroxide-sulfate ion equilibrium in cement paste pore solutions and its significance to the theory of AAR in concrete. 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, UK, pp 440-450

[27] Dove PM, Elston SF (1992) Dissolution kinetics of quartz in sodium chloride solutions: Analysis of existing data and a rate model for 25°C. Geochim Cosmochim Acta 56:4147-4156

[28] Jones MR, Macphee DE, Chudek JA, Hunter G, Lannegrand R, Talero R, Scrimgeour SN (2003) Studies using ^{27}Al MAS NMR of AFm and AFt phases and the formation of Friedel's salt. Cem Concr Res 33:177-182

[29] Lindgård J, Sellevold EJ, Thomas MDA, Pedersen B, Justnes H, Rønning TF (2013a) Alkali-silica reaction (ASR) – performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on concrete porosity, moisture state and transport properties. Cem Concr Res 53:145-167

[30] Lindgård J, Thomas MDA, Sellevold EJ, Pedersen B, Andiç-Çakır Ö, Justnes H, Rønning TF (2013b) Alkali-silica reaction (ASR) – performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion. Cem Concr Res 53:68-90

[31] Thaulow N, Geiker MR (1992) Determination of the residual reactivity of alkali silica reaction in concrete. 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, UK, pp 1050-1058

[32] Wieker W, Herr R (1989) Zu einigen Problemen der Chemie des Portlandzements. Zeitschrift für Chemie 29:321–327

[33] Dove PM (1994) The dissolution kinetics of quartz in sodium chloride solutions at 25° to 300°C. Am J Sci 294:665-712

[34] Parkhurst DL, Appelo CAJ (1999) User's guide to PHREEQC (version 2) – a computer program for speciation, reaction-path, 1D-transport, and inverse geochemical calculations. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259,

[35] Leemann A, Le Saout G, Winnefeld F, Rentsch D, Lothenbach B (2011) Alkali–silica reaction: the influence of calcium on silica dissolution and the formation of reaction products. J Am Ceram Soc 94:1243-1249

In: Proceedings of Int. RILEM Conference MSSCE 2016, 25.-29.08.2016, Lyngby, Denmark

11.2. Investigating the role of moisture on concrete carbonation using single-sided ^{1}H-NMR

Charlotte Thiel [(1)], Robin E. Beddoe [(1)], Dirk Lowke [(1)], Christoph Gehlen [(1)]

Abstract

Accelerated test methods are commonly used in order to predict concrete carbonation in natural concentrations. Here, specimens are carbonated at high CO_2 concentrations at a specified temperature and relative humidity. However, the transfer of laboratory results to field behaviour remains difficult because CO_2 transport is affected by the original moisture content of the specimens and additional moisture formed by the carbonation reaction. Therefore knowledge on moisture transport and content during carbonation is required.

Specimens made with Ordinary Portland cement and a water/cement ratio 0.50 were exposed to 0.05, 2 and 10 vol.% CO_2 for 28 days. Single-sided NMR moisture profiles were determined before, during and after carbonation. It is shown that moisture content increases due to carbonation at high CO_2 concentrations (≥ 10 %) in the beginning of the exposure. An increase in capillary pore water in front and behind the carbonation front could be observed even after 28d. During natural carbonation moisture changes are mainly due to the change in porosity produced by the carbonation reactions. It is shown that changes in phase composition and thus porosity dominate the carbonation process in cement-based materials. Therefore, the suitability of high CO_2 concentrations is limited for an accelerated test that reflects field condition. Single-sided ^{1}H NMR proved to be a valuable tool to investigate moisture transport in concrete non-destructively.

11.2.1. Introduction

Reinforced concrete is one of the most important construction materials worldwide. It is almost arbitrarily shapeable and highly durable. Nevertheless, durability may be affected by mechanical attack or ingress of substances like sodium chloride or carbon dioxide (CO_2). Gaseous CO_2 diffuses from the atmosphere through the capillary pores of the concrete structure, dissolves in the pore solution and reacts with $Ca(OH)_2$ as well as with the alkali hydroxides [1-5]. $CaCO_3$ and water are formed. The moisture content of the concrete is crucial. If the concrete is too moist, the diffusion rate of CO_2 is significantly reduced. On the other hand, if the concrete is too dry, there is not enough water for the chemical reactions to take place. Regardless of the concrete composition and the CO_2 concentration, the optimal humidity for carbonation is around 50 % [1, 3, 6, 7].

Prediction models are used to estimate the carbonation behaviour in short-term. Here, the results of short-term laboratory performance tests provide important input parameters. Laboratory performance tests are based on the acceleration of carbonation by increasing the CO_2 concentration. However, with increasing CO_2 concentration the laboratory results deviate from theoretical calculation [3]. The reason for this is most likely due to the decrease of total porosity due to carbonation reaction. This leads to a lower CO_2 diffusion coefficient [3]. Another possibility is that the pore water content increases due to the carbonation reaction and thus leads to a blockage of capillary pores, preventing further transport of gaseous CO_2 in the pore system of the hardened cement paste [8]. The present contribution focuses only on the role of moisture in the carbonation process.

11.2. 2. Materials and Investigations

11.2.2.1 Materials

Mortars were prepared with Ordinary Portland cement and a w/c ratio 0.50, Table 1. In order to keep the scatter of the test results low, a maximum aggregate size of 2 mm was chosen for the investigations.

Table 1:
Mortar composition, the air void content was determined using the pressure gauge method

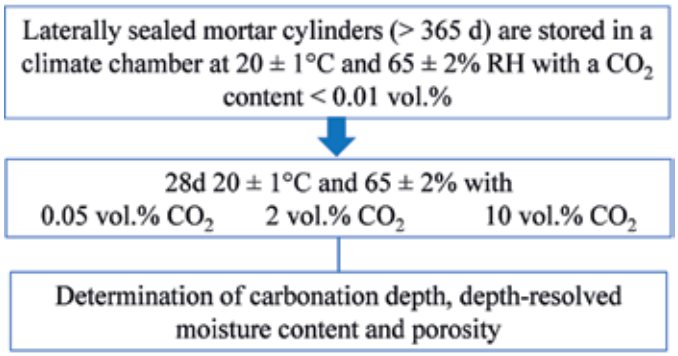
Name	Cement type	Cement content (kg/m³)	Water content (kg/m³)	Quartz Sand (kg/m³)
M1	Ordinary Portland Cement	552	276	1372

Cylinders with a diameter of 36 mm and a length of 3000 mm were produced and stored in a climate chamber with 20 ± 2° C and > 98 % RH. The cylinders were demoulded after 1 d. In order to minimize leaching, the cylinders were stored in saturated $Ca(OH)_2$ solution. The lateral surfaces of the samples were sealed at an age of 28 to 35 days with diffusion-proof epoxy resin. Three specimens were cut with a precision saw from the middle of the cylinder to a length of 720 ± 0.5 mm. The approximately 40 mm thick edge pieces were discarded so that edge effects (increased porosity etc.) can be neglected. The storage in saturated $Ca(OH)_2$ solution was continued until the specimens were at least 365 d. Thus hydration effects can be excluded from the test results. Afterwards, the specimens were stored at 20 ± 1 °C, 65 ±1 % RH in a CO_2 free atmosphere (< 0.01 % CO_2) until constant mass. The CO_2-free atmosphere was implemented by flooding the climate chamber with argon. In addition, a bowl of NaOH pellets was placed in the climate chamber as a CO_2 trap.

11.2.2.2 Investigations

Fig. 1 summarizes the experimental program. The samples were exposed to 0.05, 2 and 10 vol.% CO_2 for 28 days. The relative humidity during the experiments was 65 ± 2 % and the temperature 20 ± 1° C.

Figure 1:
Experimental program



The carbonation depth was measured by spraying a 1 % phenolphthalein indicator solution (70 % ethanol) on fractured surfaces [9]. The moisture distribution in the first 7 mm from the surface was investigated by means of ^{1}H NMR relaxometry. The NMR MOUSE "PM25" from Magritek was used. All measurements were carried out with the CPMG sequence [10, 11], 256 scans, and 256 echoes. One measurement lasted about 30 minutes. For each mea-

surement the specimens were carefully wrapped in cling film. The technique is described in more detail by Milachowski et al. [12]. The depth-resolved determination of the free and the adsorptively bound water is possible. The measured "NMR signal *S*" (amplitude of free induction decay) is directly proportional to the total water content and was converted by the NMR signal of a copper sulphate solution with a longitudinal relaxation time of 100 ms. By taking the density into account, the water content was calculated, Eq. 1.

$$w = \frac{S_{m,i}}{S_{w,i}} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_{m,i}} \qquad (1)$$

w: *Water content (wt.%)*
$S_{m,i}$: *Signal amplitude of free induction decay of investigated mortar specimen (arb. units)*
$S_{w,i}$: *Signal amplitude of free induction decay of reference copper sulfate solution (arb. units)*
ρ_w: *Density of water (kg/m³)*
$\rho_{m,i}$: *Density of mortar specimen (kg/m³)*

While for the determination of the carbonation depth one specimen was destroyed for each measurement, the measurement of the water content was carried out non-destructively on two specimens. In addition, the pore structure was determined by mercury intrusion porosimetry on selected samples. Here, a 2 mm disc was cut from the mortar surface with a precision saw. To enable a comparison of different series, the samples were dried at 40° C for seven days before performing the measurements. The AutoPore III from Micromeritics was used.

11.2.3. Results and Discussion

Fig. 2 shows the results of the NMR measurements and the colour indicator spray tests.

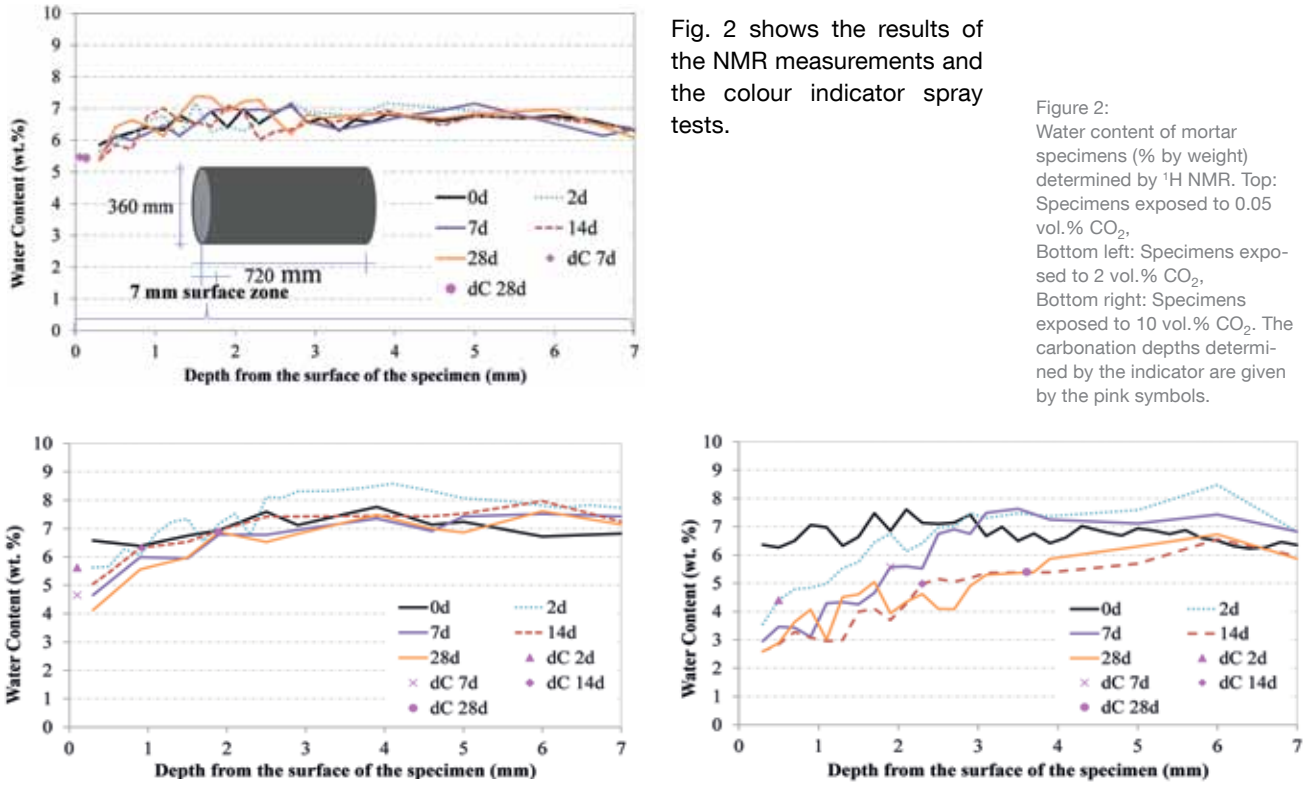


Figure 2:
Water content of mortar specimens (% by weight) determined by ¹H NMR. Top: Specimens exposed to 0.05 vol.% CO_2,
Bottom left: Specimens exposed to 2 vol.% CO_2,
Bottom right: Specimens exposed to 10 vol.% CO_2. The carbonation depths determined by the indicator are given by the pink symbols.

The climate data was logged during the exposure. Temperature and relative humidity remained within the given limits (20 ± 1 °C, 65 ± 2 % RH). During the CO_2 exposure, the natural environment had an average CO_2 concentration of 0.0046 vol.%, the 2 vol.% CO_2 environment had an average concentration of 2.01, and the 10 vol.% CO_2 an average concentration of 9.98 vol.% CO_2. As expected, the naturally carbonated samples had the lowest carbonation depth which was 0.13 mm after 28 d. The samples exposed to 2 and 10 vol.% CO_2 had an average carbonation depths of 1.9 and 3.6 mm, respectively. The theoretical acceleration factor is the square root of the accelerated concentration divided by the natural one, [3]. The theoretical accelerations for the 2 and 10 % exposures are 20.9 and 46.6, respectively. Thus, the actual carbonation depths were 70 and 60 % lower than the theoretical ones for the samples exposed to 2 and 10 %, respectively.

The initial moisture content (black lines in Fig. 2) in the surface area was between 5.8 and 7.6 %. No significant moisture gradient within the first 7 mm from the surface was observed which indicates that the duration of preconditioning at 65 % RH was sufficient.

In the course of the CO_2 exposure, only minor changes occurred in the moisture content for the samples exposed to 0.05 % CO_2. Thus, right from the start, a slight moisture gradient can be observed from 0.3 to approximately 1.3 mm. This gradient becomes steeper with increasing duration of exposure.

After 2 d exposure to 2 vol.% CO_2 a higher moisture content inside the sample (1 – 6 mm) was measured. With increasing exposure time a decrease in moisture content in the carbonated surface region is apparent. This phenomenon is even more pronounced for the 10 vol.% CO_2 exposure. While the carbonation depth after 2 d is only 0.5 mm, a well-defined moisture gradient up to a depth of approximately 2 mm exists. In addition, at depths over 3 mm, the moisture content increases above the initial value. During subsequent exposure, the carbonated surface zone continued to dry until a moisture content of 3 wt.% was measured at the surface after 14 d. Afterwards, only minor changes in moisture occur within the first 3 mm. This suggests that the carbonation reaction has finished in this region and the material has reached a new equilibrium moisture content due to the change in porosity and phase composition. This is in good agreement with the porosities measured for the first 2 mm from the surface, Table 2.

Table 2:
Total porosity (2 mm surface zone) and thereof capillary (> 30 nm) and gel porosity (≤ 30 nm) of OPC mortar samples after 0, 7 and 28 days at atmospheric pressure and a CO_2 concentration of 10 vol.%. Pore size boundary between gel and capillary pores adopted from M. J. Setzer [13].

Porosity after	Total Porosity (vol.%)	Gel Pores (vol.%)		Capillary Pores (vol.%)	
		Absolute	Relative	Absolute	Relative
0d	16.61	10.83	65.2	5.78	34.8
7d	12.33	6.46	52.4	5.87	47.6
28d	14.47	5.44	37.6	9.03	62.4

At a relative humidity of 65 %, only pores with a radius of 2.5 nm (fine gel pores) are filled with water according to the well-known Kelvin equation. Whereas the carbonation of the hydration products and calcite formation reduce the total porosity somewhat (16.61 to 14.45 vol.%), the destruction of the C-S-H phases results in a significant decrease in gel pore volume fraction (10.83 to 5.44 vol.%). Thus the reduction in water content in the surface zone produced by carbonation (Fig. 2, bottom) corresponds to the reduction in gel pore volume.

The decrease in total porosity and the gain in capillary pores are in good agreement with observations in the literature [13, 14].

A reduction in carbonation rate due to water formed by the carbonation reactions was only observed in the beginning (2d) of the accelerated exposure. Here, a region of higher moisture content between 2.5 to 7 mm was present after 2 d. Using Numerical Inverse Laplace Transformation the total water content was related to physically bound water content ($T_2^* < 0.39$ ms) and capillary water ($T_2^* \geq 0.39$ ms), fig. 3.

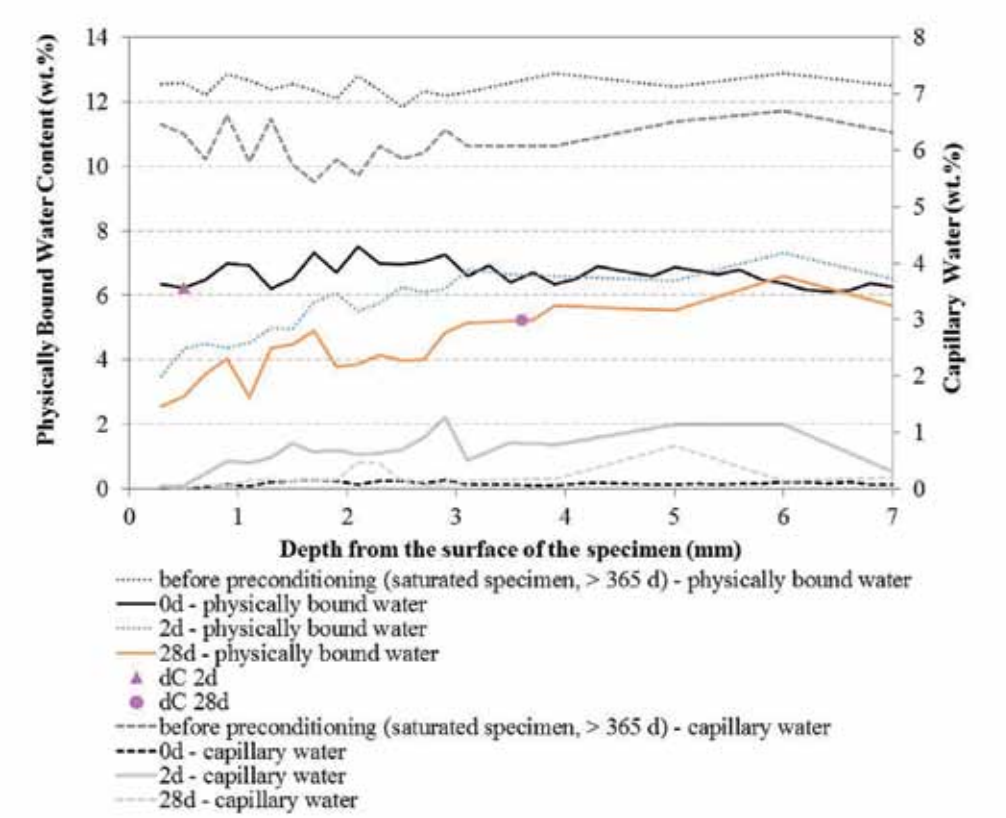


Figure 3:
Physically Bound Water content and Capillary Water content (% by weight) of mortar specimens exposed to 10 vol.% CO2. The carbonation depths determined by the indicator are given by the pink symbols.

While the physically bound water content decreases with the decrease in gel porosity (10.83 to 5.44 vol.%), the capillary water content increases at the beginning of the accelerated carbonation from a depth of about 0.7 mm. Since the measured carbonation depth was 0.5 mm, this increase can be assigned to the carbonation reaction. An increase before as well as behind the measured carbonation depth can be observed even after 28 d. Since the capillary pores are the main transport paths for gaseous CO_2 diffusion, this suggests that the water produced by the carbonation reaction hinders further CO_2 ingress. However, the increase in capillary water remains well below the content of the specimen before initial drying (dotted and dashed lines in fig. 3). In addition, the equilibrium moisture content is rapidly reached in the first mm from the surface. Therefore, changes in phase composition and thus porosity dominate the carbonation process in cement-based materials.

11.2.4. Conclusions

The resistance to carbonation of cement-based materials is determined using accelerated tests with high CO_2 concentrations. However, compared with natural carbonation the acceleration is lower than theoretically expected for the effect of concentration on diffusion rate. One possible reason is that water formed by carbonation reaction blocks the pores and slows down CO_2 diffusion. Single-sided ^1H NMR was used to investigate the distribution of moisture at depths up to 7 mm from the surface of mortar samples exposed to 0.05, 2 and 10 vol.% CO_2. The first measurement took place after 2 d exposure to CO_2. Two different phenomena were observed. The moisture content decreased in the carbonated surface region (< 2 mm) significantly. This can be attributed to a decrease in (gel pore) porosity. An increase in water content was observed after 2 d accelerated exposure at depths between about 2 and 6 mm. With data processing of the NMR results, this water could be attributed to the capillary pores. However, this increase remained well below the level of a fully saturated sample. Therefore, a waterfront that possibly blocks the capillary pores and hinders further carbonation could not be observed. The measurements showed that single-sided NMR is a valuable tool to investigate transport processes in cement-based materials non-destructively.

11.2.5. Acknowledgement

The financial support of the German research Foundation (DFG) is gratefully acknowledged.

References

[1] Verbeck, G. J., Carbonation of Hydrated Portland Cement, Res Develop Lab of PCA, Bulletin 87 (1958)

[2] Parrot, L. J. A., A review of carbonation in reinforced concrete. C&CA/BRE Report C/1-0987. British Cement Association (1987)

[3] Hunkeler, F. and Lammar, L., Requirements for the carbonation resistance of concrete mixes. Report VSS No. 649, Nov. 2012. Download: http://www.tfb.ch/de/Publikationen. html

[4] Houst Y. F.: The Role of Moisture in the Carbonation of Cementitious Materials, J of Rest Build 2 (1996), 49-66

[5] Hyvert, N.,Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton, Thèse de l'université de Toulouse (2009)

[6] Papadakis., V.G.; Vayenas, C.G. and Fardis, M.N., Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation, ACI Material Journal, July-August 1991, 363-373

[7] De Ceukelaire, L. and Van Nieuwenburg, D., Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete, Cem and Concr Res 23 (1993), 442–52

[8] Reardon, E. J.; James, B. R.; Abouchar, J., High pressure carbonation of cementitious grout. Cem Concr Res 19 (1989), 385-399

[9] Rilem Committee C56, Measurement of hardened concrete carbonation depth, CPC-18, Mat Struct 21 (1988), 453-455

[10] Carr, H.Y., Purcell, E.M., Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments, Phys Rev 94 (1954), 630–638

[11] Meiboom, S., Gill, D., Modified spin–echo method for measuring nuclear relaxation times, Rev Sci Instrum 29 (1958), 688–691

[12] Milachowski, C.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Detection of transport processes during Freeze-thaw deicing salt attack using single-sided NMR. Proc. of 2nd Conference on Microdurability, Amsterdam, 11.–14.04.2012, 2012

[13] Setzer, M. J.: Basis of testing the freeze-thaw resistance: surface and internal deterioration. In: Frost Resistance of Concrete. M. J. Setzer und R. Auberg (Hrsg.), E & FN Spon, 1997, S. 157-173

[14] Stark, J.; Wicht, B.: Zement und Kalk – Der Baustoff als Werkstoff. Birkhäuser, 2000, S. 203-204, 233, 260

[15] Thiery et al: Effect of carbonation on the microstructure and the moisture properties of cement-based materials, XII DBMC, Porto, Portugal (2011)

In: V1640 Instandsetzung von Betonbauteilen bei Abwasseranlagen, Ing.-Akademie Bayern, 10.11.2016

11.3. Beton in Kontakt mit Abwasser: Ausgewählte laboranalytische Methoden

Dr. rer. nat. Harald Hilbig, Centrum Baustoffe und Materialprüfung, TU München

11.3.1. Einleitung

Die Herausforderungen für Betonrohre im Abwasserbereich bezüglich des chemischen Angriffs sind hoch und vielfältig. Dabei spielt zwar das Abwasser die entscheidende Rolle, aber auch die Temperatur und die Belüftungssituation können von Bedeutung sein. Ist ein Schaden entstanden, ist es wichtig, die Ursachen einzugrenzen, um ein erfolgreiches Sanierungskonzept auszuarbeiten. In diesem Beitrag werden analytische Möglichkeiten vorgestellt, die sowohl aus Sicht des Abwassers als auch des Betons zu einer Eingrenzung der Schadensursache beitragen können.

11.3.2. Analytik des Abwassers

Abwasser ist die zusammenfassende Bezeichnung für Wässer, die nach der Nutzung abgeleitet und gegenüber der natürlichen Beschaffenheit nachteilig chemisch, physikalisch und/oder biologisch verändert wurden. Je nach Herkunft kann die Zusammensetzung stark schwanken. Auch jahreszeitlich und je nach Wochentag oder Tageszeit sind hohe Schwankungen in der Zusammensetzung zu erwarten. Dessen sollte man sich bei Probenahmen bewusst sein.

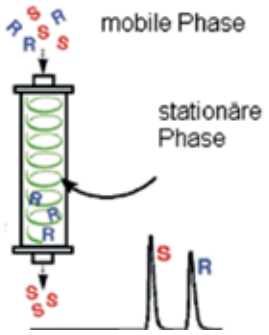
Die Verunreinigungen können als absetzbare, nichtabsetzbare (Schwebstoffe) und gelöste Stoffe oder als Schwimmstoffe vorliegen. Zu den vorwiegend anorganisch verunreinigten Abwässern gehören die Abwässer der Industrie. Die verunreinigenden Komponenten dieser Abwassergruppe bestehen vor allem aus Sand, gelösten Mineralien, Salzen, Metall- und Schwermetall-Ionen. Vorwiegend organisch verunreinigte Abwässer entstehen z. B. bei der Gewinnung und Verarbeitung von Kohle, Erdöl, Holz, Zellstoff sowie in der Papier-, Farb- und Lebensmittelindustrie. Auch die häuslichen und städtischen Abwässer sind in der Regel überwiegend organisch verunreinigt. In diesen Abwässern können die verschiedensten organischen Stoffgruppen vertreten sein, so dass eine qualitative Erfassung der einzelnen Inhaltsstoffe zwar möglich, jedoch sehr aufwendig ist. Phenole, Ketone, Aldehyde, Alkohole, Öle, Fette, Detergentien, Amine, Kohlenhydrate und Eiweißverbindungen sind die wichtigsten Vertreter organischer Verunreinigungen, im häuslichen und städtischen Abwässern natürlich auch Keime, Bakterien und Viren.

Zur Charakterisierung des Abwassers werden überwiegend Summenbestimmungsmethoden, nur selten Einzelstoffanalysen eingesetzt. Die wichtigsten Methoden sind: der biochemische Sauerstoffbedarf (BSB), der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) und der Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff (TOC), wobei hier als Modifikation aufgrund des einfacheren Bestimmungsverfahrens häufig der gelöste organische Kohlenstoff (DOC) genutzt wird.

Für eine Betonschädigung sind vor allem Säuren (organische oder anorganische) und verschiedene Salze (Chlorid, Sulfat, Nitrat, Ammonium) problematisch. Von Nährstoffen für Bakterien, die betonschädigende Substanzen erzeugen, muss man immer ausgehen. Für einzelne Parameter (pH-Wert, Sulfat, CO_2 angreifend, NH_4, Mg) sind in der DIN EN 206-1 Grenzwerte hinterlegt.

Beim Verdacht eines gepufferten Systems, also bei Anwesenheit von organischen Säuren oder Ammonium ist eine pH-Wert-Bestimmung mit einer pH-Elektrode nicht ausreichend und zusätzlich eine pH-Titration zu empfehlen. In so einem Fall wäre für eine Schädigung des Betons die Säurekapazität, und nicht der reine pH-Wert entscheidend.

Zur Bestimmung der Salze wird zum einen die Ionenchromatografie eingesetzt. Hier werden die gelösten Ionen über das unterschiedliche Verteilungsgleichgewicht zwischen einer mobilen und einer stationären Phase (Adsorption und Extraktion) aufgetrennt (vgl. Abbildung 1) und anschließend meist mit einem Leitfähigkeitsdetektor bestimmt. Als stationäre Phase dient ein Ionenaustauscherharz, als mobile Phase ein wässriger Eluent mit Polarität je nach Trennaufgabe (meist ein Hydrogencarbonatpuffer). Bei dieser Methode dürfen die zu untersuchenden Wässer keine zu starken Verschmutzungen aufweisen und werden meist in einer Vorfiltration gereinigt und für die Messung verdünnt.



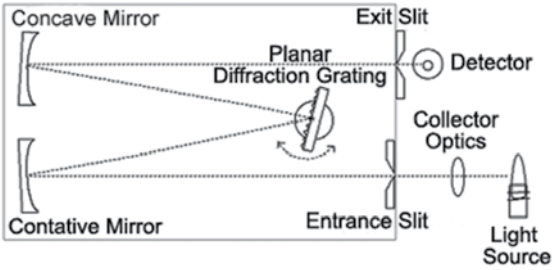


Abbildung 1 (links): Schematische Darstellung einer Ionenchromatografie (Quelle: http://daten.didaktik-chemie.uni-bayreuth.de/umat/enantiomere/enantiomere_synthetisch.htm)

Abbildung 2 (rechts): Schematischer Aufbau einer ICP-OES

Zum anderen wird zur Analyse von Flüssigkeiten die ICP-OES (= optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppelter Plasmaanregung) eingesetzt. Bei dieser Methode wird die Probe in ein Argonplasma gesprüht. In diesem Argonplasma herrschen Temperaturen von bis zu 10000 K. Bei diesen hohen Temperaturen wird die Probe atomisiert und teilweise ionisiert. Gleichzeitig führt es zu angeregten Zuständen der Atome und Ionen. Erreichen nun diese angeregten Atome und Ionen kühlere Bereiche, gehen diese wieder in den Grundzustand zurück. Dabei geben sie elektromagnetische Strahlung ganz spezifischer Wellenlänge ab. Diese Emissionen werden von der angebauten Optik ausgewertet (vgl. Abbildung 2). Man erhält daraus die Information, welche Elemente in der Lösung vorhanden sind und in welcher Konzentration. Dabei lassen sich nahezu alle Elemente des Periodensystems bestimmen. Durch die extrem niedrigen Bestimmungsgrenzen wird die Methode auch in der Spurenanalytik eingesetzt.

11.3.3. Analytik des Betons

Wurde ein Beton mit Abwasser beaufschlagt, ist die zentrale Fragestellung, inwiefern er dadurch geschädigt wurde. Daraus ergeben sich für die Analytik folgende Aufgaben: Sie soll belegen, inwiefern Substanzen aus dem Abwasser in den Beton eingedrungen sind. Gleichzeitig kann es zur Auslaugung von Betonbestandteilen kommen. Da die ausgelaugten Anteile nicht mehr vorhanden sind, muss dies anhand der Zusammensetzung des Betons bestimmt werden. Als zusätzliche Aufgabe kann man das Aufzeigen von Betonschädigungen sehen. Wobei hier optisch erkennbare Schädigungen gemeint sind, die mit Hilfe von mikroskopischen Methoden deutlich gemacht werden können oder eine einfache Bestimmung einer Neutralisationstiefe mit Phenolphthalein. Aber tiefergehend kann man hier auch die Änderung des Mineralphasenbestandes einschließen.

Je nach Fragestellung gibt es grundsätzlich drei verschiedene Probenahmearten, die jeweils Vorteile bieten. Analoges gilt auch für die anzuwendenden Analysenmethoden. Will man an der Oberfläche abgeschiedenes Material oder Ausblühungen näher untersuchen, beschränkt man sich besser auf Kratzproben von der Oberfläche. Hier kommen vor allem Analysenmethoden zur Bestimmung der Mineralphasen zu Einsatz, z. B. die Infrarotspektroskopie (IR), die Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD) und die Festkörper-NMR-Spektroskopie (NMR).

Die Infrarotspektroskopie ist eine schnelle Messmethode, die keine besondere Probenvorbereitung benötigt und mit extrem wenig Probenmaterial zurechtkommt. Sie liefert jedoch im Allgemeinen nur qualitative Aussagen, bei komplexer zusammengesetzten Proben ist eine Auswertung der Messergebnisse oft nicht mehr zufriedenstellend möglich. In Infrarotspektren werden bindungsspezifische Absorptionsmuster meist über einen Vergleich mit einer Spektrenbibliothek ausgewertet. In Abbildung 3 ist als Beispiel ein IR-Spektrum eines Estriches im Vergleich mit Bibliotheksspektren dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass sich

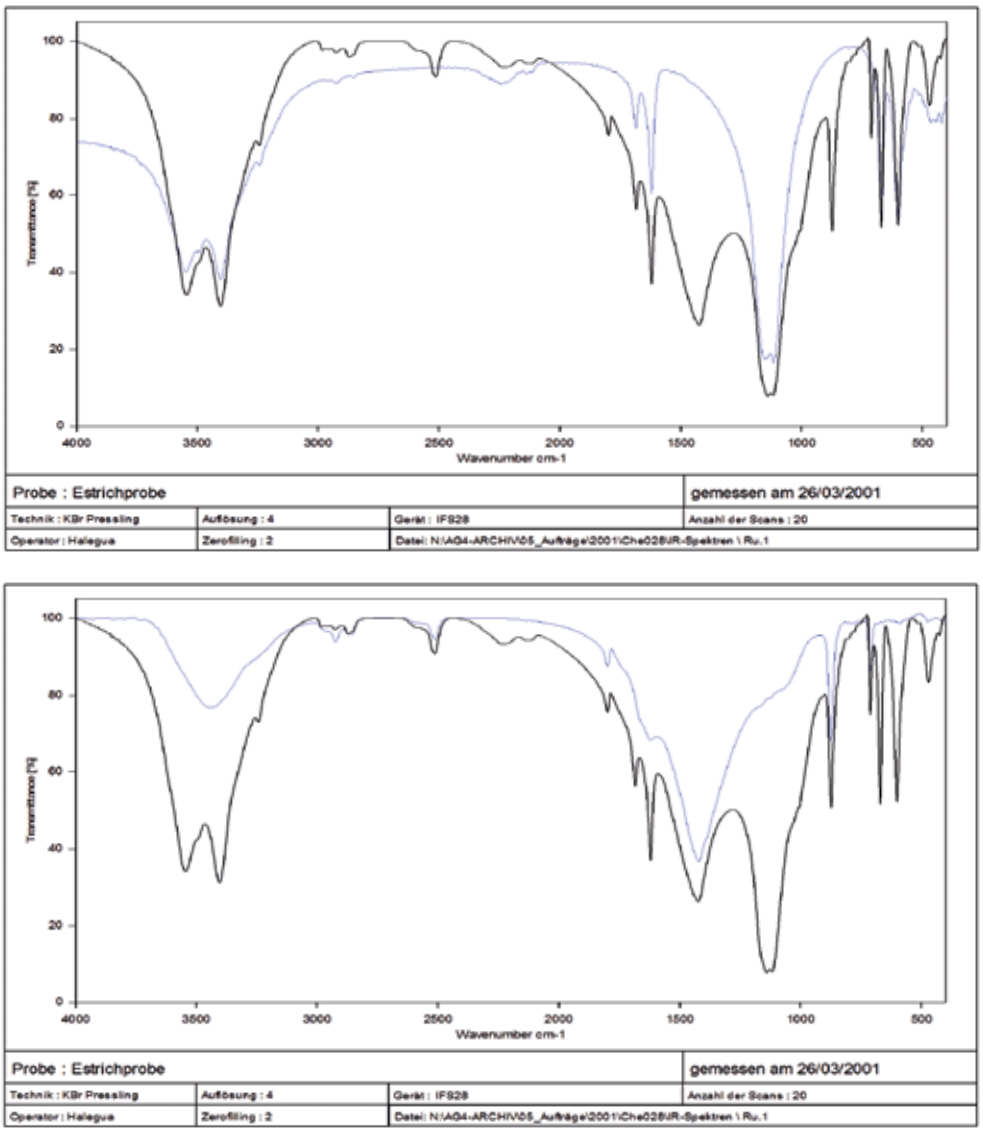


Abbildung 3:
IR-Spektrum eines Estriches, oben im Vergleich mit einem IR-Spektrum von Gips, unten im Vergleich mit einem IR-Spektrum von $CaCO_3$ (jeweils aus der geräteeigenen Spektrenbibliothek)

das IR-Spektrum des Estriches als eine Kombination von Gips ($CaSO_4$*$2H_2O$) und Kalk ($CaCO_3$) zusammensetzt.

Bei der Röntgenpulverdiffraktometrie erfolgt die Strukturanalyse über die Beugung von Röntgenstrahlen an den Kristallatomen. Daraus ergibt sich die Einschränkung, dass auch nur kristalline Phasen analysiert werden können. Amorphe Bestandteile wie CSH-Phasen lassen sich nur als Summe „Amorphes“ bestimmen. Die quantitative Auswertung erfolgt nach der sogenannten „Rietveld-Methode“. Dadurch ist es möglich, eine quantitative Phasenzusammensetzung zu ermitteln. Ein Beispiel eines Röntgendiffraktogramms einer Betonprobe ist in Abbildung 4 dargestellt.

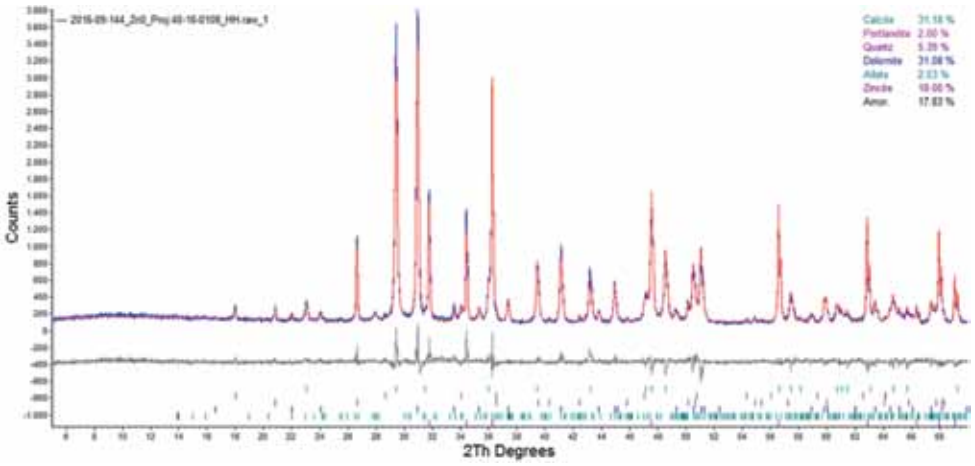


Abbildung 4:
XRD-Aufnahme einer Betonprobe mit Rietveld-Auswertung (10 % ZnO als interner Standard)

Will man zusätzliche Informationen über die amorphen Anteile gewinnen, besteht die Möglichkeit der Festkörper-NMR-Spektroskopie. NMR steht für „nuclear magnetic resonance“, übersetzt wird es als Kernspinresonanz. Die Methode benutzt als Messsignal das unterschiedliche Verhalten von Atomkernen im Magnetfeld. Das unterschiedliche Verhalten beruht auf die verschiedenen Wechselwirkungen der Atomkerne mit deren Nachbaratomen und liefert somit Informationen über den Molekülaufbau. Da hierzu keine Fernordnung (Kristallinität) nötig ist, werden hier auch amorphe Strukturen erfasst. Da sich Atomkerne verschiedener Elemente ohnehin schon deutlich unterschiedlich verhalten, kann man diese in getrennten Messbereichen analysieren. Daher spricht man dann von z. B. ^{1}H-, ^{29}Si- oder ^{27}Al-NMR. Abbildung 5 zeigt ein „aufgeschnittenes“ NMR-Spektrometer. Dominant ist der große Kühlmantel, da zur Erzeugung der benötigten hohen Magnetfelder Supraleiter eingesetzt werden, die mit flüssigem Helium und Stickstoff gekühlt werden müssen.

Abbildung 5:
links: Probenbehälter („Rotoren“) verschiedener Größe,
rechts: „aufgeschnittenes” NMR-Spektrometer (Deutsches Museum, München)

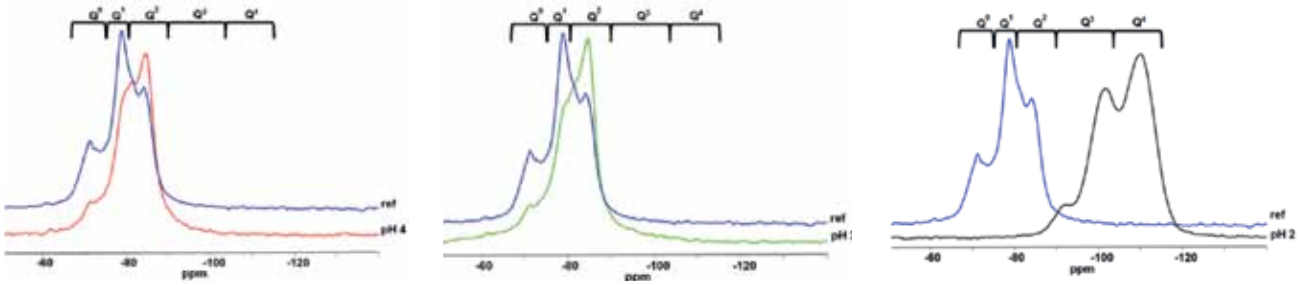
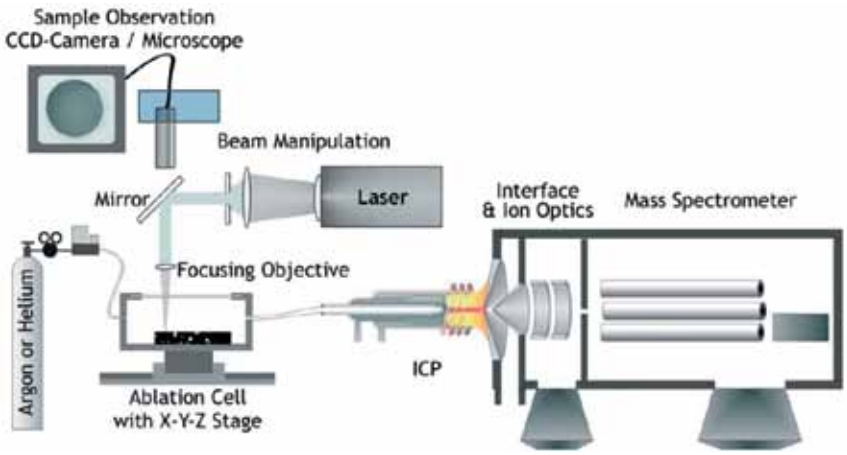


Abbildung 6:
^{29}SI-NMR-Spektren von Zementsteinproben nach 28d Lagerung in Salzsäure mit pH4 (rot), pH3 (grün), pH2 (Schwarz); blau: vor der Lagerung

Anhand der Signalpositionen in einem NMR-Spektrum kann man nun Rückschlüsse auf Molekülstruktur erhalten. So lassen sich der Grad der Koordination und der Einfluss der benachbarten Atome erkennen. In Abbildung 6 sind verschiedene ^{29}Si-NMR-Spektren von Zementsteinproben nach unterschiedlichen Säurebelastungen dargestellt. Die blaue Kurve stellt das ^{29}Si-NMR-Spektrum der Ausgangsprobe dar. Zu erkennen sind Anteile an nicht-hydratisieren C_2S (Q^0) sowie CSH-Phasen in ihrer Kettenstruktur mit Anteilen an endständigen (Q^1) und verbrückenden (Q^2) Si-Atomen. Dem gegenübergestellt wurden die ^{29}Si-NMR-Spektren von Proben, die jeweils für 28 Tage in Salzsäure mit pH-Werten von 4, 3 und 2 gelagert wurden. Deutlich zu erkennen ist, dass es bei den pH-Werten 4 und 3 zu einer Änderung der Gewichtung zwischen den endständigen und den verbrückenden Si-Atomen kommt. Die CSH-Phasen bilden längere Ketten, eine Folge von Ca-Entzug. Eine Lagerung bei pH 2 führt zu einer kompletten Änderung der Struktur. Es kommt zu einer Quervernetzung der Si-Ketten (Q^3) bis hin zu einer kompletten dreidimensionalen Vernetzung (Q^4), was einher geht mit einem nahezu vollständigen Festigkeitsverlust.

Eine wichtige Fragestellung ist, wie tief der Beton beeinträchtigt wurde. Konventionell wird hier Bohrmehl aus verschiedenen Tiefenlagen genommen und jeweils nach den entsprechenden Parametern analysiert. Dies ist eine aufwendige und kostenintensive Methode. Inzwischen gibt es am cbm die Möglichkeit, mit Hilfe der Laser-Ablations-ICP-MS (LA-ICP-MS) an Schnitten ortsaufgelöste Elementanalytik über mehrere Quadratzentimeter mit einer Auflösung von wenigen µm durchzuführen. Bei dieser Methode wird mit einem energiereichen Laser Material aus der Oberfläche herausgeschossen und mit einem Trägergas in das eigentliche Messgerät, ein ICP-MS (Massenspektrometer mit induktiv gekoppelter Plasma-

Abbildung 7:
Schematische Darstellung einer LA-ICP-MS (Quelle: Solid sample analysis using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, D. Günther, B. Hattendorf, Trends in Analytical Chemistry 24 (2005), 3, 255-265



ionisierung) transportiert (vgl. Abbildung 7). Dort lässt sich eine Vielzahl von Elementen im Spurenbereich quantifizieren.

An Querschnitten der oben erwähnten säuregelagerten Zementsteinscheiben konnten so zum Beispiel das Eindringen von Chloriden und das Auslaugen der verschiedenen Elemente beobachtet werden (vgl. Abbildung 8). So ist in Abbildung 8 deutlich zu erkennen, dass Chlorid bei pH 3 die Probe bereits komplett durchdrungen hat.

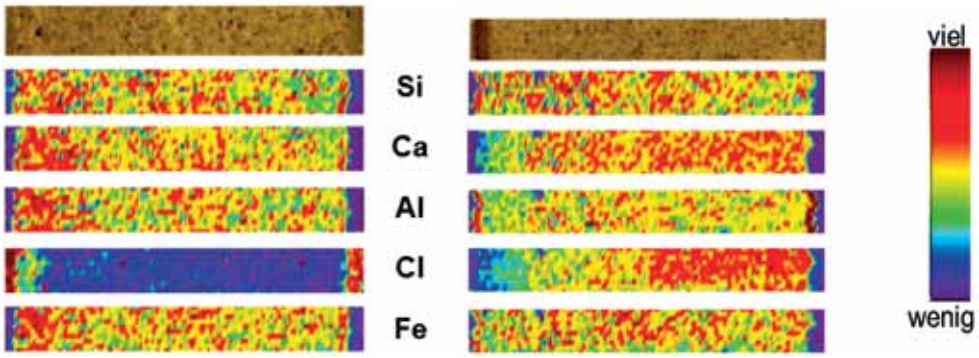


Abbildung 8:
Ergebnisse der LA-ICP-MS-Analyse an Zementsteinscheibenquerschnitten:
links: vor der Lagerung;
rechts: nach 28d Lagerung in HCl pH3

11.3.4. Fazit

Je nach Fragestellung bieten sich verschiedene Analysenmethoden an. Es ist jedoch schon bei der Probenahme zu bedenken, welche Frage beantwortet werden soll. Aufgrund der großen Schwankungen in dessen Zusammensetzung sind einzelne Analysen des Abwassers selbst kritisch zu betrachten. Mehr Aussagekraft besitzen Analysen des Betons. Es wurden einige sehr spezifische Methoden vorgestellt, die ihre Anwendungen noch verstärkt in der Forschung finden, jedoch charakteristische Informationen liefern und sicher in naher Zukunft auch im Materialprüfungsbereich verstärkt eingesetzt werden.

Literatur

[1] H. Hilbig, F.H. Köhler, P. Schießl, Hydratation von Hochleistungs-Feinkorn-Betonen, NMR-spektroskopische Untersuchungen, 15. Internat. Baustofftagung, ibausil, Weimar, 2003, S. 1-0489 – 1-0496

[2] T. Gutberlet, H. Hilbig, R.E. Beddoe, Acid attack on hydrated cement — Effect of mineral acids on the degradation process, Cem. Concr. Res., 74 (2015) 35-43.

[3] S. Schwindl, M. Rommel, T. Gutberlet, R. E. Beddoe, H. Hilbig, Untersuchung von säuregelagerten Zementsteinproben mit LA ICP MS, GDCh-Monographie Bd. 48, (2014), S. 45-48

[4] H. Hilbig, E. Löhr, T. Gutberlet, R.E. Beddoe, Einfluss aluminiumhaltiger Zusatzstoffe auf die Struktur und Festigkeit der korrodierten Schicht von Beton beim Säureangriff, 19. Internat. Baustofftagung ibausil, Weimar, 2015, S. 2-25 – 2-32.

[5] B. Huber, H. Hilbig, M. M. Mago, J. E. Drewes, E. Müller, Comparative analysis of biogenic and chemical sulfuric acid attack on hardened cement paste using Laserablation-ICP-MS, Cem. Concr. Res. 87 (2016) 14-21

Das gesamte Bildmaterial der Beiträge 11.4, 11.5 und 11.6 wurde vom Institut für Bauforschung Aachen (ibac) der RWTH AACHEN UNIVERSITY zur Verfügung gestellt.

B+B BAUEN IM BESTAND: BETONINSTANDSETZUNG
In: 2-2016, März 2016, S. 16 – 23

Die neue Instandhaltungs-Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Teil 1

11.4. Neue Regeln braucht das Land

Michael Raupach, Heinrich Bastert, Angelika Eßer, Christoph Gehlen, Wilhelm Hintzen, Inga Hohberg, Hans-Carsten Kühne, Kenji Reichling, Andreas Westendarp, Udo Wiens und Lars Wolff

Abbildung 1:
Die zu planende Restnutzungsdauer hat einen wesentlichen Einfluss auf die Wahl des Instandhaltungskonzepts. Ist zum Beispiel nur noch eine kurze Restnutzungsdauer und ein baldiger Abriss vorgesehen, können regelmäßige Inspektionen und Wartungen ausreichen.

Mit Veröffentlichung der europäischen Normenreihe EN 1504 in den Jahren 2004 bis 2008 mussten in Deutschland die bisherigen nationalen Regelungen für die Instandsetzung von standsicherheitsrelevanten Betonbauteilen angepasst werden. Im vorliegenden Entwurf der neuen Instandhaltungs-Richtlinie wurden die Hinweise zur Planung und Durchführung von Instandsetzungsmaßnahmen aus der Instandsetzungsrichtlinie des DAfStb von 2001 [1] entsprechend überarbeitet und aufgrund neuer Erkenntnisse ergänzt. Außerdem wurde das Regelwerk um Gesichtspunkte der Instandhaltung erweitert, so dass die Aspekte Wartung, Inspektion und Verbesserung nun in Anlehnung an DIN 31051 [2] berücksichtigt werden. Zudem wurden Regelungen aus der ZTV-ING [10] sowie der ZTV-W [11] übernommen. Im ersten Teil dieses Artikels geben wir einen Überblick über die Gliederung und wesentliche neue Inhalte wie die Ausweitung der Instandsetzungsprinzipien.

Im Sommer 2016 soll die neue Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton e.V. „Instandhaltung von Betonbauteilen“ als Gelbdruck erscheinen und der Fachöffentlichkeit im Rahmen eines Einspruchverfahrens Gelegenheit gegeben werden, Stellungnahmen abzugeben. Die neue Instandhaltungs-Richtlinie regelt die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Instandhaltung von Betonbauteilen. Sie erweitert die Aufgaben und erforderliche Qualifikation des Sachkundigen Planers, der im Rahmen der Planung und Umsetzung einer Instandhaltungsmaßnahme nach der Richtlinie einzuschalten ist.

Der Entwurf der neuen Richtlinie beinhaltet fünf Teile:

Teil 1: Planung der Instandhaltung,
Teil 2: Merkmale von Produkten oder Systemen für die Instandsetzung und Regelungen für deren Verwendung zur Sicherstellung der Erfüllung der Grundanforderungen an Bauwerke oder Bauteile,
Teil 3: Ausführung und Überwachung,
Teil 4: Prüfverfahren,

Die derzeitige Gliederung des ersten Teils der neuen Richtlinie umfasst folgende Punkte:

1. Anwendungsbereich der Richtlinie
2. Normative Verweisungen
3. Begriffe, Symbole und Abkürzungen
3.1. Begriffe
3.2. Symbole und Abkürzungen
4. Instandhaltung
4.1. Sachkundiger Planer
4.2. Planung der Instandhaltung
4.2.1. Allgemeiner Planungsablauf
4.2.2. Ermittlung und Beurteilung des Bauwerks- oder Bauteilzustandes
4.2.3. Erstellung eines Instandhaltungsplanes
5. Instandsetzung
5.1. Allgemeines
5.2. Planung von Instandsetzungsmaßnahmen
5.3. Prinzipien und Verfahren zum Erreichen der Instandsetzungsziele
5.3.1. Allgemeines
5.3.2. Prinzipien und Verfahren bei Schäden im Beton
5.3.3. Prinzipien und Verfahren bei Bewehrungskorrosion
5.4. Sicherstellung der Beständigkeit des Instandsetzungssystems und der Dauerhaftigkeit des Verbundes
5.4.1. Sicherstellung der Beständigkeit des Instandsetzungssystems
5.4.2 Sicherstellung der Dauerhaftigkeit des Verbundes
5.4.3 Ergänzende systemspezifische Anforderungen zur Sicherstellung eines ausreichenden Widerstandes und des Verbundes des Instandsetzungssystems
5.5. Festlegung für die Ausführung

Anhang A: Produkte und Systeme für die flächige Instandsetzung mit Mörtel oder Beton (normativ)
Anhang B: Produkte und Systeme für das Schließen, Abdichten und Verbinden von Rissen (normativ)
Anhang C: Produkte und Systeme für den Oberflächenschutz (normativ)
Anhang D: Schutz von Betonbauteilen für Befahrene Verkehrsflächen (Neubauten) vor Chlorideinwirkung (normativ)
Anhang E: Instandhaltungskonzept, Instandhaltungsplan, Instandsetzungskonzept und Instandsetzungsplan (informativ)

Teil 5: Nachweisverfahren zur Ermittlung der Restnutzungsdauer und der Bemessung von Schichtdicken für Betonersatz bei Karbonatisierung und Chlorideinwirkung.

11.4.2. Richtlinie wurde um die Instandhaltung erweitert

Grundsätzlich neu ist im Anwendungsbereich der Richtlinie (Abschnitt 1) die Erweiterung auf die Instandhaltung von Betonbauteilen. Da die zu planende (bemessende) Restnutzungsdauer einen wesentlichen Einfluss auf die Wahl eines geeigneten Instandhaltungskonzepts haben kann, ist diese in jedem Instandhaltungsplan anzugeben. So können beispielsweise bei einer kurzen, geplanten Restnutzungsdauer lediglich regelmäßige Inspektionen und

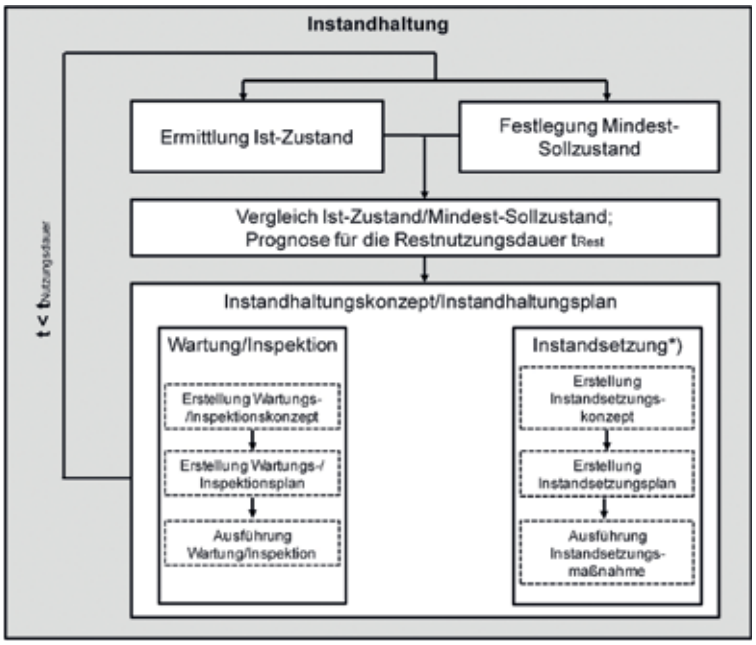


Abbildung 2: Grundsätzliche Vorgehensweise bei der Planung und Ausführung von Instandhaltungsmaßnahmen

Wartungen notwendig sein (Abbildung 1), wohingegen eine höhere Restnutzungsdauer zu aufwendigen Instandsetzungsmaßnahmen mit integrierten Wartungs- und Inspektionszyklen führen kann (Abbildung 2). Ergänzend zur Instandsetzung werden daher die Aspekte Wartung, Inspektion und Verbesserung in Anlehnung an DIN 31051 [2] einbezogen, die wesentlicher Bestandteil für den Erfolg der Maßnahmen über die geplante Nutzungsdauer sind. Dementsprechend wird die neue Richtlinie auch den Titel „Instandhaltungs-Richtlinie“ erhalten. Sie regelt dann die Instandhaltung für Bauwerke und Bauteile aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton nach den Normen DIN EN 1992-1-1 [4], DIN EN 206 [5], DIN EN 13670 [6] sowie nach Normenreihe DIN 1045 [7] und deren Vorläufern.

11.4.3. Zunächst gilt jede Instandhaltung als standsicherheitsrelevant

Die Richtlinie setzt voraus, dass jede Instandhaltung standsicherheitsrelevant ist – es sei denn ein Sachkundiger Planer legt mit schriftlicher Begründung dar, dass die Standsicherheit des Bauteils oder Bauwerks innerhalb der geplanten Nutzungsdauer nicht beeinträchtigt wird. Da die neue Richtlinie die Verantwortung und Aufgabengebiete des Sachkundigen Planers erweitert, muss er genauer spezifische Kenntnisse nachweisen. Um die Inhalte für die Ausbildung zum Sachkundigen Planer zu vereinheitlichen, wird beim Deutschen Institut für Prüfung und Überwachung e. V. (DPÜ) ein Ausbildungsbeirat eingerichtet.

Das Kernstück des Teils 1 ist die Planung der Instandhaltung für ein Betonbauwerk oder -bauteil durch den Sachkundigen Planer. Durch eine sachkundige Planung der Instandhaltung wird sichergestellt, dass der vorhandene Abnutzungsvorrat zu jedem Zeitpunkt während der geplanten Nutzungsdauer größer oder gleich der Abnutzungsgrenze ist. Unter dem der DIN 31051 [1] entnommenen Begriff „Abnutzungsvorrat“ wird dabei der Abstand zwischen Ist-Zustand und Mindest-Sollzustand (Abnutzungsgrenze) verstanden, den ein Bauteil hinsichtlich Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit aufgrund der Herstellung, Wartung, Instandsetzung oder Verbesserung aufweist. Eine sachkundige Planung beinhaltet mindestens folgende Elemente:

- Ermittlung, Darstellung und Beurteilung des Ist-Zustands des Bauwerks beziehungsweise Bauteils, zum Beispiel Übereinstimmung mit Bestandsplänen, Vorgeschichte, Schädigungsgrad, Schädigungsausmaß, dauerhaftigkeitsrelevante Einwirkungen/statische Beanspruchung, Schadensursache, Prognose der weiteren Ist-Zustandsentwicklung,
- Festlegung zum Mindest-Sollzustand: Der Mindest-Sollzustand ergibt sich aus den Anforderungen an Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit, Verkehrssicherheit und Brandschutz in Abstimmung mit dem Auftraggeber und darf während der Restnutzungsdauer nicht unterschritten werden.
- Vergleich von Ist- und Mindest-Sollzustand sowie Prognose der Restnutzungsdauer,

Abbildung 3:
Bei diesem Oberflächenschutzsystem wurde auf eine Wartung verzichtet - mit entsprechend negativem Resultat.

- Erstellung eines Instandhaltungskonzepts mit gegebenenfalls mehreren Varianten unter Berücksichtigung der Aspekte Wartung/Inspektion und Instandsetzung (inklusive Verbesserung) mit dem Ziel, technisch und wirtschaftlich begründete Lösungen anzubieten,
- Erstellung eines Instandhaltungsplans: Ein Instandhaltungsplan impliziert einen Wartungs- und Inspektionsplan, nach Erfordernis auch einen Instandsetzungsplan.

Auf Basis des ermittelten Ist-Zustands sowie der anstehenden und voraussehbaren dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkungen (Expositionen) und statischen Belastungen ist die weitere Zustandsentwicklung des Bauwerks oder Bauteils abzuschätzen. Unter Berücksichtigung des Ist-Zustands ist gemeinsam mit dem Auftraggeber der Sollzustand des Betonbauwerkes/Betonbauteils festzulegen.
Der Sollzustand (erforderlicher Abnutzungsvorrat) stellt dabei die Summe der verlangten Eigenschaften eines Bauwerks oder Bauteils zu einem bestimmten Zeitpunkt dar, zum Beispiel nach Abschluss einer Instandsetzungsmaßnahme. Der Sollzustand ist integraler Bestandteil des Instandhaltungsplans, der auf Grundlage der vorgesehenen Nutzungsdauer des Bauwerks und der angestrebten Nutzungsdauer der ausgeführten Instandsetzungsmaßnahmen erarbeitet wird. Diese Nutzungsdauern sind nach Abstimmung mit dem Auftraggeber im Instandhaltungsplan zu dokumentieren.

11.4.4. Die Nutzungsdauer konkret planen

Bei der Erstellung des Instandhaltungsplans sind die Aspekte Wartung, Inspektion und – soweit erforderlich – Instandsetzung (gegebenenfalls inklusive Verbesserung) zu adressieren. Im Instandhaltungsplan sind Intervalle und Umfang der Wartung und Inspektion sowie die zu überprüfenden Parameter, Eigenschaften und Zustände festzulegen (Abbildung 3).
Die konkrete Planung der Nutzungsdauer wird durch die Instandhaltungsrichtlinie somit stärker in den Fokus gerückt. Die Methoden, um den Ist-Zustand zu ermitteln und zu beurteilen, wurden gegenüber der Richtlinienausgabe 2001 aktualisiert und durch neue Prüfverfahren ergänzt. Um auch im Hinblick auf die Planung von Instandsetzungsmaßnahmen die weitere Zustandsentwicklung eines Betonbauteils zu beurteilen, sind im erforderlichen Maße folgende Aspekte zu erfassen:
- die dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkungen (Expositionen) auf die zu betrachtenden Bauteile,
- die Beschaffenheit des Betons und des Betonuntergrunds als Basis für Instandsetzungsmaßnahmen (Abbildung 4) sowie
- die statischen Beanspruchungen der Bauteile.

Abbildung 4:
Die Beschaffenheit des Betons und des Betonuntergrunds bildet die Basis für die Planung der Instandsetzungsmaßnahmen. Sie ist im Vorfeld der Planung auch mit Untersuchungen an Bohrkernen zu ermitteln.

Um diesen Grundsätzen gerecht zu werden, wurde unter anderem die Expositionsklassensystematik aus DIN EN 1992-1-1 [4] und DIN 1045-2 [9] übernommen und instandsetzungsspezifisch erweitert. Dabei wurden sowohl die für eine Instandsetzungsmaßnahme relevanten äußeren Einwirkungen aus der Umgebung als auch die Einwirkungen aus dem Untergrund spezifiziert und systematisch über Klassen berücksichtigt (Tabelle 1).

11.4.5. Altbetonklassen werden geregelt

Seit geraumer Zeit kam aus der Praxis der Wunsch, in die neue Richtlinie auch die Planung von Instandsetzungsmaßnahmen für geringerfeste Betonuntergründe aufzunehmen, da dieser Anwendungsfall häufiger vorkommt (Abbildung 5). Durch die Einführung der bereits in ZTV-W LB 219 [4] geregelten Altbetonklassen steht ein Werkzeug zur Verfügung, um Betonersatz auf den Untergrund abzustimmen und Betonersatz-Produkte zu klassifizieren. Hierdurch sollen zukünftig Schäden durch ungeeignete Materialkombinationen vermieden werden, zum Beispiel durch zu stark differierende Elastizitätsmodule.

Wesentlicher Bestandteil der Instandhaltung ist die Instandsetzung. Das Ziel von Instandsetzungsmaßnahmen ist es, Betonbauwerke oder -teile in einen standsicheren und gebrauchstauglichen Zustand für die im Rahmen des Instandhaltungsplans vorgesehenen Nutzungszeitraum zu versetzen. Notwendige Voraussetzungen hierfür sind:

- der dauerhafte Ersatz von zerstörtem oder abgetragenem Beton durch Beton oder Mörtel,
- die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit von Betonbauteilen gegen das Eindringen von betonangreifenden oder korrosionsfördernden Stoffen oder gegen mechanische Einwirkungen auf oberflächennahe Bereiche,
- die Sicherstellung des Schutzes der Bewehrung vor Korrosion.

Zu den Instandsetzungsmaßnahmen zählt auch das Füllen von Rissen und Hohlräumen zur Erhaltung oder Wiederherstellung von Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Wichtig ist, dass bereits im Rahmen der Planungsaufgabe geeignete Überwachungs- und Prüfumfänge während und nach Abschluss der Ausführung festgelegt werden, um zu überprüfen, ob das Instandsetzungsziel durch die umgesetzte Instandsetzungsmaßnahme erreicht wurde.

11.4.6. Drei Grundsätze bei der Ausführung berücksichtigen

Bei Planung, Produkt- und Systemauswahl sowie Ausführung von Instandsetzungsmaßnahmen sind die folgenden Grundsätze zu berücksichtigen:

- der Korrosionsschutz von Beton und Bewehrung,
- die Sicherstellung der Beständigkeit des Instandsetzungssystems,
- die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit des Verbunds von Instandsetzungssystem und Untergrund über Adhäsion und/oder Verankerung.

Der Verbund zwischen Instandsetzungssystem und Untergrund muss durch Adhäsion, Schubverbund oder Verankerung beziehungsweise Kombinationen der Einzelmechanis-

men hergestellt werden. Dieses Konzept wurde aus der ZTV-W LB 219 [11] übernommen. Bei Sicherstellung des Verbunds zwischen Instandsetzungssystem und Untergrund durch Adhäsion werden für Mörtel und Betone sowie Oberflächenschutzsysteme Mindestanforderungen an die Oberflächenzugfestigkeiten des Betonuntergrunds festgelegt. Zusätzlich zu Anforderungen an die Oberflächenzugfestigkeit sind für die Applikation der Instandsetzungsprodukte und -systeme konkrete Anforderungen an die Mindestrautiefe des Betonuntergrunds und die oberflächennahe Bauteilfeuchte einzuhalten.

Abbildung 5 (links): In die neue Richtlinie wurden für die Planung von Instandstzungsmaßnahmen auch geringerfeste Betonuntergründe aufgenommen, da dieser Anwendungsfall häufiger vorkommt. Sie werden in Altbetonklassen eingeteilt, um geeignete Instandsetzungsprodukte darauf abstimmen zu können.

Abbildung 6 (rechts): Die "Reprofilierung oder Querschnittsergänzung" eines Betonbauteils mit Betonersatz wird in der INstandhaltungsrichtlinie als Prinzip 3 geregelt.

11.4.7. Neun Instandsetzungsprinzipien werden beschrieben

In Teil 1 werden auch die Instandsetzungsprinzipien und Verfahren in Anlehnung an DIN EN 1504-9 [8] beschrieben (Tabelle 1). Dabei werden nur Prinzipien und Verfahren aus DIN EN 1504-9 berücksichtigt, mit denen in Deutschland ausreichende praktische Erfahrungen vorliegen. Die in der neuen Richtlinie geregelten Prinzipien und Verfahren für die Instandsetzung von Schäden durch Betonkorrosion (Prinzipien 1 bis 6) und Bewehrungskorrosion (Prinzipien 7, 8 und 10) sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Nummerierung aus DIN EN 1504-9 [8] wurde zur besseren Übertragbarkeit beibehalten.

Prinzip 1 „Schutz gegen das Eindringen von Stoffen“
Verhinderung des Eindringens von betonangreifenden, korrosionsfördernden Stoffen, zum Beispiel weiches Wasser, sonstige Flüssigkeiten, Dampf, Gas, Chemikalien, oder des Angriffs durch Mikroorganismen: Das Prinzip ist zum Schutz von ungerissenem und gerissenem Beton anwendbar. Im Bereich von Trennrissen ist es auch anwendbar, um das Eindringen von Stoffen, insbesondere Flüssigkeiten, durch Risse und Hohlräume in Bauteilen aus Beton zu verhindern.

Prinzip 2 „Regulierung des Wasserhaushaltes des Betons“
Einstellen und Aufrechterhalten des Feuchtezustands des Betons innerhalb eines unkritischen Bereichs: Dazu ist es in der Regel erforderlich, das Eindringen des Wassers in den ungerissenen oder gerissenen Beton zu reduzieren oder zu verhindern und gleichzeitig den Austrag von Wasser aus dem Beton über die Dampfphase zu ermöglichen. Die Geschwindigkeit von feuchteabhängigen Schädigungsprozessen im Beton soll dadurch auf ein unschädliches Maß reduziert werden.

Prinzip 3 „Reprofilierung oder Querschnittsergänzung“
Geregelt wird die Wiederherstellung eines Betonbauteils hinsichtlich seiner vorgesehenen geometrischen Form und Funktion mit Betonersatz.

Prinzip 4 „Verstärkung des Betontragwerks“
Die hier aufgeführten Maßnahmen dienen zur Erhöhung der Tragfähigkeit eines Betontragwerks gegenüber dem Soll- oder Ist-Zustand oder der Erhöhung der Bauteilsteifigkeit gegenüber dem Ist-Zustand.

Prinzip 5 „Erhöhung des Widerstands gegen physikalischen Angriff“
Geregelt wird das Erhöhen des Widerstandes gegen physikalischen oder mechanischen Angriff durch Beschichtungen oder Betonersatz.

Prinzip 6 „Erhöhung des Widerstands gegen chemischen Angriff“
Durch Beschichtungen, Betonersatz oder dauerhafte Bekleidungen wird der Widerstand gegen chemischen Angriff erhöht.

Prinzip 7 „Erhalt oder Wiederherstellung der Passivität“
Schaffung von chemischen Bedingungen, bei denen die Oberfläche der Bewehrung ihren passiven Zustand beibehält oder wieder in einen passiven Zustand versetzt wird: Die Korrosion der Bewehrung kommt dadurch praktisch zum Stillstand und der vorhandene Abrostungszustand bleibt unverändert bestehen.

Prinzip 8 „Erhöhung des Elektrolytwiderstandes“
Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit des Betons zur Reduzierung des elektrolytischen Teilprozesses: Dazu muss der Wassergehalt des Betons begrenzt werden. Die Korrosionsgeschwindigkeit sinkt bei ausreichender Erhöhung des elektrolytischen Widerstands des Betons auf ein unschädliches Maß.

Prinzip 10 „Kathodischer Schutz“
Durch die Absenkung des Potenzials an der Bewehrung über ein Anodensystem wird die Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung auf ein unschädliches Maß reduziert. Für die Regelungen zum KKS wurden die Empfehlungen des DAfStb [12] in die Richtlinie übertragen. Bei kathodischen Korrosionsschutzmaßnahmen (KKS) sollen demnach zukünftig Titananodensysteme nach DIN EN ISO 12 696 [13] ohne weitere Nachweise verwendet werden können, sofern diese die Anforderungen nach NACE TM 0294 [14] erfüllen. Für den Einbettungsmörtel kann grundsätzlich Betonersatz nach Teil 2 der Instandhaltungs-Richtlinie verwendet werden, sofern dessen spezifischer elektrolytischer Widerstand bekannt und das Verhalten im Gesamtsystem nachgewiesen ist.

11.4.8. Planungsrelevante Angaben ausgearbeitet

Im zuständigen DAfStb-Arbeitskreis „Planung“ wurden die planungsrelevanten Angaben zu den Prinzipien/Verfahren nach folgender Systematik ausgearbeitet:

- Kurzbeschreibung des Verfahrens,
- Anforderungen an die Stoffe (Verweis auf Teil 2 der Richtlinie),
- Anforderungen an den Untergrund,
- weitere Anforderungen aus der Sicht des Sachkundigen Planers, zum Beispiel Größtkorn.

Jedes Verfahren wird zunächst für sich betrachtet vollständig mit den aufgeführten

Fünf Arbeitskreise des Technischen Ausschusses „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ haben die verschiedenen Richtlinienteile erarbeitet:
Arbeitskreis „RL-SIB Planung“ (Obmann: Raupach)
Arbeitskreis „RL-SIB Mörtel“ (Obmann: Kühne)
Arbeitskreis „RL-SIB Oberflächenschutzsysteme“ (Obmann: Wolff)
Arbeitskreis „RL-SIB Rissfüllstoffe“ (Obfrau: Eßer)
Arbeitskreis „RL-SIB Ausführung“ (Obmann: Bastert)
Arbeitskreis „RL-SIB KKS“ (Obmann: Raupach)

Punkten ausgearbeitet. Informationen, die in allgemeiner Form für mehrere Verfahren gelten, wurden vor die Klammer gezogen.

Tabelle 2:
In der Instandhaltungs-Richtlinie geregelte Prinzipien und Verfahren zur Instandsetzung von Betonbauteilen (Entwurf)

Prinzipien	Verfahren	
1. Schutz gegen das Eindringen von Stoffen	1.1	Hydrophobierung
	1.3	Beschichtung
	1.4	Örtliche Abdeckung von Rissen (Bandagen)
	1.5	Füllen von Rissen oder Hohlräumen
2. Regulierung des Wasserhaushaltes des Betons	2.1	Hydrophobierung
	2.3	Beschichtung
	2.6	Füllen von Rissen oder Hohlräumen[a]
3. Reprofilierung oder Querschnittsergänzung	3.1	Kleinflächiger Handauftrag
	3.2	Betonieren oder Vergießen
	3.3	Spritzauftrag
	3.4	Auswechseln von Bauteilen
4. Verstärkung des Betontragwerks[b]	4.3	Verstärkung durch geklebte Bewehrung
	4.4	Querschnittsergänzung durch Mörtel oder Beton
	4.5	Füllen von Rissen[c] oder Hohlräumen
	4.6	Druckloses Füllen durch Vergießen von vorbereiteten Rissen oder Hohlräumen
5. Erhöhung des physikalischen Widerstandes	5.1	Beschichtung
	5.3	Mörtel- oder Betonauftrag
6. Erhöhung des Chemikalienwiderstandes	6.1	Beschichtung
	6.3	Mörtel- oder Betonauftrag
7. Erhalt oder Wiederherstellung der Passivität	7.1	Erhöhung der Betondeckung mit zusätzlichem Mörtel oder Beton
	7.2	Ersatz von schadstoffhaltigem oder karbonatisiertem Beton
	7.4	Realkalisierung von karbonatisiertem Beton durch Diffusion
	7.6	Füllen von Rissen oder Hohlräumen
	7.7	Beschichtung[a]
	7.8	Örtliche Abdeckung von Rissen (Bandagen)[a]
8. Erhöhung des elektrolytischen Widerstandes	8.1	Hydrophobierung
	8.3	Beschichtung
10. Kathodischer Schutz	10.1	Anlegen eines elektrischen Potenzials

[a] Verfahren gegenüber DIN EN 1504-9 neu eingeführt
[b] auch zur Erhöhung der Tragfähigkeit gegenüber dem Ist-Zustand
[c] in der Regel zur Erhöhung der Bauteilsteifigkeit

Tabelle 1:
Einwirkungen aus der Umgebung und dem Betonuntergrund (Entwurf)

Klassenbezeichnung		Beschreibung der Umgebung	Beispiele (informativ)
1 Einwirkungen aus der Umgebung			
Expositionsklassen nach DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2	X0	Für Beton ohne Bewehrung oder eingebettetes Metall: alle Umgebungsbedingungen, ausgenommen Frostangriff, Verschleiß oder chemischer Angriff	s. DIN EN 206 in Verbindung mit DIN 1045-2
	XC1...XC4	Bewehrungskorrosion infolge Karbonatisierung	
	XD1...XD3	Bewehrungskorrosion infolge Chlorid (außer Meerwasser)	
	XS1...XS3	Bewehrungskorrosion infolge Chlorid aus Meerwasser	
	XF1...XF4	Frostangriff ohne und mit Taumittel bzw. Meerwasser	
	XA1...XA3	Betonkorrosion durch chemischen Angriff	
	XM1...XM3	Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung	
	W0...WA	Feuchtigkeitsklassen	
2 Einwirkungen aus dem Betonuntergrund			
XSTAT		Statisch mitwirkend	Reprofilierung von druckbeanspruchten Bauteilen; kraftschlüssiges Füllen von Rissen und Hohlräumen
XBW1		Rückseitige Durchfeuchtung (keine Durchströmung) oder erhöhte Restfeuchtigkeit	Bauteile mit Beanspruchung durch drückendes Wasser; junger Beton
XBW2		Rückseitige Durchfeuchtung mit Durchströmung (flächig)	Bauteile mit Beanspruchung durch drückendes Wasser; Stampfbeton mit hoher Kapillarporosität
XCR		Risse	
	w	mit Rissbreite w [a] in mm	
	Δw LFR HFR CON	mit Rissbreitenänderung Δw in mm – zyklisch niedrigfrequent z. B. aus Temperatur, Wasserstandsänderung – zyklisch hochfrequent z. B. aus Verkehr – kontinuierliche Rissbreitenänderung, z. B. aus Schwinden, Setzungen	WU-Bauteil; Brücke; Bodenplatte; Rissbildung durch Stützensenkung
	DY (dry)	mit Feuchtezustand „trocken“: – Wasserzutritt nicht möglich. – Beeinflussung des Riss-/Hohlraumbereiches durch Wasser nicht feststellbar bzw. seit ausreichend langer Zeit ausschließbar	Innenbauteil
	DP (damp)	mit Feuchtezustand „feucht“: – Farbtonveränderung im Riss- oder Hohlraumbereich durch Wasser, jedoch kein Wasseraustritt. – Anzeichen auf Wasseraustritt in der unmittelbar zurückliegenden Zeit (z. B. Aussinterungen, Kalkfahnen). – Riss oder Hohlraum erkennbar feucht oder matt-feucht (beurteilt an Trockenbohrkernen).	frei bewitterte Bauteile; erdberührte Bauteile
	WT (wet)	mit Feuchtezustand „nass (drucklos gefüllt)“: – Wasser in feinen Tröpfchen im Rissbereich erkennbar. – Wasser perlt aus dem Riss.	
	WF (waterflow)	mit Feuchtezustand „fließendes Wasser (druckwasserführend)“: – Zusammenhängender Wasserstrom tritt aus dem Riss aus.	WU-Bauteil
XDYN		Dynamische Beanspruchung bei Applikation	Brücke unter Verkehr; gegebenenfalls Parkdeck

[a] aufgenommen und ausgewertet nach DBV-Merkblatt „Begrenzung der Rissbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau“

Literatur

[1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen. Oktober 2001

[2] DIN 31051:2012-09 Grundlagen der Instandhaltung.

[3] http://dafstb.de/akt_Positionspapier_korrosionsausloesender_Chloridgehalt.html

[4] DIN EN 1992-1-1 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1/NA, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

[5] DIN EN 206-1:2001-07 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

[6] DIN EN 13670:2011-03 Ausführung von Tragwerken aus Beton

[7] DIN 1045 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton

[8] DIN EN 1504-9:2008-11 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität – Teil 9: Allgemeine Grundsätze für die Anwendung von Produkten und Systemen

[9] DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1

[10] Bundesanstalt für Straßenwesen (bast): ZTV-ING Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), 2004

[11] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Eisenbahnen, Wasserstraßen: ZTV-W LB 219 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219), 2004

[12] Empfehlung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) zu den erforderlichen Nachweisen der Bauprodukte für den kathodischen Korrosionsschutz (KKS) im Betonbau, 2009-06 (www.dafstb.de unter Aktuelles)

[13] DIN EN ISO 12696:2012-05 Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton (ISO 12696:2012)

[14] NACE TM 0294 Testing of Embeddable Impressed Current Anodes for Use in Cathodic Protection of Atmospherically Exposed Steel-Reinforced Concrete

B+B BAUEN IM BESTAND: BETONINSTANDSETZUNG
In: 3-2016, Mai 2016, S. 51 - 55

Die neue Instandhaltungs-Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Teil 2

11.5. Das Bauwerk stellt die Anforderungen

Michael Raupach, Heinrich Bastert, Angelika Eßer, Christoph Gehlen, Wilhelm Hintzen, Inga Hohberg, Hans-Carsten Kühne, Kenji Reichling, Andreas Westendarp, Udo Wiens und Lars Wolff

Abbildung 1:
Die Systematik für Oberflächenschutzsysteme wird in der neuen Instandhaltungs-Richtlinie übernommen.

In einer Artikelserie stellen wir die neue Instandhaltungs-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) vor. Im zweiten Teil geht es um Betonersatz- und Oberflächenschutzsysteme sowie Rissfüllstoffe. Die Anforderungen für diese Bauprodukte werden zukünftig als Folge des EuGH-Urteils vom Oktober 2014 nicht mehr auf der Ebene der Produkte mit allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnissen geregelt, sondern durch Anforderungen auf der Ebene der individuellen Bauwerke. Außerdem wird das Kapitel „Ausführung“ vorgestellt. Neu ist hier die Einführung von Überwachungsklassen, die sich je nach Anforderungen des Bauwerks unterscheiden.

Teil 2 gliedert sich aktuell wie folgt:

1. Anwendungsbereich
2. Eignung von Produkten und Systemen für die Instandsetzung
2.1. Allgemeines
2.2. Herstellung, Lagerung und Transport bis zur Übergabe
Anhang A (normativ) Oberflächenschutzsysteme für Beton – Erforderliche Leistung und Verwendung
A.1. Allgemeines
A.2. Schichtdicken
A.3. Wesentliche Merkmale
Anhang B (normativ) Verwendungsregeln und Merkmale von Betonersatzsystemen
B.1. Allgemeines
B.2. Verwendungsregeln und Merkmale von Produkten und Systemen
B.3. Angaben zur Ausführung von Instandsetzungsmaßnahmen mit Betonersatz
Anhang C Anforderungen und Verwendungsregeln für Rissfüllstoffe
C.1. Allgemeines
C.2. Rissfüllstoffe zum kraftschlüssigen Füllen (F)
C.3. Rissfüllstoffe zum dehnbaren Füllen (D)
C.4. Rissfüllstoffe zum Schließen und Abdichten

Teil 2 der Instandhaltungs-Richtlinie des DAfStb wurde im Wesentlichen von den Arbeitskreisen „Mörtel“, „Oberflächenschutzsysteme“ und „Rissfüllstoffe“ erarbeitet. Die Hauptziele bestanden darin, die Richtlinie an den Stand der Technik anzupassen und die Produkte nach DIN EN 1504 zu integrieren.

Abbildung 2:
Auch für Rissfüllstoffe wird es zukünftig kein Ü-Zeichen mehr geben. Die Anforderungen werden bauwerksbezogen definiert.

In Teil 2 der Instandsetzungs-Richtlinie von 2001 werden Bauprodukte und -systeme für die Instandsetzung, deren geforderte Eigenschaften sowie Prüfverfahren beschrieben, mit denen diese nachzuweisen sind. Als Verwendbarkeitsnachweise für diese Bauprodukte und -systeme wurden bis Mitte der 2000er-Jahre ausschließlich allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnisse (abP) erteilt. Geändert hat sich diese Situation mit der amtlichen Bekanntmachung der europäisch harmonisierten Produktnormen der Reihe EN 1504 in den Jahren 2005 und 2006. Diese galt es national umzusetzen. Um aber Defizite in den Teilen 2, 3, 5 und 7 der EN 1504 [1, 2, 3, 4] zu beheben, hat man Anpassungsregelungen erarbeitet, um die Produkte und Systeme im standsicherheitsrelevanten Bereich verwenden zu können.

Oberflächenschutzsysteme, bestehend aus Produkten nach DIN EN 1504-2 (Oberflächenschutzprodukte), wurden durch die nationale „Restnorm“ DIN V 18026 [5] geregelt. Für die Systembezeichnung wird die OS-Systematik der Instandsetzungsrichtlinie weiter verwendet (Abbildung 1).

Für Rissfüllstoffe nach DIN EN 1504-5 [3] wurde der Nachweis der Resteigenschaften „dehnungsabhängige Dichtheit unter dynamischer Beanspruchung“, „Erhärten unter dynamischer Beanspruchung“ und „Korrosionsverhalten“ in der nationalen Restnorm DIN V 18028 [6] geregelt. Es ist nicht gelungen, eine Anwendungsnorm oder Restnorm zu EN 1504-3 [2] (Betonersatz) und EN 1504-7 [4] (Korrosionsschutz der Bewehrung) zu erarbeiten. Daher bedurften Instandsetzungsmörtel und -betone nach EN 1504-3 einer Verwendungszulassung oder konnten die „alten“ abP weiter nutzen. Alle Restregelungen führten durch Anbindung an das deutsche System des Übereinstimmungsnachweises zu einem Ü-Zeichen, das derzeit noch zusätzlich zur CE-Kennzeichnung aufzubringen ist.

11.5.2. Ü-Zeichen ist nicht europarechtskonform

Das hat sich seit dem EuGH-Urteil vom Oktober 2014 in der Rechtssache C-100/13 „Freier Warenverkehr — Regelung eines Mitgliedstaats, nach der bestimmte Bauprodukte, die mit der Konformitätskennzeichnung „CE“ versehen sind, zusätzlichen nationalen Normen entsprechen müssen“ geändert: Ein zusätzliches bauaufsichtliches Übereinstimmungszeichen, wie in den Bauregellisten verankert, ist für europäisch harmonisierte Bauprodukte nicht europarechtskonform [7]. Die bisher in den nationalen Restregelungen zusätzlich geforderten nationalen Übereinstimmungsnachweise zu Bauprodukten nach europäisch harmonisierten Produktnormen sind daher in der neuen Instandhaltungs-Richtlinie weggefallen (Abbildung 2).

Abbilung 3:
Verstärkungen gehören zu den anspruchsvollsten Instandsetzungsmaßnahmen und sind daher der höchsten der neuen Überwachungsklassen zugeordnet (ÜK-I 3).

Als Reaktion auf das EuGH-Urteil und auf Druck der Kommissionsdienste wird derzeit der gesamte deutsche bauordnungsrechtliche Rahmen wie Musterbauordnung, Musterlisten der Technischen Baubestimmungen und Bauregellisten überarbeitet. Die Verordnung (EU) Nr. 305/2011, Bauproduktenverordnung (BauPVO) definiert sieben Grundanforderungen für Bauwerke. Die Mitgliedsstaaten sind gehalten und haben das Recht, die für die Sicherstellung der Anforderungen an Bauwerke erforderlichen wesentlichen Merkmale und Leistungen festzulegen, die erfüllt werden müssen. Dieser Perspektivwechsel von Anforderungen an das Bauprodukt hin zu Bauwerksanforderungen wird mit der neuen Musterbauordnung (MBO) umgesetzt werden.

11.5.3. Wesentliche Merkmale werden bauwerksbezogen festgelegt

In der neuen Instandhaltungs-Richtlinie wurde dieser Perspektivwechsel bereits berücksichtigt. Es werden Expositionen und resultierende Anforderungen aufgrund individueller Umgebungsbedingungen des Bauwerkes definiert. Ihre Erfüllung ist im jeweiligen Einzelfall durch eine Reihe notwendiger Merkmale des Bauprodukts sicherzustellen. Somit entsteht auch kein Widerspruch zu den wesentlichen Merkmalen der harmonisierten Produktnormen, zum Beispiel aus DIN EN 1504-3.

Die Instandhaltungs-Richtlinie wird somit als eines der ersten technischen Regelwerke den erzwungenen Paradigmenwechsel umsetzen. Denn sie definiert anhand der bauwerksbezogenen Anforderungen notwendige Produktmerkmale in Abhängigkeit von Expositionsklassen. Den über die Anforderungen der Bauproduktenverordnung hinaus geforderten Nachweiszwang der Leistungsbeständigkeit von mindestens einem Merkmal gibt es nicht mehr.

Der Lückenschluss zum Nachweis der Merkmale kann demnach ebenfalls nur projektbezogen erfolgen. Es wird hierdurch offensichtlich, dass der Leistungsnachweis in die Ausführungsphase verschoben wird. Wie dies im Hinblick auf Kosten und Termine zu bewerten ist, kann derzeit nicht abgeschätzt werden. Enthalten die hEN nicht alle wesentlichen Leistungsmerkmale zur Sicherstellung der Anforderungen an Bauwerke – wie dies zum Beispiel bei DIN EN 1504-3 der Fall ist –, könnten Hersteller auf freiwilliger Basis die fehlenden wesentlichen Merkmale über eine Europäische Technische Bewertung (Leistungserklärung) nachweisen. Es wären auch andere Nachweisformate denkbar.

Wie die bisherige Richtlinie umfasst der Teil 2 die Produktgruppen Oberflächenschutzsysteme (Anhang A), Rissfüllstoffe (Anhang B), Betonersatz (Anhang BC) und Rissfüllstoffe (Anhang C). Die Angaben zur Ausführung werden dahingehend überarbeitet, dass die zur Planung und Ausführung einer Instandsetzungsmaßnahme benötigten Informationen bereitgestellt werden, zum Beispiel das Größtkorn bei Betonersatz. Die Verweise auf die nationalen Restnormen DIN V 18026 [5] und DIN V 18028 [6] sind mit der neuen Richtlinienstruktur obsolet. Die Oberflächenschutzsysteme OS 7, OS 9 und OS 13 ent-

fallen, da es sich bei diesen entweder nicht um ein vollwertiges OS-System handelt (OS 7) oder diese in der Vergangenheit in der Praxis kaum angewendet wurden (OS 9, OS 13) Mit OS 14 kommen Oberflächenschutzsysteme hinzu, die den bereits bekannten OS 10 mit polymerer Deckbeschichtung entsprechen.

11.5.4. Überwachungsklassen wurden neu in Richtlinie eingeführt

Eine wesentliche Neuerung im vom DAfStb-Arbeitskreis „Ausführung“ erarbeiteten Teil 3 ist die Aufnahme von Überwachungsklassen für die Instandsetzung. Festgelegt werden hierfür Anforderungen an die Eignungsnachweise für Personal und Geräte sowie an die Eigen- und Fremdüberwachung (Tabelle 1).

Die Systematik wurde der DIN 1045-3 [8] entlehnt. In die Überwachungsklasse 1 (ÜK-I 1) werden nicht standsicherheitsrelevante Instandsetzungen eingruppiert. ÜK-I 2 umfasst alle standsicherheitsrelevanten Instandsetzungen (ohne Verstärkungsmaßnahmen). ÜK-I 3 enthält mit Verstärkungsmaßnahmen besonders anspruchsvolle Instandsetzungsmaßnahmen (Abbildung 3). Zu den Überwachungsklassen werden Tabellen mit erforderlichen Prüfungen, Anforderungen und Häufigkeiten im Rahmen der Eigenüberwachung durch den Bauausführenden angegeben.

Tabelle 1: Überwachungsklassen für Instandhaltungsmaßnahmen (ÜK-I)

S	1	2	3	4
Z	**Gegenstand**	ÜK-I 1	ÜK-I 2 [1)]	ÜK-I 3 [1)]
1	Anwendungsbereich	Nicht standsicherheits-relevante Instandhaltung	Standsicherheitsrelevante Instandhaltung	Verstärkung
2	Eignungsnachweise	Übliche Nachweise für Personal und Geräte gemäß 4.2 und 4.3		Besondere Nachweise für Personal und Geräte entsprechend den jeweils für die Verstärkungsmaßnahme gültigen Regelwerken
3	Beispiele	Maßnahmen im Zuge der **Wartung** und **Inspektion** **Instandsetzungsmaßnahmen** an Bauteilen der Expositionsklasse **X0** **Nacharbeiten** vor der Abnahme an Betonbauteilen der Überwachungsklasse 1 (ÜK1) nach DIN EN 13 670 und DIN 1045-3, sofern keine Anforderungen an den Brandschutz betroffen sind	**Instandsetzungsmaßnahmen** an Bauteilen aller Expositionsklassen **außer X0**, insbesondere: – Tragfähigkeitsrelevanter Betonersatz bis hinter die Bewehrung (z. B. Spritzbeton, Beton, PCC, SPCC) – Betonersatz bei durch Chlorid geschädigten oder kontaminierten Bauteilen – Beschichtungsmaßnahmen zum Schutz von Bauteilen der Expositionsklasse XD3 **Nacharbeiten** vor der Abnahme an Betonbauteilen der Überwachungsklassen 2 und 3 (ÜK2 und ÜK3) nach DIN EN 13670 und DIN 1045-3 bzw. wenn Anforderungen an den Brandschutz betroffen sind	Maßnahmen zum Verstärken von Bauteilen – mit geklebter Bewehrung gemäß DAfStb-Richtlinie „Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung“

1) Bei Sonderverfahren (z. B. nachträglich eingemörtelte Bewehrung, Textilbeton, Kathodischer Korrosionsschutz (außer Systeme mit Titananoden)) gelten die Anforderungen in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen, bzw. den bauaufsichtlichen Zustimmungen im Einzelfall.

Teil 3 ist wie folgt gegliedert:

1. Anwendungsbereich
2. Normative Verweise
3. Grundsätze
3.1. Instandhaltung
3.2. Instandsetzung
4. Anforderungen an das ausführende Unternehmen
4.1. Allgemeines
4.2. Personal
4.2.1. Allgemeine Anforderungen
4.2.2. Qualifizierte Führungskraft
4.2.3. Bauleiter des Unternehmens
4.2.4. Baustellenfachpersonal
4.3. Geräteausstattung
5. Auswahl, Lieferung und Lagerung von Instandsetzungsprodukten und -systemen
6. Bauausführung
6.1. Plausibilitätskontrolle
6.2. Untergrundvorbereitung
6.2.1. Verfahren und Maßnahmen zur Vorbereitung des Betonuntergrundes
6.2.2. Anforderungen an den Betonuntergrund und Überprüfung des vorbereiteten Untergrundes
6.3. Witterungs- und Umgebungsbedingungen des Betonuntergrundes
6.4. Vorbereitung der Bewehrung
6.4.1. Allgemeines
6.4.2. Entrostung bei Verfahren 7.2 und 8.3 nach Teil 1 dieser Richtlinie
6.5. Behandeln von Rissen und Hohlräumen
6.5.1. Allgemeines
6.5.2. Injizieren in Risse, Hohlräume und Fehlstellen mit Rissfüllstoffen
6.5.3. Druckloses Füllen durch Vergießen von aufgeweiteten Rissen, Rissen definierter Mindestbreite, Hohlräumen oder Fehlstellen mit Rissfüllstoffen
6.5.4 Tränkung
6.6. Betonersatz und Betonergänzung
6.6.1. Allgemeines
6.6.2. Produkt- und systemspezifische Anforderungen für die Ausführung
6.7. Oberflächenschutzsysteme
6.7.1. Allgemeines
6.7.2. Auftragen von Hydrophobierungen
6.7.3. Auftragen von Beschichtungen
6.7.4. Örtliche Abdichtung von Rissen, Arbeitsfugen und Sollbruchstellen (Bandagen) – Verfahren 7.8
6.8. Geklebte Bewehrungsergänzung
6.8.1. Stahlprofile, CFK-Lamellen oder CF-Gelege
6.8.2. Einkleben von Bewehrungsanschlüssen
6.9. Kathodischer Korrosionsschutz
7. Überwachung
7.1. Überwachungsklassen für Instandhaltungsmaßnahmen (ÜK-I)

7.2. Überwachung durch das ausführende Unternehmen (Eigenüberwachung)
7.2.1. Aufzeichnungen während der Ausführung
7.2.2. Art, Umfang und Häufigkeit
7.3. Überwachung durch eine anerkannte Überwachungsstelle (Fremdüberwachung)
7.3.1. Aufnahme der Überwachung
7.3.2. Durchführung der Überwachung
7.3.3. Überwachungsbericht
7.3.4. Kennzeichnung der Baustelle
Anhang A (normativ) – Eigenüberwachung durch das ausführende Unternehmen
Anhang B (normativ) – Prüfungen in der Ausführung
Anhang C (informativ) – Prüfung des Feuchtegehaltes des Betonuntergrundes mit dem CM-Gerät

Die in Teil 3 angegebenen Ausführungshinweise von Instandhaltungsmaßnahmen werden durch die Einführung von Überwachungsklassen mit zugehörigen Anforderungen an die durchzuführenden Prüfungen spezifiziert und damit konkretisiert.

Literatur

[1] DIN EN 1504-2:2005-01, Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 2: Oberflächenschutzsysteme für Beton.

[2] DIN EN 1504-3:2006-03, Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 3: Statisch und nicht statisch relevante Instandsetzung.

[3] DIN EN 1504-5, Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 5: Injektion von Betonbauteilen.

[4] DIN EN 1504-7:2006-11, Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 7: Korrosionsschutz der Bewehrung.

[5] DIN V 18026:2006-06, Oberflächenschutzsysteme für Beton aus Produkten nach DIN EN 1504 2:2005-01.

[6] DIN V 18028:2006-06, Rissfüllstoffe nach DIN EN 1504-5:2005-03 mit besonderen Eigenschaften.

[7] http://dafstb.de/akt_DAfStb-Fachkolloquium_EuGH-Urteil.html (abgerufen am 29.10.2015).

[8] DIN 1045-3:2012-03, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung - Anwendungsregeln zu DIN EN 13670.

B+B BAUEN IM BESTAND: BETONINSTANDSETZUNG
In: 4-2016, Juni 2016, S. 42 - 45

Die neue Instandhaltungs-Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Teil 3

11.6. Nichts hält ewig

Michael Raupach, Heinrich Bastert, Angelika Eßer, Christoph Gehlen, Wilhelm Hintzen, Inga Hohberg, Hans-Carsten Kühne, Kenji Reichling, Andreas Westendarp, Udo Wiens und Lars Wolff

In einer Artikelserie stellen wir die neue Instandhaltungs-Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) vor. Im dritten und letzten Teil geht es um Bemessungswerkzeuge, mit deren Hilfe die Restnutzungsdauer und die notwendigen Schichtdicken für entsprechende Instandsetzungsmaßnahmen bestimmt werden können. Außerdem wird das ergänzende DBV-Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ vorgestellt. Es enthält eine Gesamtsystematik, die auf drei Prinzipien und drei auf diese bezogene Ausführungsvarianten für die Dauerhaftigkeit von befahrenen Verkehrsflächen beruht. Eine klärende Stellungnahme zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt rundet Teil 3 dieses Artikels ab.

Abbildung 1:
Ein wesentliches Kriterium für die Planung ist die Restnutzungsdauer. Teil 5 der neuen Instandhaltungs-Richtlinie enthält für deren Bestimmung bei karbonatisierungs- und chloridinduzierter Korrosion Bemessungswerkzeuge, mit deren Hilfe auch die für die geplante Restnutzungsdauer erforderlichen Schichtdicken bestimmt werden können.

Um eine Instandhaltung zielführend zu planen, ist die vorgesehene Restnutzungsdauer zu berücksichtigen (Abbildung 1). Im informativen Teil 5 der neuen Instandhaltungs-Richtlinie des DAfStb werden dem Sachkundigen Planer hierfür Bemessungswerkzeuge an die Hand gegeben, zum Beispiel in Form von Nomogrammen, die einen Nachweis für Fälle der karbonatisierungs- oder chloridinduzierten Bewehrungskorrosion ermöglichen.

Bei der Instandsetzung spielt die festzulegende Restnutzungsdauer eine zentrale Rolle, um die Schichtdicken zu bemessen. Für Betonersatz aus Beton, Spritzbeton, Trockenbeton oder Vergussbeton können die Schichtdicken wie bisher für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren deskriptiv festgelegt werden. Basis hierfür sind die relevanten Expositionsklassen, die Einhaltung der Anforderungen an die Mindestbetondeckungen nach EC2/NA [1] sowie die Anforderungen an die Baustoffe und Bauausführung in den entsprechenden Normen.

In Teil 5 sind darüber hinaus Nachweisverfahren angegeben, die eine wirtschaftlichere Schichtdickenbemessung erlauben, indem sie die Eigenschaften der unterschiedlichen Betonersatzprodukte zielgerichteter ausnutzen. Im Vergleich zu den deskriptiven Ansätzen bietet sich ein Nachweis der Schichtdicken in folgenden Fällen an:

- Die Restnutzungsdauer weicht von den 50 Jahren ab, die im deskriptiven Ansatz zugrunde gelegt wird.
- Die Betonersatzprodukte sollen wirtschaftlicher ausgenutzt werden.
- Es handelt sich um kritische Bauwerke oder Bauteile, die eines genaueren Nachweises bedürfen.

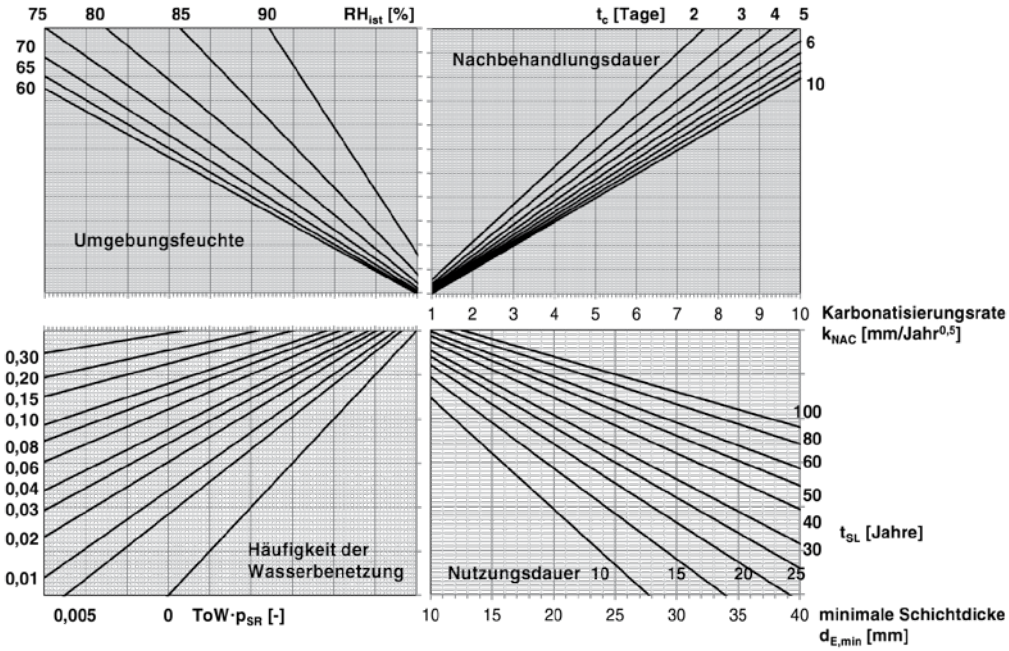
Teil 5 gliedert sich derzeit in folgende Abschnitte:

1 Vereinfachte Verfahren zur Ermittlung der Restnutzungsdauer und der Bemessung von Schichtdicken für Betonersatz bei Karbonatisierung (informativ)
1.1 Allgemeines
1.2 Ermittlung der Restnutzungsdauer bei Karbonatisierung
1.3 Bemessung der Schichtdicken von Betonersatz bei Karbonatisierung
1.3.1 Einfache Abschätzung für Beton, Spritzbeton, Trockenbeton oder Vergussbeton
1.3.2 Einfache Abschätzung für Betonersatz bei unbekannter Zusammensetzung
1.3.3 Bemessung der Schichtdicke mit Hilfe von Nomogrammen
1.4 Beispiel zur Ermittlung der Restnutzungsdauer und der erforderlichen Schichtdicke von Betonersatz bei Karbonatisierung
1.4.1 Ermittlung der Restnutzungsdauer eines vertikal nach Norden orientierten Fassadenelementes
1.4.2 Bemessung der Schichtdicke bei Betonersatz für eine planmäßige Gesamtnutzungsdauer von tSL = 50 Jahren (Fassadenelement vom Abs. 1.4.1)
2 Vereinfachte Verfahren zur Ermittlung der Restnutzungsdauer und der Bemessung von Schichtdicken für Betonersatz bei Chloridbeaufschlagung (informativ)
2.1 Allgemeines
2.2 Ermittlung der Restnutzungsdauer bei Chloridbeaufschlagung
2.2.1 Allgemeines
2.2.2 Bestimmung von Dapp (t0 = 28d) auf Basis der Chloridtiefenprofile zu einem Untersuchungszeitpunkt
2.2.3 Bestimmung von Dapp (t0 = 28d) auf Basis der Chloridtiefenprofile zu mehreren Untersuchungszeitpunkten
2.3 Bemessung der Schichtdicken von Betonersatz bei Chloridbeaufschlagung
2.3.1 Einfache Abschätzung für Beton, Spritzbeton, Trockenbeton oder Vergussbeton
2.3.2 Bemessung für Betonersatz bei von 2.4.1 abweichenden Randbedingungen
2.4 Nomogramme zur Ermittlung der Restnutzungsdauer sowie Bemessung der Schichtdicken beim Betonersatz bei Chloridbeaufschlagung
2.5 Beispiel zur Ermittlung der Restnutzungsdauer und der erforderlichen Schichtdicke von Betonersatz bei Chloridbeaufschlagung
2.5.1 Ermittlung der Restnutzungsdauer eines Meerwasserbauwerkes (Chloridtiefenprofile über eine Inspektion vorhanden)
2.5.2 Ermittlung der Restnutzungsdauer eines Meerwasserbauwerkes (Chloridtiefenprofile über Inspektionen in zwei unterschiedlichen Zeitpunkten vorhanden)
2.5.3 Bemessung der Schichtdicke beim Betonersatz eines Bauteils der Expositionsklasse XD2

Abbildung 2 zeigt beispielhaft ein Nomogramm. Mit seiner Hilfe lässt sich die Schichtdicke eines neu aufzubringenden Betonersatzsystems bei karbonatisierungsinduzierter Bewehrungskorrosion für die Expositionsklassen XC1 (ständig nass), XC2 und XC4 bestimmen. Als Eingangsdaten werden benötigt:

- die produktspezifische Karbonatisierungsrate des Betonersatzes, die in der Regel in einer standardisierten Laborprüfung zu bestimmen ist,
- die vorgesehene Nachbehandlungsdauer am Bauteil,
- die erwartete Umgebungsfeuchte des Bauteils,
- die erwartete Häufigkeit der Wasserbenetzung, die aus meteorologischen Daten abgeleitet werden kann sowie
- die planmäßige weitere Nutzungsdauer.

Abbildung 2: Beispielhaftes Nomogramm zur Bestimmung der minimalen Schichtdicke von Betonersatz bei der Expositionsklasse XC1 (ständig nass, XC2 und XC4 [25] Quelle: Instandhaltungs-Richtlinie



Weiterhin kann Teil 5 der Instandhaltungs-Richtlinie auch herangezogen werden, um die Restnutzungsdauer ohne Instandsetzungsmaßnahmen unter Anwendung des Wurzel-Zeit-Gesetzes abzuschätzen. Benötigt werden hierfür die bei einer Inspektion am Bauteil festgestellten Karbonatisierungstiefen.

Analog kann bei chloridinduzierter Bewehrungskorrosion verfahren werden. Auch für diesen Fall enthält Teil 5 entsprechende Nomogramme.

11.6.2. Schutz von befahrenen Parkdecks wird zusätzlich geregelt

Die beim DAfStb eingerichtete Ad-hoc-Gruppe „Dauerhaftigkeit von Parkdecks“ hat außerdem begleitend zur neuen Instandhaltungs-Richtlinie eine Gesamtsystematik entwickelt, die die Regelungen für die Dauerhaftigkeit von befahrenen Verkehrsflächen darstellt. Sie besteht aus einer Normenvorlage und Erläuterungen. So sollen bereits in der Norm beziehungsweise dem Nationalen Anhang hierzu [1] eindeutige Regelungen formuliert werden, die klaren Prinzipien folgen. So soll vermieden werden, dass die DAfStb-Hefte in die normativen Festlegungen eingreifen. Diese Prinzipien werden erläutert und in die nächste Ausgabe des DAfStb-Heftes 600 [2] aufgenommen. Je nach Ausführungsvariante ist danach vom Tragwerksplaner stets ein passender Entwurfsgrundsatz (EGS) zu wählen und mit dem Objektplaner abzustimmen.

Die drei ESG sind:

- EGS a: Risse werden durch geeignete konstruktive, zum Beispiel Vorspannung oder Einfeldsysteme, betontechnische und ausführungstechnische Maßnahmen vermieden.
- EGS b: Risse werden nicht vermieden, sondern durch eine entsprechende Bewehrungsmenge und -anordnung fein verteilt und in ihrer Breite begrenzt.
- EGS c: Risse werden in bestimmten Bereichen des Bauteils planmäßig zugelassen und dürfen dort auch größere Breiten aufweisen, da sie planmäßig geschlossen werden.

Abbildung 3:
Das DBV-Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ sieht Hinweise zu Planungskonzepten vor, um die Dauerhaftigkeit von befahrenen Parkdecks sicherzustellen. Variante B sieht zum Beispiel ein Oberflächenschutzsystem als flächige Beschichtung vor.

Das DBV-Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ [3] soll zukünftig die Regelungen und Erläuterungen in praxisgerechter Form mit weiteren konkreten Hinweisen versehen. Sein Entwurf sieht unter anderem Hinweise zu Planungskonzepten vor, um die Dauerhaftigkeit von befahrenen Parkdecks sicherzustellen. Hierbei wird zwischen folgenden Planungsvarianten für Parkflächen unterschieden:

- Variante A: ohne flächige Beschichtung, jedoch mit besonderer Maßnahme bei Rissen (EGS a, EGS c),
- Variante B: Oberflächenschutzsystem als flächige Beschichtung (Abb. 3) (EGS b, EGS c),
- Variante C: flächige, rissüberbrückende Abdichtung mit Schutzschicht (EGS b, EGS c).

Je nach Kombination von Verfahren und EGS führt dies über die Zuordnung von Expositionsklassen zu expositionsspezifischen Betondeckungen und gegebenenfalls zu Rissbehandlungsmaßnahmen, die in der Instandhaltungs-Richtlinie geregelt werden. Zum Beispiel: Verfahren 1.4 „Örtliche Abdeckung von Rissen (Bandagen) zum Schutz gegen das Eindringen von Stoffen“. Darüber hinaus ist in Abhängigkeit vom gewählten Konzept ein bauwerksspezifischer Instandhaltungsplan mit Inspektionen, Wartung und Instandsetzungsmaßnahmen aufzustellen. Hierzu sind im aktuellen Entwurf des DBV-Merkblatts geeignete Inspektionsintervalle angegeben.

11.6.3. Schwellenwert vom kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt abgrenzen

Begleitend zur Überarbeitung der Instandsetzungsrichtlinie wurde an den DAfStb die Bitte gerichtet, eine klärende Stellungnahme zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt abzugeben, da dieser „Wert“ in der Fachöffentlichkeit unterschiedlich ausgelegt wird. Im DAfStb-Vorstand wurde daher ein entsprechendes Positionspapier vorbereitet und im Oktober 2015 [4] veröffentlicht.

In der Instandsetzungs- [5] wie auch der Instandhaltungs-Richtlinie findet sich keine Angabe zu einem „kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt“. Die Richtlinie enthält ledig-

lich einen „Schwellenwert“ für den Chloridgehalt. Er beträgt 0,5 Masse-Prozent, bezogen auf die Zementmasse. In der Richtlinie heißt es, dass „zur Beurteilung der erforderlichen Maßnahmen ein Sachkundiger Planer einzuschalten ist“, wenn der Chloridgehalt in der Betondeckung oder im Bereich der Bewehrungslage einen Wert von 0,5 Masse-Prozent, bezogen auf die Zementmasse, überschreitet.

Dieser Schwellenwert ist vom kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt insofern abzugrenzen, dass bei dessen Überschreitung nicht notwendigerweise der kritische Grenzzustand der Depassivierung eintritt, sondern lediglich eine Ereigniskette in Gang gesetzt wird, nämlich eine Begutachtung durch den Sachkundigen Planer mit gegebenenfalls anschließenden Maßnahmen.

Auch in der überarbeiteten Richtlinie wird dieser untere Schwellenwert beibehalten. Denn er liegt nach Auffassung der Fachleute des DAfStb für die im neuen Positionspapier genannten Randbedingungen auf der sicheren Seite.

11.6.4. Die wesentlichen Änderungen im Überblick

Gegenüber der Instandsetzungs-Richtlinie, Ausgabe 2001, enthält der aktuelle Entwurf der neuen Instandhaltungs-Richtlinie folgende wesentliche Änderungen:

- Umbenennung und Erweiterung auf Instandhaltungs-Richtlinie,
- Einführung der Instandhaltungskomponenten Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung in Anlehnung an DIN 31051 [1],
- Festlegung der grundsätzlichen Vorgehensweise bei der Instandhaltung,
- Ergänzung und Modifizierung der Instandsetzungsprinzipien und Verfahren auf Basis DIN EN 1504-9 [8],
- Erweiterung und Präzisierung der Aufgaben und der erforderlichen Qualifikation des Sachkundigen Planers,
- Konkretisierung der Planungsgrundlagen: Restnutzungsdauer im Instandhaltungsplan und Anpassung der Instandsetzungssysteme an die Restnutzungsdauer,
- Fortfall der bisherigen nationalen fremdüberwachten Produktdeklaration,
- Einführung von Überwachungsklassen ÜK-I 1 bis ÜK-I 3,
- Einführung eines neuen, informativen Teil 5 mit Nachweisverfahren zur Ermittlung von Restnutzungsdauern und Schichtdicken von Betonersatzsystemen für karbonatisierungs- und chloridinduzierte Bewehrungskorrosion,
- Festlegung von Einwirkungen aus der Umgebung und dem Betonuntergrund unter Einbeziehung der Expositionsklassen aus DIN EN 206 [5]/DIN 1045-2 [9],
- Einführung von Altbetonklassen in Anlehnung an ZTV-W LB 219 [11],
- Anpassung an aktuelle europäische und nationale Entwicklungen und Regelungen im Betonbau.

Literatur

[1] DIN EN 1992-1-1:2011-01 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1/NA, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

[2] DAfStb Heft 600: Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2)

[3] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: DBV-Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“. 2. überarbeitete Ausgabe, September 2010

[4] http://dafstb.de/akt_Positionspapier_korrosionsausloesender_Chloridgehalt.html

[5] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Oktober 2001

[6] Greve-Dierveld, S. von: Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonteile. Dissertation Technisch Universität München, 2015

In: Messtechnik im Bauwesen 2016, Sonderheft, S. 49-54, Ernst & Sohn, 29.04.2016

11.7. Mikrofon-Array-Technik für scannendes Impakt-Echo-System – Ein neuer messtechnischer Ansatz zur schnellen automatisierten Inspektion von Betonbauteilen

Robin Groschup, Christian U. Große

Kurzfassung

Das Impakt-Echo-Verfahren kann als zerstörungsfreies Prüfverfahren eingesetzt werden, um Schäden an plattenförmigen Betonteilen zu detektieren oder deren Dicke zu bestimmen. Das Verfahren beruht auf der Anregung resonanter elastischer Wellenmoden durch einen mechanischen Impakt. Da die messtechnische Durchführung und vor Allem die korrekte Interpretation der Messdaten nicht unproblematisch sind, stehen für dieses Verfahren nur eingeschränkt praxistaugliche Instrumente und Auswerteroutinen zur Verfügung. Insbesondere flächendeckende Messungen sind für eine korrekte Interpretation von Messdaten zwar wichtig aber nur sehr zeitaufwendig durchführbar. Um dieses Problem zu adressieren, wurde ein spezielles Sensorsystem auf Basis einer Mikrofon-Array-Anordnung entwickelt. Mit diesem Sensor sind in Kombination mit automatischen Impaktoren scannende Messungen mit praxistauglichen Messzeiten möglich. Anwendungsbereiche des mit dem neuen Sensorsystem entwickelten Prüfgeräts sind z. B. Dickenmessungen von Fundamentplatten oder die Detektion von Delaminationsstörungen in Betonfahrbahnen. Messergebnisse an einem Prüfkörper mit bekannten Fehlstellen und Testmessungen an Realbauteilen beweisen die Funktionstüchtigkeit eines erstellten Prototyps und veranschaulichen die Vorteile des neuartigen Sensorkonzepts.

Keywords: Zerstörungsfreies Prüfen von Beton, Wellenverfahren, Impakt-Echo, luftgekoppelte Messtechnik, Mikrofonarray

11.7.1. Einleitung

Zur zerstörungsfreien Abbildung innerer Strukturen, Schäden und Materialeigenschaften von Betonbauteilen können verschiedene Verfahren angewendet werden, die beispielsweise elektromagnetische Wellen (z. B. Radar, Mikrowellen) oder elastische Wellen (z. B. Ultraschall, Impakt-Echo) verwenden [1]. Auf dem Gebiet der Ultraschallprüfung von Be-

ton haben sich in letzter Zeit Arrayprüfköpfe mit Punktkontaktsensoren etabliert. Solche Geräte sind vergleichsweise einfach in der Anwendung und bieten Dank verfügbarer Software komfortable Möglichkeiten zur Messdatenauswertung. Trotz solcher praxisrelevanter Vorteile haben diese Geräte auch einige Nachteile. Dazu zählt z. B. die Notwendigkeit der mechanischen Ankopplung der Sensoren und dem damit verbundenen Zeitaufwand bei der Messdurchführung bzw. Schwierigkeiten bei der Automatisierung solcher Systeme. Andererseits erlauben elektromagnetische Wellenverfahren wie Radar aufgrund der Möglichkeit, die Sensorik in kontinuierlicher Bewegung ohne mechanischen Kontakt über das Bauteil zu führen, schnellere Messzeiten. Jedoch haben diese Verfahren in bestimmten Messsituationen oft den Nachteil geringerer Eindringtiefen und unzureichender Auflösung. Dies gilt vor allem bei bewehrten Betonteilen.

Um die Nachteile der genannten Methoden für bestimmte Messaufgaben zu umgehen, bietet sich eine alternative Herangehensweise an das Impakt-Echo-Verfahren an, das zu den elastischen Wellenverfahren gezählt werden kann. Beim Impakt-Echo-Verfahren werden durch einen mechanischen Impakt auf der Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils elastische Wellen angeregt. Diese erzeugen im Bauteil Resonanzeffekte, die mit speziellen Oberflächenwellenmoden theoretisch beschrieben werden können [2]. Dadurch ist das Impakt-Echo-Verfahren besonders geeignet für Dickenmessungen von plattenförmigen Bauteilen. Aber auch für andere Einsatzzwecke wie z. B. Risstiefenbestimmungen, die Detektion von lokalen Delaminationen oder die Ermittlung von Hinterfüllungszuständen von Betonteilen kann das Verfahren zur Anwendung gebracht werden [3-5].

Im Gegensatz zu den klassischen Ultraschallverfahren nutzt das Impakt-Echo-Verfahren geringere Messfrequenzen. Die damit verbundenen längeren Wellenlängen führen zwar im Allgemeinen zu geringeren Auflösungen als bei Ultraschallverfahren. Da die Signale einer Impakt-Echo-Messung zur Auswertung in den Frequenzbereich transformiert werden, sind bei korrekter Berücksichtigung von Randeffekten und genauer Kenntnis der Materialparameter jedoch Dickenmessungen mit sehr hoher Genauigkeit möglich. Außerdem können durch das Impaktsignal lokale flexurale Vibrationen angeregt werden, wodurch für spezielle Schadensbilder, wie z. B. Delaminationen, eine hohe Sensitivität erzielt werden kann. Weiterhin ergibt sich aus den bei Impakt-Echo-Tests auftretenden Frequenzen ein messtechnischer Vorteil: Die für die Auswertung relevanten elastischen Wellen strahlen Schallenergie im hörbaren Frequenzbereich in die Luft ab. Damit ist eine luftgekoppelte Sensorik auf Basis kostengünstiger Mikrofonmesstechnik realisierbar. Der Hauptvorteil einer luftgekoppelten Aufzeichnungsmethode ist in der Möglichkeit zu sehen, ein scannendes Messgerät zu implementieren, das in kontinuierlicher Bewegung eingesetzt werden kann.

Im konventionellen Ultraschallbereich sind zwar auch luftgekoppelte Systeme verfügbar, jedoch ergeben sich hier messtechnische Probleme aufgrund der höheren Messfrequenzen. Deshalb ist der Einsatz luftgekoppelter Ultraschallsysteme für Beton bisher auf Laboranwendungen beschränkt.

Die luftgekoppelte Aufzeichnung von Impakt-Echo-Signalen ist allerdings ebenfalls mit messtechnischen Herausforderungen verbunden. Hier ist vor allem das Signal-Rausch-Verhältnis der aufgezeichneten Signale zu nennen, das durch die Sensorcharakteristik optimiert werden muss. Weiterhin muss bei der Entwicklung eines Impakt-Echo-Scanners neben der erwähnten Sensoroptimierung auch eine reproduzierbare und mit hoher zeitlicher Wiederholungsfrequenz durchführbare mechanische Signalanregung erreicht werden. Der vorliegende Artikel beschreibt die Entwicklung eines Prototypen-Gerätes für scannen-

de Impakt-Echo-Messungen unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen. Sensorseitig wurde eine Optimierung der luftgekoppelten Aufzeichnung durch ein spezielles Mikrofonarray erreicht. Die automatisierte Signalanregung erfolgt durch einen hubmagnetaktivierten Impaktor. Im Anschluss an die Beschreibung der Messtechnik folgt eine Darstellung erster mit dem Prototyp erzielter Messergebnisse.

Aufgrund des Potentials der luftgekoppelten Impakt-Echo-Methode zur Untersuchung von Fahrbahnbeton, wurden Arbeiten im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes von der Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführt. Bei Betonautobahnen können oberflächlich nicht sichtbare Delaminationsstörungen die Restlebensdauer der Fahrbahnen deutlich mindern. Zur Detektion solcher Schädigungen steht derzeit keine praxistaugliche Messtechnik zur Verfügung. Testmessungen an Betonfahrbahnen zeigen, dass der hier vorgestellte Ansatz eine Methode liefert, um kritisch geschädigte Bereiche frühzeitig zu identifizieren.

11.7.2. Design und Test eines Impakt-Echo-Scanner-Prototyps

11.7.2.1 Mikrofon-Array-Sensor

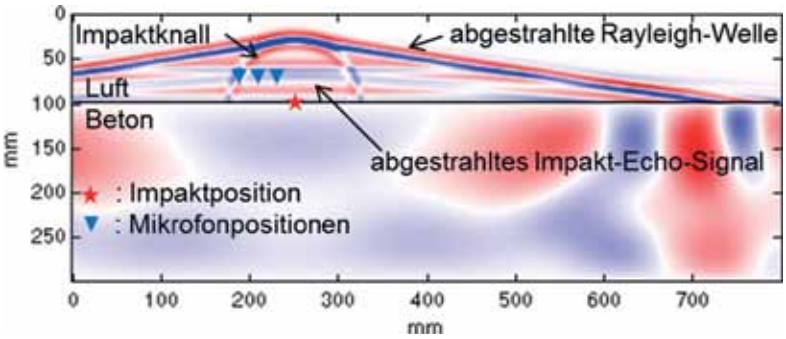


Abbildung 1:
Simuliertes elastisches Wellenfeld in einer Betonplatte und abgestrahlte Luftschallwellen [6].

Ein für luftgekoppelte Impakt-Echo-Messungen spezialisiertes Sensorsystem muss eine hohe Empfindlichkeit für Signale haben, die vom Betonkörper abgestrahlt werden. Alle anderen akustischen Quellen sollten möglichst ausgeblendet werden. Um für die Wellenausbreitung im Betonprüfkörper und die Abstrahlung von Schallwellen ein besseres Verständnis zu erlangen, wurden im Rahmen der Entwicklungsarbeiten numerische Simulationen durchgeführt. Abbildung 1 zeigt die Simulation eines Wellenfeldes in Beton und der angrenzenden Luft, das bei einer Impaktanregung einer Betonplatte entsteht [6]. Die für das IE-Verfahren relevanten elastischen Wellen strahlen ein ebenes Wellenfeld in die Luft ab. Die radiale Erstreckung dieser ebenen Wellen um den Impaktpunkt herum entspricht etwa der Dicke der getesteten Betonstruktur [7]. Andere Wellentypen, darunter der Schallimpuls des Impakts selbst oder an der Oberfläche propagierende Rayleighwellen strahlen gekrümmte oder geneigte Wellenfronten ab. Deshalb kann das relevante Messsignal effektiv durch mehrere Mikrofone, die sich in gleicher Höhe über der Oberfläche befinden, aufgezeichnet werden. Wird das Ausgangssignal dieser Mikrofone summiert, verstärkt sich das Messsignal durch konstruktive Interferenz. Störende Effekte wie Umgebungsgeräusche oder das Geräusch des Impaktors (verursacht durch den direkten Schallimpuls und nachfolgende Vibrationen des Impaktors) werden im Ausgangssignal unterdrückt, da diese Signale unterschiedliche Ankunftszeiten an einzelnen Mikrofonen haben.

Zur Umsetzung dieses Messprinzips mit mehreren Einzelmikrofonen in einen realen Sensor wurden sogenannte MEMS-Mikrofone (Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme) verwendet. Neben ihrem geringen Preis haben solche Sensoren den Vorteil, dass individuelle Einzelmikrofone nur sehr geringe Fertigungstoleranzen aufweisen. Das ist eine wichtige Voraussetzung dafür, dass die Signale der Einzelmikrofone analog summiert werden können. Die Summation erfolgt dabei über eine Verschaltung mit rauscharmen Operationsverstärkern. Durch eine spezielle Anordnung von 35 MEMS-Mikrofonen wurde ein guter Kompromiss

zwischen erforderlicher Empfindlichkeit und Fertigungsaufwand gefunden. Abbildung 2 (links) zeigt das erstellte Sensorboard mit den Mikrofonen und den Operationsverstärkern auf einer Leiterplatte. Nicht besetzte Bereiche der Leiterplatte wurden entfernt, um im Betrieb unerwünschte Schallreflexionen zwischen Leiterplattenmaterial und getesteter Oberfläche zu minimieren [7].

Aufgrund der speziell gewählten Anordnung der Einzelmikrofone ergibt sich eine radial sehr gleichmäßige Richtcharakteristik. Darunter ist die Empfindlichkeit auf Schallsignale aus unterschiedlichen Richtungen zu verstehen. Das Mikrofon-Array hat eine optimale Empfindlichkeit auf Wellenfronten die parallel zur Array-Ebene einfallen. Wellenfronten aus anderen Richtungen werden mit geringerer Sensitivität aufgezeichnet. Somit wird das gewünschte Messsignal gegenüber Störgeräuschen von den Seiten verstärkt.

11.7.2.2 Automatisierung der Signalquelle

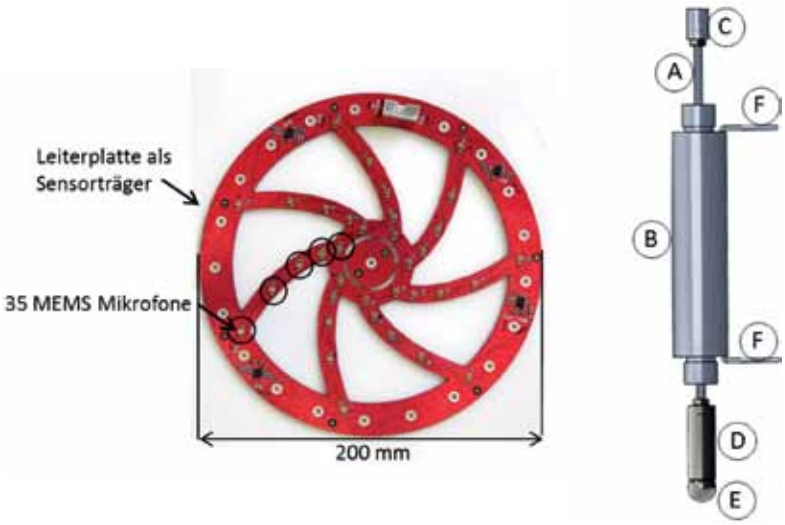


Abbildung 2:
Die Kernkomponenten des Impakt-Echo-Systems. Links: Sensorboard mit 35 MEMS Einzelmikrofonen und Operationsverstärkern [TU München]. Rechts: Impaktquelle auf Basis eines Doppelhubmagneten (Fa. Tremba GmbH). A: beweglicher Tauchkern, B: Magnetgehäuse mit zwei unabhängig bestrombaren Spulen, C: Triggersensor, D: Zusatzmasse zur Steuerung von Frequenzgehalt und Energie des Quellsignals, E: Stahlkugel als Impaktspitze, F: Zuleitungen.

Um für die Impakt-Echo-Methode ein optimales Signal zu erzeugen, sollte die Anregung des zu prüfenden Bauteils durch einen rein elastischen Stoß erfolgen. In der Praxis kommt man durch das freie Fallenlassen einer Stahlkugel dieser Anforderung am nächsten. Wirken äußere Zwangskräfte auf einen Impaktor während der Kontaktzeit mit der Oberfläche, sind die Bedingungen eines rein elastischen Stoßes nicht mehr gegeben. Dies kann negative Auswirkungen wie z. B. ein Prellen des Impaktors (d.h. mehrfaches Aufschlagen) zur Folge haben. Dadurch würde sich die Datenqualität verschlechtern und das Signal wäre u. U. nicht mehr eindeutig auswertbar. Diese Gesichtspunkte müssen bei der Konstruktion einer automatischen Impakt-Echo-Quelle berücksichtigt werden. Weiterhin sollte es bei einem automatischen Impakt-Echo-System möglich sein, einzelne Anregungen reproduzierbar und mit hoher zeitlicher Wiederholfrequenz durchzuführen.

Die genannten Anforderungen lassen sich gut mit Hilfe von Hubmagneten passender Größe erfüllen. Als besonders geeignet erwies sich ein Doppelhubmagnet mit spezieller elektronischer Steuerung (Hersteller Fa. Tremba). Durch eine pulsweitenmodulierte und zeitlich exakt steuerbare Stromversorgung der Spulen kann ein mit dem Tauchkern verbundener Impaktor schnell beschleunigt und nach dem Impakt ohne zu prellen wieder zuverlässig in einer Ruheposition gehalten werden.

Dank der flexiblen Steuerungsoptionen und der elektromechanischen Effizienz des eingesetzten Doppelhubmagneten kann in Kombination mit einer Variation der Impaktormasse der Frequenzgehalt der erzeugten elastischen Wellen gesteuert werden. Die Bauform des Doppelhubmagneten erlaubt durch die beidseitige Zugänglichkeit des Tauchkerns auch eine vorteilhafte Positionierung eines Triggersensors, der zur Impaktdetektion und zur zeitlichen Referenzierung (Triggerung) der akustischen Signale benutzt werden kann (Abbildung 2, rechts).

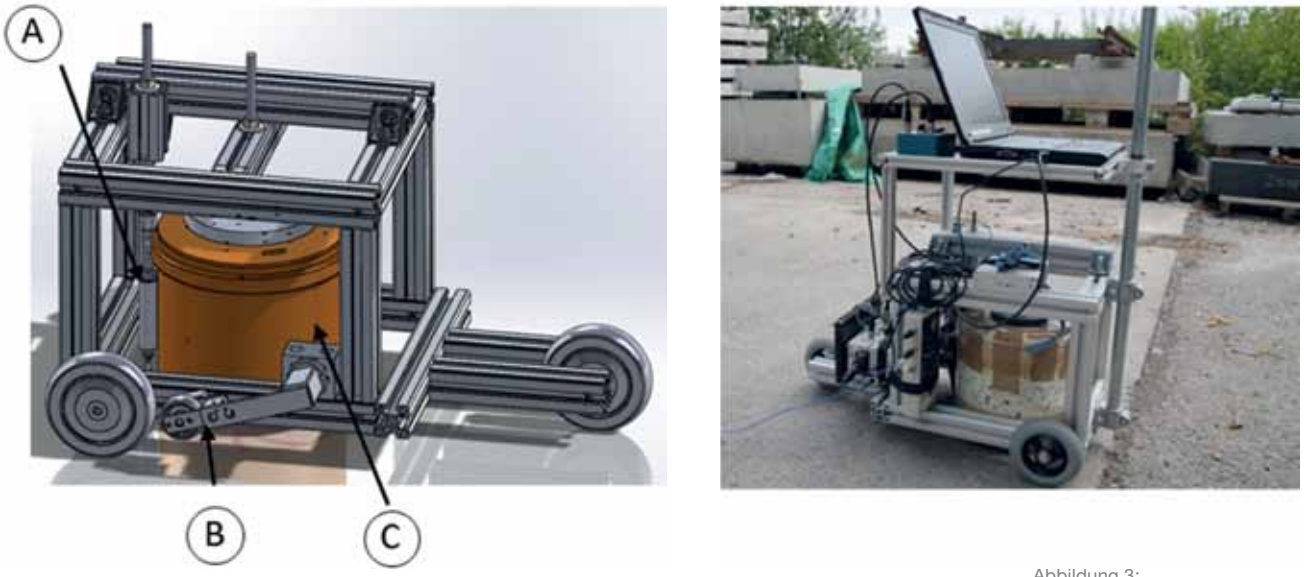


Abbildung 3:
Links: Reale Umsetzung mit Messelektronik [TU München]. Rechts: 3D Skizze des Impakt-Echo-Scanners, A: Impaktor, B: Wegaufnehmer, C: Mikrofonarray in Gehäuse.

Vergleiche mit Messungen, bei denen eine frei fallende Kugel als idealisierte Quelle verwendet wurde, zeigen, dass mit dem Hubmagnetimpaktor dank höherer Impaktenergien ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis erzielbar ist als mit manueller Anregung.

11.7.2.3. Impakt-Echo-Scanner und Test an künstlichen Fehlstellen

Die beschriebenen Komponenten – Mikrofonarray und Hubmagnetimpaktor – wurden zusammen auf einen rollbaren Wagen montiert, der eine Steuer- und Aufzeichnungselektronik (Laptop mit A/D-Wandler) und Akkus zur Stromversorgung aufnehmen konnte [8]. Über einen Wegaufnehmer sind äquidistante Impaktauslösungen möglich und die aufgezeichne-

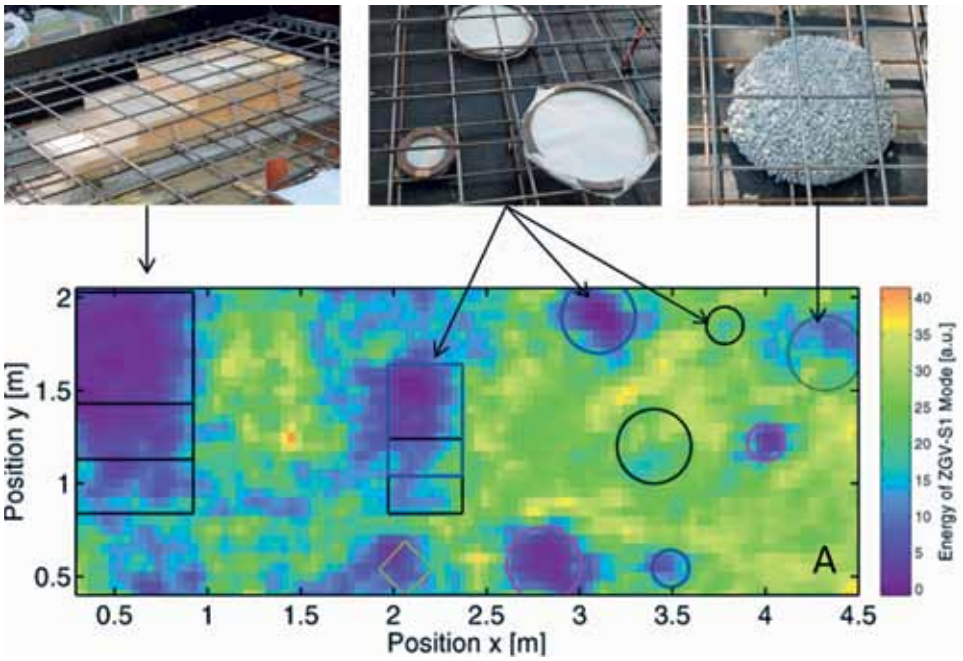


Abbildung 4:
Obere Bildreihe: künstliche Fehlstellen vor der Betonage eines Betonprobekörpers (Minderdicken, Delaminationen, Kiesnest). Unten: Mit dem Impakt-Echo-Scanner erstellter Flächenscan am fertigen Betonprobekörper.

ten Daten können mit Positionsinformationen versehen werden. Beim Rahmen wurde auf eine steife Konstruktion Wert gelegt, um unerwünschte akustische Störgeräusche durch strukturelle Resonanzen zu vermeiden (Abbildung 3).

Das System wurde zunächst an einem Betonprobekörper mit künstlichen Fehlstellen getestet. Die Fehlstellen bestanden aus Minderdicken, realisiert durch Einbauten aus Hartschaum, Delaminationen in Form von horizontal eingebauten PTFE-Folien und einem Kiesnest (Abbildung 4).

Die in dieser ersten Testmessung geprüfte Fläche betrug ca. 8 m^2 und wurde in ca. 15 Minuten komplett gescannt. Somit sind also wesentlich höhere Prüfgeschwindigkeiten möglich als mit Ultraschallgeräten. Die gesamte Prüfzeit ist in etwa vergleichbar mit der Dauer, die für eine handgeführte Radarmessung nötig wäre.

Impakt-Echo-Rohdaten können auf verschiedene Art und Weise zur Visualisierung aufbereitet werden. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis einer Energieberechnung der dominanten Signalfrequenzen. Hohe Energien der sog. Dickenresonanz (auch ZGV-S1 Mode [2,7]) deuten auf ungestörte Bereiche hin. Bereiche mit niedrigerer Energie bei dieser Frequenz können mit Fehlstellen in Verbindung gebracht werden. Schon mit dieser einfachen Auswertemethode sind die meisten der künstlichen Fehlstellen identifizierbar. Detaillierte Auswerteroutinen und weitere Formen der Ergebnisdarstellung sind Gegenstand aktueller Forschung.

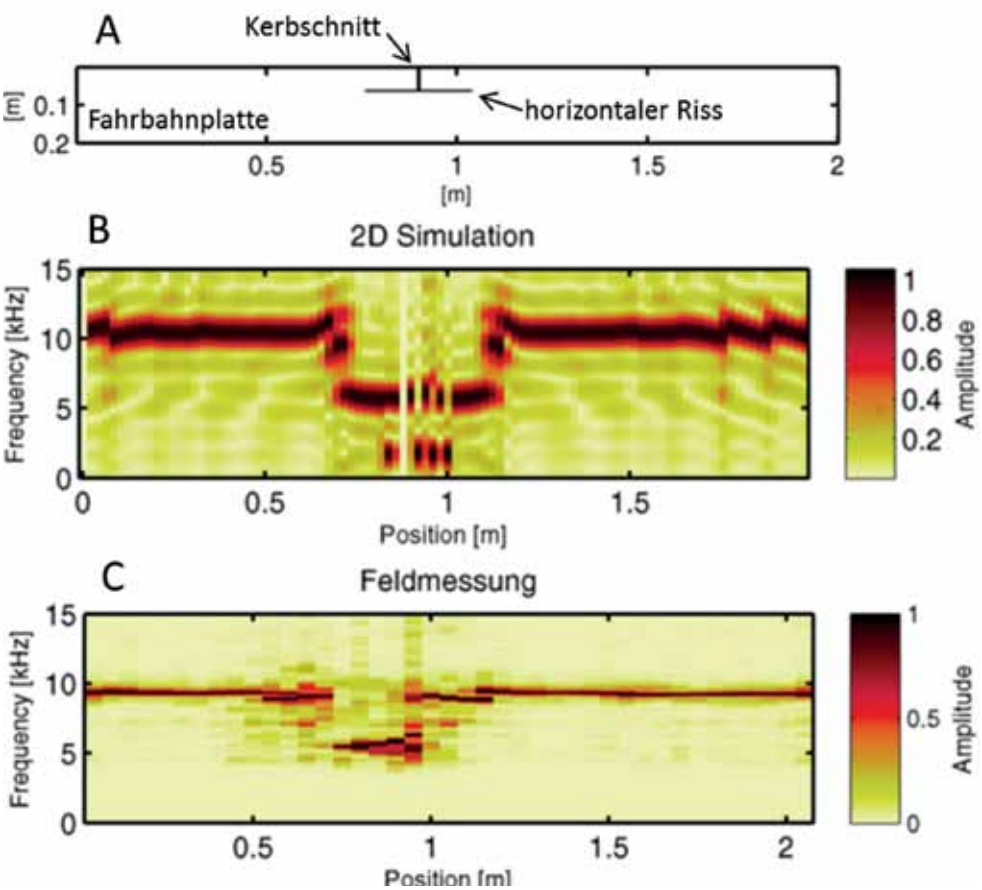


Abbildung 5:
A: zweidimensionales Geometriemodell einer Fahrbahnplatte mit Kerbschnitt und horizontalem Riss.
B: simuliertes Messergebnis.
C: reales Messergebnis an einer Fahrbahnplatte.

11.7.3. Anwendungsbeispiel: Delaminationen in Betonfahrbahnen

Aufgrund der scannenden Einsatzmöglichkeit ist das vorgestellte Verfahren besonders interessant für Prüfaufgaben bei denen große Flächen oder lange Streckenabschnitte untersucht werden müssen. Einen solchen Anwendungsfall stellt z. B. die Prüfung von Fahrbahnplatten aus Beton dar. Solche Bauteile können Schadensbilder aufweisen, die mit anderen Verfahren nicht zufriedenstellend abgebildet werden können. Dazu gehören horizontale Risse oder sogenannte Delaminationsstörungen. Marktübliche Radargeräte haben für solche Schadensbilder ein zu geringes Auflösungsvermögen. Auf der anderen Seite können Ultraschall-Echo-Verfahren Delaminationsschäden zwar potentiell abbilden, die langsamen Prüfgeschwindigkeiten mit diesen Verfahren machen aber Einsätze auf größeren Streckenabschnitten schwierig.

Deshalb wurde der erstellte Prototyp an einem Autobahnabschnitt in Betonbauweise getestet. Auf Bohrkernentnahmen basierend bestand Verdacht auf eine horizontale Rissbildung entlang der Querscheinfugen. Zur Verifizierung der Messergebnisse wurden Simulationsrechnungen an einem vereinfachten Materialmodell durchgeführt (Abbildung 5, A). Das Geometriemodell enthält einen Kerbschnitt und einen im Grund des Schnittes ansetzenden horizontalen Riss. Bei den Simulationen wurde das komplette Wellenfeld zweidimensional simuliert und analog wie die realen Impakt-Echo-Messdaten prozessiert.

Die Daten wurden anschließend als Frequenz-B-Scan dargestellt (Abbildung 5, B, C). Sowohl die Messdaten als auch die Simulationsergebnisse zeigen an den Stellen des Kerbschnittes eine Verschiebung der Frequenzanzeigen von ca. 10 kHz zu Anzeigen im Bereich um 5 kHz. Die Anzeigen um 10 kHz entsprechen der Dickenresonanz der gesamten Betondecke. Die tieffrequenten Anzeigen um 5 kHz können durch flexurale Schwingungen der delaminierten Bereiche über dem horizontalen Riss erklärt werden. Aus der qualitativen Übereinstimmung des simulierten Impakt-Echo-Tests und den Messdaten lässt sich schließen, dass die Betonplatte tatsächlich eine Delaminationsstörung aufweist und diese mit dem Messgerät abbildbar ist.

11.7.4. Zusammenfassung

Dank der kontaktlosen Aufzeichnungsmethode konnten mit dem präsentierten Verfahren Impakt-Echo-Messungen in kontinuierlicher Messfahrt durchgeführt werden. Schlüsselelement des neuen Messprinzips ist das spezielle Sensorsystem, das aus einer Array-Anordnung von kostengünstigen MEMS-Mikrofonen besteht. In der Kombination mit einer automatischen Impakt-Anregung sind damit scannende Messungen mit Prüfgeschwindigkeiten möglich, die das System für Anwendungsfälle interessant machen, bei denen Flächenscans oder längere Messprofile mit hoher räumlicher Messpunktdichte nötig sind.

Obwohl das Impakt-Echo-Verfahren gegenüber dem Ultraschall-Echo-Verfahren Einschränkungen im Auflösungsvermögen aufweist, hat es aufgrund der genannten Vorteile großes Potential für Prüfaufgaben, die mit bestehenden Methoden nicht zufriedenstellend gelöst werden können. Dazu gehört z. B. die flächendeckende Detektion von Delaminationen und Horizontalrissen.
Durch Testmessungen an einem Probekörper mit künstlichen Fehlstellen und anhand von Messdaten in einem Feldversuch an Fahrbahnbetonplatten wurde das Potential des Verfahrens geprüft. Weitere Optimierungen des erstellten Prototypen für die Anwendung auf längeren Streckenabschnitten von Betonfahrbahnen sind in Bearbeitung.

Danksagung

Wir danken der Bundesanstalt für Straßenwesen für die Förderung der Forschungsarbeiten. Die dem Bericht zugrunde liegende Arbeiten werden im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur unter FE-Nr. 08.238 durchgeführt. Das hier beschriebene Verfahren wurde im Vorfeld des Forschungsprojektes durch die TU München entwickelt. Im Zusammenhang mit dem aktuellen Forschungsvorhaben gilt es nun, das Verfahren für spezielle Anwendungsfälle im Betonstraßenbau weiterzuentwickeln bzw. zu optimieren und dessen Möglichkeiten und Grenzen aufzuzeigen. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor. Weiterhin bedanken wir uns bei der Firma Tremba GmbH für die wertvolle Zusammenarbeit bei der Entwicklung der Impaktquelle.

Literatur

[1] DBV-Merkblatt Anwendung Zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, Berlin, 2014.

[2] Gibson, A. und J.S. Popovics, Lamb wave basis for impact-echo method analysis. Journal of Engineering Mechanics-Asce, 2005. 131(4): p. 438-443.

[3] Krüger, M. und C.U. Grosse. Crack Depth Determination using Advanced Impact-Echo Techniques in Proceedings of 9th European Conference on Nondestructive Testing. 2006. Berlin.

[4] Oh, T., J.S. Popovics, und S.H. Sim, Analysis of vibration for regions above rectangular delamination defects in solids. Journal of Sound and Vibration, 2013. 332(7): S. 1766-1776.

[5] Ryden, N., Aurell, O., Nilsson, P. und Hartlén, J., Impact echo Q-factor measurements towards non-destructive quality control of the back fill in segmental lined tunnels, in RILEM Bookseries. 2012. S. 915-919.

[6] Groschup, R. und C.U. Grosse. Neue Ansätze zur Anwendung der Impakt-Echo-Methode. in DGZfP Jahrestagung 2014. 2014. Potsdam.

[7] Groschup, R. and C. Grosse, MEMS Microphone Array Sensor for Air-Coupled Impact-Echo. Sensors, 2015. 15(7): S. 14932-14945.

[8] Groschup, R. und C.U. Grosse. Enhancing Air-Coupled Impact-Echo with Microphone Arrays. in Proceedings of the 2015 International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering, NDT-CE. 2015. Berlin.

12. Impressum

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Prof. Dr.-Ing. habil. 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

design
für Kommunikation

Pf.-Eitlinger-Ring 5
85464 Finsing
Tel +49.8121.988996
www.designfürkommunikation.de

Verantwortlich
Britta Uhl

Bildnachweis Umschlag
Bild Titelseite © Heike Geigl
Bilder Rückseite © Astrid Eckert