# Jahresmitteilung 2015

cbm – Centrum Baustoffe und Materialprüfung

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

cbm
Centrum Baustoffe
und Materialprüfung

# Jahresmitteilung 2015

# Inhalt


**1. Vorwort** **4**

**2. Personelle Veränderungen** **6**

**3. Organigramm** **8**

**4. Aus dem Lehrbetrieb** **10**
4.1. „Double Appointment“-Lehre 10
4.2. Diplom- und Masterarbeiten 10
4.3. Workshop Baustofferzeugende Industrien 25

**5. Veranstaltungen** **34**
5.1. Tag des Lehrstuhls ZfP am 16.01.2015 34
5.2. Exkursion zur Abteilung „Werkstofftechnik – Zerstörungsfreie Prüfung“ der BMW Group in München (Petuelring) 34
5.3. Deutsche Betonkanu-Regatta 35
5.4. Betriebsexkursion 2015 37
5.5. Workshop in Malmö und Riso von Greentech und Euro Tech Universities 40
5.6. AlForS 40

**6. Ehrungen** **42**
6.1. Studentenpreis der DGZfP 42
6.2. Doce et Delecta 42

**7. Berichte aus den Arbeitsgruppen** **43**
7.1. Arbeitsgruppenschwerpunkte 43
7.2. Abgeschlossene Forschungsvorhaben 50
7.3. Laufende Forschungsvorhaben 59
7.4. Neue Forschungsvorhaben 61
7.5. Ausgewählte Materialprüfung 70
7.6. Sonstiges 74

**8. Mitarbeit in Ausschüssen, Arbeitskreisen, Gremien und Fachkommissionen** **75**

**9. Dissertationen** **80**
9.1. Laufende Dissertationen 80
9.2. Dissertation Fact Sheets 82
9.3. Beendete Dissertationen 90

**10. Liste aller Veröffentlichungen 2015** **96**

**11. Ausgewählte Veröffentlichungen** **101**
11.1. Modifizierung zementgebundener Baustoffe durch gezielte Carbonatisierung 101
11.2. Ultra High Strength Fibre-Reinforced Concrete for Thin-Walled Precast Elements 111
11.3. Reinforcement corrosion behavior in bending cracks after short-time chloride exposure 120
11.4. Einfluss aluminiumhaltiger Zusatzstoffe auf die Struktur und Festigkeit der korrodierten Schicht von Beton beim Säureangriff 130
11.5. Concepts for the integration of NDT courses into the academic curriculum of universities 137

**12. Impressum** **148**

# 1. Vorwort

Liebe Freunde und Partner des cbm!

In einer sich schnell ändernden Zeit ist es gut, sich am Ende eines Jahres an diese Entwicklungen zu erinnern und sie festzuhalten. Der vorliegende Jahresbericht des Centrum Baustoffe und Materialprüfung stellt unsere Aktivitäten im Jahr 2015 dar. Wir freuen uns sehr, dass auch dieser Bericht, wie in den Vorjahren, wieder so umfangreich hat werden können. Völlig bewusst ist uns, dass ohne die vielen Geschäftspartner, Förderer und Beschäftigten, die uns das ganze Jahr über in den Bereichen Lehre, Wissenschaft, Forschung und Materialprüfung unterstützen, all die geschilderten Aktivitäten und Erfolge unmöglich gewesen wären. Dies gilt sowohl für die wissenschaftliche Arbeit an den Lehrstühlen als auch für alle Tätigkeiten der Abteilung Baustoffe des Materialprüfamtes BAU in Pasing, das im Bereich der wissenschaftlichen Materialprüfung, der Überwachung und Zertifizierung von Baustoffen und Bauprodukten seiner verantwortungsvollen Rolle jedes Jahr erneut gerecht wird.

Das „Kerngeschäft“ der Lehrstühle und Fachgebiete einer Universität ist naturgemäß die Lehre und damit die Ausbildung der Studierenden sowie der Doktorandinnen und Doktoranden. So wurden wieder eine Vielzahl von studentischen Abschlussarbeiten und Promotionsvorhaben betreut, was die Popularität des cbm unterstreicht. Gestalterisch wirken wir über die Position des Studiendekans der *Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt (BGU)* sowie im Prüfungsausschuss B.Sc. der Studienfakultät *Munich School of Engineering (MSE)* sogar an exponierter Stelle mit. Neben unseren regulären Lehrveranstaltungen in den Bachelor- und Masterstudiengängen der Fakultäten BGU und Maschinenwesen finden Lehrexporte in die Fakultäten *TUM School of Management* (Wirtschaftswissenschaften) und MSE sowie in die Lehrerausbildung (Bachelor of Education) statt. Mit Frau Dr. Spengler wird zudem die Geschäftsleiterin des Fakultätsgraduiertenzentrums BGU vom cbm gestellt.

Höchst vielfältig waren die Aktivitäten in Wissenschaft und Forschung. Alle sechs Arbeitsgruppen des cbm haben hier im vergangenen Jahr Forschungsprojekte abschließen und neue gewinnen können. Dies sichert natürlich nicht nur langfristig die Sichtbarkeit des cbm, sondern auch die Gewinnung motivierter und wissenshungriger Nachwuchswissenschaftler. So stehen neben Themen zur Lebensdauer von Baustoffen, AKR (Alkali-Kieselsäure-Reaktion) und anderen Degradationsprozessen, zur Beanspruchung von Betonfahrbahnen und zur Vermeidung von sogenannten Blow-ups, zur Korrosion und Ermüdung, zu Asphalteigenschaften und Gesteinskörnungen und in den nächsten Jahren auch arbeitsgruppenübergreifende Projekte zur Lebensdauer der Tragstrukturen von Windenergieanlagen zur Bearbeitung an. Dies lässt viele spannende Abschlussarbeiten und interessante Artikel in Fachzeitschriften erwarten.

Die Forschungsprojekte verbinden in idealer Weise den Bereich der Lehre mit dem der produktbezogenen Werkstoffprüfung, die traditionell das Kerngerüst des Materialprüfamtes ausmacht. Hier waren die finanziellen Ergebnisse so gut, dass ein Großteil der Erlöse für Investitionen in die Erneuerung der technischen Infrastruktur des cbm fließen konnte. Den Mitarbeitenden, die dies ermöglichten, sei hier ausdrücklich gedankt.

Weitere Investitionen sind geplant, um für das mittlerweile an einigen Stellen baufällige Institut eine langfristige Lösung zu finden. Zusammen mit dem Universitätsbauamt

und dem Baureferat der Stadt wird nach Entwicklungsmöglichkeiten gesucht, die auch den inzwischen in Betrieb genommenen Anbau integrieren.

Wir berichten in der Jahresmitteilung über eine Vielzahl an Ereignissen, Publikationen, öffentlichkeitswirksamen Aktivitäten und internationalen Begegnungen, die nicht zuletzt auch über die Wahrnehmung eines Forschungsfreisemesters an der University of California in Berkeley (USA) durch Christoph Gehlen in besonderer Weise die internationale Vernetzung des cbm vertiefen halfen.

Wir ermuntern Sie sehr, nähere Informationen zu einzelnen hier dargestellten Themen bei Bedarf nachzufragen. Treten Sie ein in den Dialog mit uns!

Mit allen unseren Mitarbeitenden des cbm freuen wir uns sehr darauf, mit Ihnen auch im Jahr 2016 wieder zusammenarbeiten zu dürfen.

Ihre

| | | | |
|---|---|---|---|
| Prof. Dr.-Ing.<br>Christoph Gehlen | Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Geophys.<br>Christian Große | Prof. Dr.-Ing.<br>Detlef Heinz | Dr.-Ing.<br>Thomas Wörner |

# 2. Personelle Veränderungen

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

| | |
|---|---|
| Herr Max Botz, M.Sc. | (01.08.2015) |
| Frau Dr. Katja Pinkert | (15.09.2015) |

**Nicht wissenschaftliche Mitarbeiter, die uns nun unterstützen**

| | |
|---|---|
| Frau Andrea Weis | (01.04.2015) |
| Herr Bernhard Fischer | (25.06.2015) |
| Herr Markus Koll | (08.07.2015) |

**ausgeschiedene Mitarbeiter**

| | |
|---|---|
| Frau Csilla Bognar | (31.01.2015) |
| Frau Olga Kazakova | (31.05.2015) |
| Frau Ying Wang | (30.06.2015) |
| Frau Varinia Ehrhardt | (12.07.2015) |
| Herr Atanas Zashev | (31.08.2015) |

Bild: Prof. Springenschmid (2.v.r.) im Kreise seiner ehemaligen Mitarbeiter, v.l.n.r.: Bostvironnois, Strencioch, Schmidmaier, Dorner, Hiller, Schachinger, Spengler, Volkwein, Hilbig, Sonnewald, Beddoe, Sodeikat, Plannerer, Mangold, Friedl, Wagner-Gray, Girlinger, Schöppel, Breitenbücher, Breuer, Fiala, Springenschmid, Letsch

**in den Ruhestand verabschiedet haben wir**

| | |
|---|---|
| Herrn Alfred Hofmann | (28.02.2015) |
| Herrn Alfred Schwingenschlögl | (31.07.2015) |

**25-jähriges Dienstjubiläum feierten**

Herr Bernd Bollmann
Herr Helge Zeuner

**30-jähriges Dienstjubiläum feierte**

Herr Dr. Robin Beddoe

# 3. Organigramm

**Institutsleitung**

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

**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.**
Fr. Dressler, Dipl.-Ing.
Hr. Fischer, M.Sc.
Fr. Irbe, M.Sc.

**Mörtellabor**
**Hr. Kriegel**
Hr. Blendowsky
Hr. Gottmann

**Physiklabor**
Fr. Hartlieb-Pfüller

## AG 2 Betontechnologie

**Hr. Lowke, Dr.-Ing.**
**Hr. Skarabis, Dipl.-Ing.**
Fr. Illguth, M.Sc.
Hr. Kränkel, Dipl.-Ing.
Fr. Thiel, Dipl.-Ing.
Fr. Spengler, Dr.-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, Dipl.-Ing.**
Hr. Elner, B.Sc
Hr. Giebitz, Dipl.-Ing.
Hr. Hiemer, M.Sc.
Hr. Huber, Dipl.-Ing.
Hr. Müller, Dipl.-Ing.
Hr. Osterminski, Dipl.-Ing.
Hr. Rahimi, Dipl.-Ing.
Hr. Schmid, Dipl.-Ing.

Assistenz/Techn. Sachbearbeitung:
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 | | |

cbm
Centrum Baustoffe
und Materialprüfung

Technische Universität München

**Fachgebiet Gesteinshüttenkunde**

Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz
Assistenz Institutsleitung: Fr. Freibuchner (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.**

**Chemielabor**
**Hr. Gmell**
Hr. Halegua
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**
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

## 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: Dezember 2015

# 4. Aus dem Lehrbetrieb

## 4.1. "Double Appointment"-Lehre

### Prof. Christian Große unterrichtet in zwei Fakultäten

Der Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung betreute im Sommersemester 2015 die Vorlesung Materialwissenschaften II für das 4. Semester des Bachelorstudiengangs „Ingenieurwissenschaften“ an der Munich School of Engineering (MSE). Der Vorlesungsbetrieb ist zweigeteilt und wird von Dozenten der Fakultäten für Physik und Maschinenwesen gehalten. Prof. Große übernahm dabei im 4. Semester den Ingenieurteil. Im Rahmen des Bachelorstudienganges werden zudem Forschungspraktika angeboten, um den Studierenden Einblick in die aktuelle Arbeit des Lehrstuhls zu geben. Mehrere Praktikanten werden vom Lehrstuhl ZfP betreut. Die MSE (http://www.engineering.mse.tum.de/) bietet den Studiengang seit dem Wintersemester 2010/2011 als interfakultative Lehrveranstaltung mit Beteiligung der Physik, Chemie, Elektrotechnik, Informatik, Mathematik sowie das Maschinen- und Bauingenieurwesen an.

Seit 2015 ist Prof. Große Mitglied im Studienfakultätsrat der MSE und stellvertretender Vorsitzender der Prüfungskommission.
Weitere Lehrveranstaltungen sind die Vorlesung „Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen“ und „Anwendungen der Zerstörungsfreien Prüfung“. Seit dem Wintersemester 2013/2014 werden diese für Studierende der Fakultäten Bau Geo Umwelt, Maschinenwesen und der MSE angeboten. Die Vorlesung „Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen“ ist dabei eine Pflichtveranstaltung in der neuen Vertiefungsrichtung „Bauwerkserhaltung“. Im Rahmen beider Vorlesungen wird eine Übungseinheit zur ersten praktischen Anwendung ausgewählter zerstörungsfreier Prüfmethoden angeboten. Außerdem findet im wöchentlichen Rhythmus das „ZfP-Seminar“ mit ausgewählten Themen aus der Praxis der Zerstörungsfreien Prüfung statt. Externe Vortragende berichten dabei u.a. über Trends und Anwendungen von ZfP-Verfahren in Wissenschaft, Forschung und Qualitätssicherung in der Industrie. Darüber hinaus leistet der Lehrstuhl einen Beitrag zum Praktikum „Konstruktionswerkstoffe“ für Studierende des Bauingenieurwesens sowie zur Lehrveranstaltung „Faser-Matrix-Verbundwerkstoffe“ für Studierende des Maschinenbaus.

## 4.2. Diplom- und Masterarbeiten

### AG Bindemittel und Zusatzstoffe

#### 4.2.1. Eigenschaften von Belit-Calciumsulfoaluminatzement aus flugaschehaltigem Rohmehl – Einfluss von Alkalien

Masterarbeit von Teresa Stangl
Betreuung: Dr.-Ing. Anne Heisig

In Zeiten von $CO_2$-Einsparungen und ökologischen Zertifizierungen für Gebäude stellt Portlandzement mit seinem hohen Rohstoffverbrauch und $CO_2$-Emission bei der Herstellung einen energieintensiven Baustoff dar. Für spezielle Anwendungen, wie zum Beispiel Fließestrich, kann Portlandzement durch sogenannte low-energy Zemente, wie den Belit-Calciumsulfoaluminatzement (BCSA-Zement) aufgrund seiner hohen Frühfestigkeit, ersetzt werden. Diese Zementart besteht hauptsächlich aus den Phasen Belit und Ye’elimit und kann bei geringerer Brenntemperatur und mit einem geringeren Calciumanteil als Portlandzement hergestellt werden.

In dieser Arbeit wurden die Eigenschaften eines im Labor hergestellten BCSA-Zementes, der als aluminiumhaltigen Rohstoff Flugasche enthält, untersucht. Dabei wurde dieser Zement nicht durch Mischen von Belit- und CSA-Zement erzeugt, sondern durch das Brennen eines Rohmehls.

Der so hergestellte BCSA-Zement zeigt eine sehr schnelle Anfangshydratation, die zu einer hohen Frühfestigkeit, aber im weiteren Verlauf zu einem geringen Festigkeitsanstieg bis 91 Tage führt (Abbildung 1). Die Beschleunigung der Hydratation wird dabei vermutlich durch die Hydratphase Syngenit erzeugt, welcher aufgrund des durch die Verwendung der Flugasche hohen Alkaligehaltes entsteht.

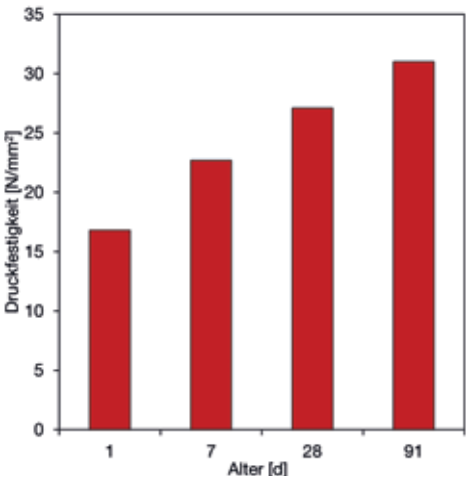



Abbildung 1: Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1 des BCS Zementes aus Flugasche

Zur genauen Bewertung des Einflusses der Alkalien auf die Hydratation des BCSA-Zementes wurden weitere Klinker, die der Zusammensetzung des BCSA-Zementes aus Flugasche entsprachen, aus Reinstoffen und mit verschiedenen Alkaligehalten hergestellt. Diese Versuche bestätigten die beschleunigende Wirkung eines hohen Alkaligehaltes auf die Hydratation durch die Bildung von Syngenit sowie einen verringernden Einfluss auf die Bildung von Ye'elimit.

Eine Übertragung der Erkenntnisse bezüglich des Alkalieinflusses aus den Reinstoffmischungen auf die Rohstoffmischung war jedoch nicht möglich, da die Hydratation der Rohstoffmischung deutlich schneller verlief als bezogen auf den Alkaligehalt zu erwarten war. Somit ist davon auszugehen, dass in der Flugasche enthaltene Nebenbestandteile und Spurenelemente ebenfalls einen starken Einfluss auf den Hydratationsverlauf des Belit-CSA Zementes haben.

Es zeigt sich aber, dass es möglich ist, einen BCSA-Zement auf Basis eines flugaschehaltigen Rohmehls herzustellen, dessen Eigenschaften die Verwendung als Fließestrich und Abdichtungsmasse ermöglichen und dieser dabei eine ökologisch vorteilhaftere Variante im Vergleich zu einem Portlandzement darstellt.

### 4.2.2. Einfluss der gezielten Carbonatisierung auf die Eigenschaften von Mörtelproben

Masterarbeit von Ricarda Gmür
Betreuung: Dr.-Ing. Liudvikas Urbonas

**Einleitung**

Die gezielte Carbonatisierung kann Eigenschaften von geeigneten zementgebundenen Werkstoffen verbessern. Überkritisches $CO_2$ ($scCO_2$) hat sich als geeignetes Medium für eine Beschleunigung der Reaktionsabläufe erwiesen. Calciumhydroxid, C-S-H-Phasen und unhydratisierte Calciumsilikate ($C_3S$, $C_2S$) reagieren mit $CO_2$ unter Freisetzung von Wasser zu Calciumcarbonat ($CaCO_3$) und Silikagel ($SiO_2$). Um ein näheres Verständnis über die Reaktionsabläufe zu erlangen, wurden im Rahmen der Abschlussarbeit die Einflüsse der Zementzusammensetzung sowie unterschiedlicher Carbonatisierungsdrücke auf die Ei-

genschaften von carbonatisierten Mörtel- und Zementsteinproben untersucht. Ziel war es, daraus resultierende Entwicklungen der Porosität und mechanischer Eigenschaften sowie Unterschiede in der Phasenbildung zu untersuchen.

**Untersuchungen**

Für das Versuchsprogramm wurden zwei handelsübliche Portlandzemente gewählt, die sich in ihrer mineralogischen Zusammensetzung, insbesondere an $C_3A$- und $C_4AF$-Gehalten, unterschieden.

| Zement | | $C_3S$ | $C_2S$ | $C_3A$ | $C_4AF$ | $Na_2O_{äqu}$ | Spez. Oberfläche |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | M.-% | | | | | $cm^2$ |
| SR | CEM I 32,5 N-LH SR | 48,3 | 22,2 | 1,3 | 18,6 | 0,67 | 3600 |
| $C_3A$ | CEM I 32,5 R | 56 | 15,6 | 9 | 7 | 0,83 | 2650 |

Der Zement wurde vereinzelt zu 50 und 75 M.-% mit Kalksteinmehl substituiert. Mörtel- und Pastenprismen (4 x 4 x 16 $cm^3$) wurden nach, bzw. in Anlehnung an DIN EN 196-1, mit einem w/b-Wert von 0,5 hergestellt. Die Prismen wurden direkt nach ihrer Herstellung bis zum Ausschalen für 24 h bei 20 °C / > 95% r.F. gelagert. Nach dem Ausschalen wurden die Prismen bis zur Behandlung mit (sc)$CO_2$ im Alter von 14 d stufenweise getrocknet. Die Proben wurden kontinuierlich sowohl mit gasförmigen $CO_2$ (50 bar / 20 °C) als auch mit sc$CO_2$ (150 bar / 50 °C) über einen Zeitraum von 4 h beaufschlagt. Ein Teil der Proben wurde nach der Carbonatisierung für weitere 14 d unter Wasser gelagert. Zudem wurden ausgewählte Proben mit sc$CO_2$ durch wiederholten Druckaufbau und -abbau zyklisch carbonatisiert.

Zu den physikalischen und mechanischen Untersuchungen zählten neben der Festigkeitsprüfung die Ermittlung der Rohdichte, der Porosität und der Porengrößenverteilung. Zudem wurde die Carbonatisierungstiefe bestimmt sowie TGA- und XRD-Messungen zur Phasenanalyse durchgeführt. Einzelne Proben wurden mittels Feststoffkörper-NMR-Spektroskopie und REM-EDX untersucht.

**Ergebnisse**

Proben mit Zement SR waren gegenüber Proben mit Zement $C_3A$ infolge der $CO_2$-Behandlung stärker carbonatisiert (pH-Wert < 9). Entsprechend waren der Festigkeitszuwachs und die absoluten Festigkeiten des SR-Zementes höher. Es wurde dabei ein Festigkeitsanstieg von bis zu 270 % gegenüber den 14 d alten Referenzproben verzeichnet (siehe Abbildung 1). Vor allem nach der Carbonatisierung mit sc$CO_2$ nahmen die Druckfestigkeiten signifikant zu und überstiegen sogar deutlich die Normfestigkeiten nach DIN EN 196-1. Grund für die signifikante Festigkeitszunahme war eine deutliche Verdichtung des Gefüges. So wiesen die carbonatisierten Proben, v.a. nach Behandlung mit sc$CO_2$, eine deutlich reduzierte Porosität gegenüber den Referenzproben auf. Mittels XRD konnte der Verbrauch von $C_3S$, $C_2S$ und Portlandit sowie eine deutliche Reduzierung des röntgenamorphen Anteils aufgrund der Carbonatisierung von C-S-H-Phasen nachgewiesen werden. Zudem wurden alle drei $CaCO_3$-Modifikationen identifiziert, von welchen Calcit mengenmäßig am stärksten vertreten war. Mittels TGA wurden zusätzlich amorphes $CaCO_3$ und während der weiteren Wasserlagerung neu gebildete C-S-H-Phasen nachgewiesen. Durch die Bildung neuer Hydratphasen nahm die Festigkeit der Probekörper weiter zu. Besonders deutlich

war der Festigkeitsanstieg bei Prismen, die mit gasförmigen $CO_2$ behandelt worden waren und vermehrt unhydratisierte Calciumsilikate im Zementstein aufwiesen.

Die Substitution von Zement durch Kalksteinmehl führte nur zu einer marginalen Porositätsänderung und Festigkeitszunahme gegenüber den Referenzproben. Durch die zyklische Behandlung konnten die Festigkeiten weiter gesteigert werden, allerdings war der Effekt nicht sehr groß.

Durch die gezielte Beaufschlagung von Mörtel- und Zementsteinproben mit $CO_2$ konnten bekannte Effekte, wie eine Abnahme der Gesamtporosität, Zunahme der Rohdichte durch die Bildung von $CaCO_3$ und daraus resultierende, teilweise signifikante Festigkeitsbeiträge erneut bestätigt werden. Der höhere $C_3A$-Gehalt des Zementes zeigte einen negativen Einfluss auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit und die Festigkeiten der carbonatisierten Proben.

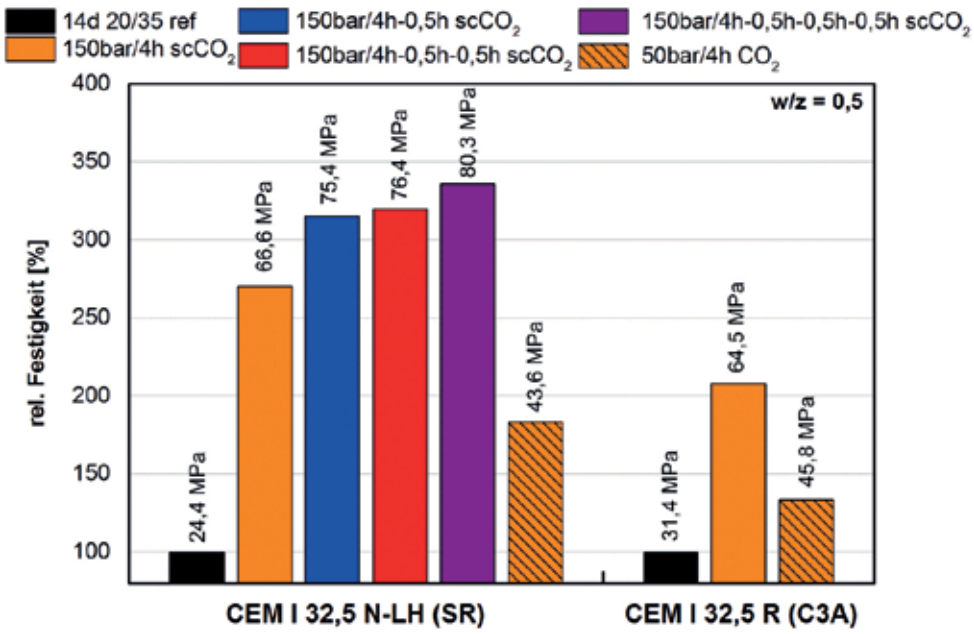



Abbildung 1: Relative Druckfestigkeiten der Mörtelproben mit Zementen SR und $C_3A$.

Es sind weitere Untersuchungen nötig, um weitere Einflüsse der Zementzusammensetzung, der Auswirkungen der zyklischen Carbonatisierung und auch von Kalksteinmehl als Zusatzstoff auf carbonatisierte Proben abschließend beurteilen zu können. Explizit sollten die Reaktionen von $C_3A$ bzw. Aluminatphasen mit $CO_2$ und die Einbindung freigesetzter Aluminium-Ionen in neue Strukturen näher beleuchtet werden. Hinsichtlich der zyklischen Carbonatisierung bietet es sich an, die Probekörper zwischen den Carbonatisierungsperioden gezielt zu trocknen, um somit die Porengängigkeit des $CO_2$ zu fördern und deutlichere Effekte zu erzielen.

Die $CO_2$-Behandlung könnte eine Anwendung bei der Herstellung von z.B. zementgebundenen, porösen Leichtbauteilen (Leichtbauplatten, Holzbeton etc.) finden. Solche Baustoffe würden ein hohes Rohdichte-Festigkeits-Verhältnis aufweisen, kein Carbonatisierungsschwinden zeigen und resistent gegen Sulfatangriff und andere chemische Angriffe im basischen Bereich sein.

## AG Betontechnologie

### 4.2.3. Verlauf des Phasenbestands und der Carbonatisierungsfront zementgebundener Baustoffe unter verschiedener $CO_2$-Beaufschlagung

Masterarbeit von Simon Rumplmayr
Betreuung: Dipl.-Ing. C. Thiel

Vorhersagemodelle dienen zur Berechnung des Carbonatisierungsfortschritts in zementgebundenen Baustoffen und damit zur Planbarkeit von Instandhaltungsmaßnahmen. Erhöhte $CO_2$-Konzentrationen bewirken eine Beschleunigung der Carbonatisierung. Dadurch kann in Schnellprüfverfahren der Schnellcarbonatisierungskoeffizient als Eingangsparameter für die Modellberechnung in kurzer Zeit ermittelt werden. Allerdings liegt die tatsächliche Beschleunigung deutlich unterhalb der theoretisch berechneten, weshalb Untersuchungen zum Einfluss beschleunigter Bedingungen auf zementgebundene Baustoffe notwendig sind. Im Literaturteil der Abschlussarbeit wurden veröffentlichte Forschungsergebnisse zum Einfluss von erhöhten $CO_2$-Konzentrationen vorgestellt. Im praktischen Teil wurden zementgebundene Baustoffe mit natürlicher als auch mit $CO_2$-Konzentrationen von 0,05, 1, 2, 4 und 10 Vol.-% beaufschlagt. Die Untersuchungen ergaben, dass Schnellprüfverfahren zu stärkeren Veränderungen der chemisch-mineralogischen Eigenschaften sowie der Gefüge- und Transporteigenschaften führen als die natürliche $CO_2$-Konzentration. Mit zunehmender $CO_2$-Konzentration kam es zu stärkeren Veränderungen des Porengefüges, der Mikrostruktur und des Phasenbestands. Bei Proben mit Hochofenzement führten $CO_2$-Konzentrationen ≥ 4 Vol.-% zu den stärksten Veränderungen und werden für Schnellprüfverfahren daher nicht empfohlen.

### 4.2.4. Einfluss von $CO_2$-Druck auf die Carbonatisierung von Beton

Masterarbeit von Elke Ziehensack
Betreuung: Dipl.-Ing. C. Thiel

Bei Anwesenheit von Kohlendioxid und Feuchtigkeit reagiert das Portlandit im Beton zu Kalkstein. Diese Reaktion führt zum Verlust des alkalischen Milieus im Beton und damit zur Depassivierung der Bewehrung, die nun korrodieren kann. Daher ist die Kenntnis der Carbonatisierungsgeschwindigkeit im Beton unerlässlich, um die Dauerhaftigkeit einer Stahlbetonkonstruktion zuverlässig prognostizieren zu können. Diese hängt maßgeblich vom Carbonatisierungswiderstand des Betons ab. Um diesen Widerstand bestimmen zu können, werden sogenannte Schnelltests mit hohen (praxisfremden) $CO_2$-Konzentrationen durchgeführt. Unklar ist bisher, ob diese hohen Konzentrationen die natürlichen Vorgänge unverfälscht abbilden und Fehlprognosen ausgeschlossen werden können. Um zukünftige, zeitraffende Verfahren mit höherer Zuverlässigkeit zu entwickeln, ist es notwendig, das Wissen über die Mechanismen der Carbonatisierung zu vertiefen. Dabei ist der Einfluss von $CO_2$-Partialdruck bei Gasdrücken über 1 bar auf das Porengefüge und den Gastransport von zentraler Bedeutung.

In dieser Masterarbeit wurde der Einfluss verschiedene Randbedingungen auf die Geschwindigkeit der Carbonatisierung des Betons analysiert. Diese waren die relative Luftfeuchtigkeit während der Vorlagerung sowie während der $CO_2$-Beaufschlagung, die $CO_2$-Konzentration und der Gasüberdruck. Dazu wurden zunächst Versuche bei Atmosphärendruck, mit verschiedenen $CO_2$-Konzentrationen sowie bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchtigkeiten während der Vorlagerung und während der CO2-Beaufschlagung durchgeführt. Dabei wurden die $CO_2$-Konzentrationen von 2 und 10 Vol.-% sowie die rela-

tiven Luftfeuchtigkeiten von 35, 50, 65, 76 und 92% verwendet. Zudem wurden Versuche bei Gasüberdrücken von 1 und 5 bar und unter sonst denselben Versuchsbedingungen vergleichend dazu durchgeführt. Die Auswertung erfolgte anhand des Carbonatisierungsverlaufs, des Feuchtigkeitsprofils, der Porosität und des Phasenbestands der Proben.

Die Feuchtigkeit in den Proben hatte einen signifikanten Einfluss auf die Carbonatisierung. Bei sehr hohen oder sehr niedrigen Feuchtigkeiten wird der Fortschritt der Carbonatisierung stark behindert. Die verwendeten $CO_2$-Konzentrationen hatten ebenfalls einen Einfluss auf das Carbonatisierungsverhalten. Mit der höheren $CO_2$-Konzentration von 10 Vol.-% ergaben sich höhere Carbonatisierungstiefen. Allerdings wurde hierbei sehr viel mehr Wasser infolge der Reaktionen freigesetzt. Das Aufbringen eines Gasdrucks hat ebenso einen Einfluss auf die Carbonatisierung. Zudem beeinflusst der Druckauf- bzw. -abbau die Feuchtigkeit in den Proben in einem hohen Maße.

## AG Stahl und Korrosion

### 4.2.5. Korrosionsmonitoring gerissener Stahlbetonbauteile

Masterarbeit von Franziska Achatz
Betreuung: Florian Hiemer, M.Sc.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung, ob bei einer nachträglichen Instandsetzung gerissener Stahlbetonbauteile, durch das Aufbringen eines Oberflächenschutzsystems, standsicherheitsrelevante Korrosion der Bewehrung dauerhaft verhindert bzw. bereits initiierte Korrosion zum Erliegen gebracht werden kann.

Für diesen Zweck wurden in zwei instandzusetzenden Parkbauwerken im Münchner Raum insgesamt 61 Korrosionsmonitoringsysteme installiert. Mit diesen Systemen war es möglich, die relevanten elektrochemischen Kenngrößen der Korrosion zu erfassen.

Die Erfassung der Messdaten erstreckte sich dabei maßgeblich über den Zeitraum vor der Instandsetzungsmaßnahme, so dass die Ergebnisse in erster Linie der Beschreibung der Korrosionsvorgänge ohne Beschichtung dienen. Für eine Bewertung der Wirksamkeit der Instandsetzungsmaßnahme wird es nötig sein, die Datenerfassung an einer ausreichenden Anzahl von beschichteten Messstellen über einen längeren Zeitraum nach der Beschichtungsmaßnahme weiterzuführen. Es konnte jedoch eine umfangreiche Datengrundlage geschaffen werden, die eine Bewertung der geplanten Messungen nach der Beschichtungsmaßnahme ermöglicht.

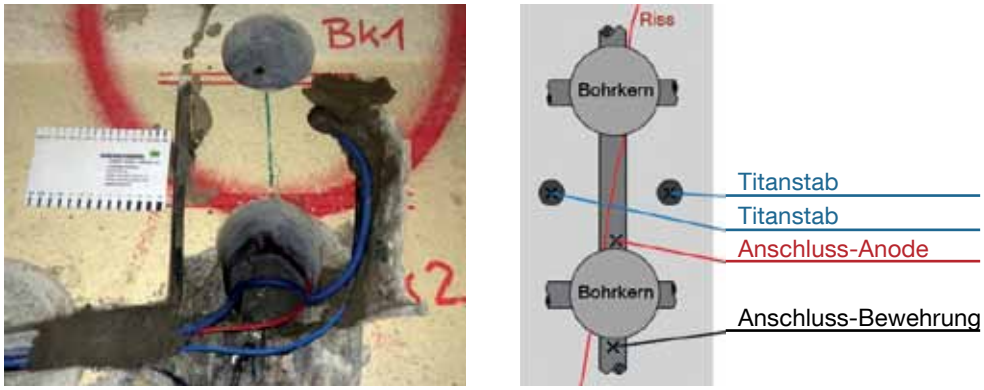



Abbildung:
Installierter Korrosionssensor und Skizze zum Messaufbau

Weiterhin konnten einige Sachverhalte, die bereits bei Laborversuchen zu ähnlichen Zwecken festgestellt wurden, auch an den Praxisbauwerken nachgewiesen werden. Neben den Potentialveränderungen infolge äußerer Einflüsse waren dabei insbesondere die Vorgänge bei einer Korrosionsinitiierung und bei dem zum Erliegen kommen einer aktiven Makroelementkorrosion von Interesse. Insgesamt hat sich gezeigt, dass eine Verknüpfung von Labor- und Praxiserfahrungen in diesem Bereich möglich sein kann. Abschließend war es möglich, anhand der gewonnenen Daten das Monitoringsystem zu beurteilen, dessen Grenzen zu beschreiben und mögliche Verbesserungsvorschläge auszuarbeiten.

### 4.2.6. Bewertung der Dauerhaftigkeit von Stahlbeton unter dem kombinierten Angriff von Drucklast und Chloriden

Masterarbeit von Philipp Krawielitzki
Betreuung: Dr.-Ing. Sylvia Keßler; Manuel Raith, M.Sc.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Versuchsaufbaus zur Betrachtung der Wechselwirkung zwischen mechanischer Beanspruchung und der dadurch resultierenden Deformation mit umweltinduzierten Transport-, Reaktions- und Degradationsprozessen resultierend aus Chlorideintrag. Aufbauend auf den Ergebnissen der Versuche werden die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken unter dem kombinierten Angriff von Drucklast und Chloriden bewertet. Hierfür wurden 20 unbewehrte Betonprobekörper hergestellt und an neun Probekörpern ein kombinierter Angriff simuliert. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Auswirkung der unterschiedlichen Drucklasten auf das Porengefüge im Beton. Hierfür wurden unterschiedliche zerstörungsfreie Prüfmethoden auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht, mit denen es möglich ist, das Gefüge eines zementgebundenen Baustoffs wie Beton unter Drucklast zu charakterisieren.

Neben der Definition von Drucklevel, ab deren Werte mit einer Veränderung der Porosität durch Bildung von Mikrorissen zu rechnen ist, wird überprüft, inwieweit die vorhandenen Bemessungsregeln zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken unter Betrachtung isolierter Umwelteinwirkungen, gegenüber den Folgen eines kombinierten Angriffs aus Drucklast und Chlorideintrag robust sind oder modifiziert bzw. erweitert werden müssen.

Die Versuche orientieren sich an einem praxisnahen Beispiel einer Brückenstütze. Diese steht unter dauerhafter Belastung durch das Eigengewicht des Überbaus. Durch Einsatz von Streusalz im Winter kommt es zusätzlich zu einer Chloridbeanspruchung der Bauteile und somit zu einer Korrosionsgefahr der Bewehrung.

Die hier untersuchte Versuchsreihe ist Teil eines weltweiten RILEM- Ringversuchs. Für mehr Hintergrundinformationen sei auf www.rilem.cn verwiesen.

### 4.2.7. Entwicklung eines praxistauglichen Prüfverfahrens zur Abschätzung der Festigkeit von luftgetrockneten Lehmsteinen

Masterarbeit von Christoph Werner
Betreuung: Dr.-Ing. Sylvia Keßler; Dipl.-Ing. Martin Gräfe (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion)

Die Abschlussarbeit beschäftigt sich mit der Suche nach einem praxistauglichen Verfahren, anhand dessen die Druckfestigkeit von luftgetrockneten Lehmsteinen abgeschätzt werden kann.

Es wird der Frage nachgegangen, durch welche Faktoren die Festigkeit von Lehmen beeinflusst wird und wie diese bei der Produktion von luftgetrockneten, handgeschlagenen Lehmsteinen gezielt eingesetzt und überprüft werden können. Die Druckfestigkeit von Lehmsteinen ist ohne hydraulische Prüfeinrichtung nicht zu ermitteln, da die Druckfestigkeitsprüfung an afrikanischen Baustellen ohne großen Maschinenaufwand anwendbar gestaltet werden soll. Dazu werden etablierte Prüfverfahren zur Klassifikation der Eigenschaften und Festigkeiten von Lehmen vorgestellt und untersucht. Um ein geeignetes Verfahren bereitstellen zu können, werden neben möglichen Korrelationen auch andere Baubereiche hinsichtlich geeigneter Ersatzverfahren zur Bestimmung von Druckfestigkeiten untersucht. Ziel ist es, eine leicht handhabbare Anleitung für Baustellen in Entwicklungsländern zu erarbeiten, anhand der luftgetrocknete Lehmsteine im Handstrichverfahren mit optimaler Festigkeit produziert und die Druckfestigkeit dieser Steine möglichst genau ermittelt werden kann. Die Fragestellungen werden im ersten Teil der Abschlussarbeit durch Auswertung aktueller Fachliteratur erarbeitet und das gewonnene Wissen im zweiten Teil durch praktische Versuche überprüft und erweitert. Für den Lehmbau relevante Regeln und Normen werden in dieser Arbeit aufgelistet und die wichtigsten Vorgaben für Lehmsteine zusammengefasst. Anhand eines Lehms, der der originalen Zusammensetzung eines Lehmsteins aus Sambia nachempfunden ist, sowie einem zweiten Referenz-Lehm werden die Druckfestigkeit, Vierpunkt-Biegezugfestigkeit und Ausziehkraft nach DIN ermittelt und verglichen. Weiter wird die Druckfestigkeit von zwölf Lehmsteinen mittels eines eigens gebauten, praktisch umsetzbaren Prüfapparats durch ein Biegezugverfahren mit Wasserbelastung ermittelt. Abschließend werden eine Anleitung zum Herstellen von luftgetrockneten Lehmsteinen und des Prüfapparats, sowie eine Hilfe zum Auswerten der Ergebnisse erstellt. Die Anleitung ist in leicht verständlicher englischer Sprache verfasst und zur besseren Handhabung mit Abbildungen versehen.

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 Verfahrens der Biegezugfestigkeit vorzuziehen ist. Die Korrelation der praktisch ermittelten Biegezugfestigkeit benötigt eine Korrektur gegenüber der normativ festgestellten Biegezugfestigkeit.

### 4.2.8. Entwicklung eines einfachen Systems zur groben Schätzung der zu erwartenden Kosten einer Tiefgarageninstandsetzung auf Basis einer Erstbegehung

Masterarbeit von Martin Strohmayr
Betreuung: Dr.-Ing. Sylvia Keßler; Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.Ing. Franz Knab (IB Schießl Gehlen Sodeikat)

Tiefgarageninstandsetzungen können mit hohen Kosten für den Auftraggeber verbunden sein. Es liegt im Interesse des Auftraggebers, diese Kosten möglichst frühzeitig zu kennen. Erfolgt diese Kostenaussage auf Basis einer frühzeitigen unsicheren Abschätzung, wird der Auftraggeber möglicherweise auf diesen Kostenrahmen bestehen. Vor dieser Untersuchung war es möglich, dem Auftraggeber eine Preisspanne von 2.000 € bis 12.000 €

pro Stellplatz anzugeben. Aufgrund der großen Preisspanne von 600% hat eine solche Aussage eine wenig nutzbare Aussagekraft. Die Qualität der Kostenprognose hängt von mehreren Einflussfaktoren ab. In der frühen Phase einer Instandsetzungsplanung liegen dem sachkundigen Planer in der Regel nur begrenzt Hinweise über den Schadensumfang und die Schadensintensität vor, auf die er eine verlässliche Kostenindikation stützen kann. Für die Instandsetzungskosten sind nicht nur der Schadensumfang und die Schadensintensität von Bedeutung, auch Vorstellungen des Bauherrn beeinflussen diese. Das Bau-Soll hängt von mehreren Faktoren ab, z.B. technisch notwendige Maßnahmen, Budget, Vorstellungen des Bauherrn. Eine frühzeitige Anpassung des Bau-Solls führt zu einer frühzeitigen Kenntnis über die zu erwartenden Kosten. Während das Budget und die Vorstellungen des Auftraggebers relativ früh in der Planungsphase feststehen können, ist es meist schwierig, die technisch notwendigen Maßnahmen präzise abzuschätzen. Nach einer durchgeführten Erstbegehung einer Tiefgarage hat der Sachkundige einen Überblick über das Schadensbild des Objekts, die genaue Intensität und der Schadensumfang ist nicht bekannt.

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist, ein Modell abzuleiten, das die Kosten einer zukünftigen Instandsetzungsmaßnahme bereits nach einer überblickverschaffenden Erstbegehung möglichst präzise prognostiziert. Für den Auftraggeber haben die zu erwartenden Instandsetzungskosten großen Einfluss auf die Wahl der Art und des Umfangs der Instandsetzungsmaßnahme. Daher stehen diese von Beginn an im Mittelpunkt der Planung der Instandsetzungsmaßnahme. Auf Basis bereits geplanter und größtenteils auch ausgeführter Instandsetzungsprojekte ist ein solches System erarbeitet worden, das die wichtigen, kostenbeeinflussenden Faktoren identifiziert. Ein Leitfaden unterstützt den Beurteilenden bei der Bewertung des Schadensbildes und einschränkender Randbedingungen mit dem Ziel, einheitlichen Standard zur Qualitätssicherung bei der Erstbegehung und der Kostenschätzung zu setzen.

### 4.2.9. Instandhaltungsstrategie von Stahlbetonbauwerken auf Basis von semi-probabilistischen Schädigungsmodellen – Studie zur Wirtschaftlichkeit

Masterarbeit von Christina Stich
Betreuung: Dr.-Ing. Sylvia Keßler; Dipl.-Ing Gerhard Neumair (MVG)

Das Münchner Nahverkehrsnetz besteht aus einer Vielzahl von Bauwerken, die den Betrieb des öffentlichen Personennahverkehrs ermöglichen. Das zum Teil bereits hohe Alter der Bauwerke und ein begrenztes Budget erfordern ein Erhaltungsmanagement, das Investitionen für Instandhaltungsmaßnahmen wirtschaftlich einsetzt und eine ausreichende Qualität des Verkehrsnetzes sicherstellt. Im Bewusstsein dessen wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Erhaltungsstrategie für Stahlbetonbauwerke entwickelt, die sich mit der Klassifizierung von Bauteilzuständen, entsprechend dem Schädigungsgrad durch Karbonatisierung und Chlorideintrag, beschäftigt. Zur Einteilung der Bauteile in verschiedene Schädigungsstufen wurde vom semi-probabilistischen Verfahren nach dem Entwurf der DAfStb-Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ (Version November 2015) Gebrauch gemacht, um so den zeitlichen Beginn der Bewehrungskorrosion, also die Depassivierung der Bewehrungsoberfläche, zu ermitteln. Des Weiteren wurde zur Unterstützung der Stadtwerke München GmbH (Bauwerkseigentümer) bei der Planung von Instandsetzungen und Inspektionszyklen auf Bauteils- und Bauwerksebene ein „Controlling-System“ realisiert. Ziel der Erhaltungsstrategie ist es, das Bauwerk bzw. einzelne Bauteile zum wirtschaftlichsten Zeitpunkt instand zu setzen.

## AG Chemie

### 4.2.10. Vickers-Härtebestimmung an säuregelagerten Zementsteinproben

Masterarbeit von Elena Löhr
Betreuung: Dr. rer. nat. Harald Hilbig

Die Lebensdauer von Betonbauteilen in Industrie und Landwirtschaft kann durch den lösenden Angriff von aggressiven Medien erheblich reduziert werden. Betonflächen in Kontakt mit Gülle, Silage, Biomasse für die Methanproduktion oder Enteisungsmittelbehältern an Flughäfen können einer Vielzahl von organischen Säuren ausgesetzt werden. Unbeschichtete Kühlturmoberflächen, die sogar einer Exposition über XA3 ausgesetzt werden, Abwasserleitungen, Strukturen für die geothermische Energiegewinnung, Betonpflaster und Industrieanlagen können durch aggressive anorganische Säuren angegriffen werden. Neben hohen Kosten für die Erneuerung oder Instandsetzung ist eine Verkürzung der Lebensdauer mit Hinblick auf die Erhaltung von Ressourcen und die Reduzierung von $CO_2$-Emissionen ökologisch nachteilig.

Mit dem Ziel eines erhöhten Säurewiderstands werden zunehmend Betone mit weniger Portlandzementklinker und aluminiumhaltigen Zusatzstoffen wie Hüttensand, Steinkohlenflugasche oder Metakaolin hergestellt. Der Einfluss der Stoffe auf den Säurewiderstand ist nicht allein durch herkömmliche betontechnologische Kriterien zu verstehen, weil die Eigenschaften der korrodierten Schicht auf der Betonoberfläche – als Schutz vor der angreifenden Säure – maßgebend sind.

Folglich ist der Einfluss aluminiumhaltiger Zusatzstoffe auf die mechanische Festigkeit der korrodierten Schicht und ihre Struktur ein wichtiger Faktor hinsichtlich des Säurewiderstands von Betonbauteilen. Um die Zusammenhänge zu verstehen, wurden zwei Bindemittelmischungen (Portlandzement und Portlandzement + 10 M.-% Metakaolin) untersucht, die 28 Tage entweder in Salz- oder Schwefelsäure bei unterschiedlichen pH-Werten gelagert wurden.

Die säuregelagerte Zementsteinproben wurden auf ihren mechanischen Härteverlust (Vickershärte) mittels der Mikroindentation untersucht und die benutzte Untersuchungsmethode auf ihre Anwendbarkeit bewertet. Des Weiteren wurden vorhandene 29Si-Kernspinresonanzspektroskopie-Ergebnisse mit Aussagen zur Struktur (Vernetzung, Polymerisation, Si-, Al-Einbau) und LA-ICP-MS- Ergebnisse mit Informationen zur Elementverteilungen innerhalb der Proben zur Vervollständigung des Gesamtbildes hinzugezogen. Bei der Auswertung der Vickers-Härteergebnisse zeigt sich, dass die Bindemittelmischung aus Portlandzement + 10 M.-% Metakaolin gegen Salzsäure widerstandsfähiger ist als der reine Portlandzement. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass der optisch erkennbare korrodierte Bereich aus hochkondensierten Silikaten besteht. Jedoch auch im optisch unveränderten Bereich zeigen sich Strukturveränderungen. Bei pH Werten von 3 und 4 führt Aluminium zu strukturellen Änderungen im korrodierten Material, die mit einer Erhöhung der Restfestigkeit korrelieren. Der Schwefelsäureangriff führt bei der Bindemittelmischung Portlandzement/Metakaolin nicht nur zu größeren Korrosionstiefen, sondern auch zu stärkeren Festigkeitsverlusten im optisch unveränderten Kernbereich. Die korrodierten Schichten bestehen aus einer Mischung aus Gips und hochkondensierten Silikaten.
Siehe auch Abschnitt 11.4

## AG Zerstörungsfreie Prüfung

### 4.2.11. Zerstörungsfreie Prüfung von Betonprobekörpern mit Selbstheilungseigenschaften

Masterarbeit von Kathrin Flohr
Betreuung: Fabian Malm, M.Sc.

In Anlehnung an das Projekt „HealCON“ entstand die Masterarbeit von Frau Kathrin Flohr mit dem Thema der zerstörungsfreien Prüfung von Betonprobekörpern mit Selbstheilungseigenschaften Dafür wurden Betonprobekörper (150*150*550 mm) hergestellt. Mittels risskontrollierter 3-Punkt-Biegeprüfungen konnte eine künstliche Risserzeugung durchgeführt werden, worunter die autonome Selbstheilung durch polymerbasierte Heilmittel zerstörungsfrei geprüft und charakterisiert werden konnte. Die Schallemissionsanalyse wurde zum besseren Verständnis der Bruchprozesse zum einen der Probekörper und zum anderen der mit Heilmittel gefüllten Glaskapseln, bei Erstbelastung und im geheilten Zustand während der Wiederbelastung angewandt. Die Rückgewinnung mechanischer Eigenschaften konnte mit Bildkorrelation in Verbindung gebracht werden. Zudem konnte zwischen einem stark elastischen und einem sehr steifen Verhalten zweier unterschiedlicher Heilmittel während der Wiederbelastung unterschieden werden. Die Charakterisierung der Rissformation nach Brucherzeugung und nach Heilung konnte durch die P-Wellen Ersteinsätze der Ultraschall-in-Transmission-Messung und Bildkorrelation ermittelt werden. Ähnliches Verhalten konnte mittels Detektion der R-Wellen festgestellt werden. Die über die Schwingungsanalyse gewonnenen Elastizitätsmoduln der Gesamtstruktur einzelner Probekörper in ihren verschiedenen Zuständen bestätigt die Charakterisierung der Selbstheilungseffizienz. Abschließend konnte mit dieser Arbeit ein hohes Potential der verwendeten ZfP-Methoden für die praktische Umsetzung zur Prüfung der Selbstheilungseffizienz von Bauteilen mit Selbstheilungseigenschaften aufgezeigt werden.

### 4.2.12. Berührungslose Prüfung von Faserverbundwerkstoffen mit Luftultraschall

Masterarbeit von Eugen Guruschkin
Betreuung: Dipl.-Ing. Philipp Jatzlau

Die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung ist heutzutage zu einem weit verbreiteten Werkzeug in der Qualitätskontrolle geworden und in den unterschiedlichsten Ingenieurdisziplinen fest integriert. Insbesondere die Prüfung mit elastischen Wellen spielt hierbei eine entscheidende Rolle, zu dessen wichtigsten Vertreter auch die sogenannte Luftultraschalltechnik gehört. Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der zerstörungs- und berührungsfreien Prüfung von Faserverbundwerkstoffen (FVW) mit Luftultraschall. In diesem Zusammenhang werden CFK-Probekörper aus der Luftfahrt- und Automobilbranche – mit künstlich eingebrachten Beschädigungen – näher untersucht. Die Arbeit wurde in Kooperation mit der Siemens AG durchgeführt.

Es erfolgt eine Einführung in die theoretischen Grundlagen der (Luft-)Ultraschalltechnik und es wird ein Einblick in die wichtigsten Eigenschaften von FVW geboten bzw. mögliche Fehlerarten diskutiert. Im Rahmen der Untersuchungen werden Impactschäden, sowie Porositätsproben mit dem kommerziell erhältlichen Luftultraschallsystem USPC AirTech 4000 charakterisiert. Einen wichtigen Punkt stellt hierbei die systematische Betrachtung und Analyse der mit der Luftultraschalltechnik verbundenen Herausforderungen dar. Hierzu zählen Beugungs- sowie Interferenzeffekte, die das Messergebnis einer Transmissionsprüfung maßgeblich beeinflussen können. Letztere führen dazu, dass das „-6-dB-Verfahren“

nicht für die Klassifizierung einer Schadensfläche herangezogen werden kann, sodass in diesem Zusammenhang ein geeigneteres Schwellwertverfahren vorgestellt wird. Im Hinblick auf Messgenauigkeiten wird der Einfluss der Probenpositionierung aufgedeckt. Neben der luftgekoppelten Ultraschallprüfung in Transmission werden Impactschäden auch in der einseitigen Prüfanordnung untersucht, sowie die dabei auftretenden Effekte erörtert.

Die Untersuchungen mit dem rein piezobasierendem System stellen eine Grundlage für den Kernpunkt dieser Masterarbeit dar. Dazu wird in einem Kooperationsprojekt ein neuartiges Messsystem, das auf Grundlage eines optischen Mikrofons arbeitet, aufgebaut und erstmals für den Einsatz im Bereich der ZfP erprobt. Konventionelle Empfangsprüfköpfe, die auf piezoelektrischer Basis arbeiten, werden durch das optisches Mikrofon ersetzt, was deutliche Vorteile im Bereich der berührungslosen Werkstoffprüfung aufweist. Es wird gezeigt, dass insbesondere die Sensorpositionierung einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis hat und dass mit dem neuen System eine deutliche Verbesserung der Empfangsqualität erzielt werden kann, sodass teils Strukturen aufgelöst werden können, was mit dem AirTech-System nicht möglich ist. Im Zuge der Untersuchungen wird darüber hinaus eine einseitige Prüfkonfigurationen (Reflexionsanordnung) näher betrachtet, die jedoch aufgrund des derzeitigen technischen Standards der Luftultraschall-Sendeprüfköpfe keine Prüfung zulässt. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen letztendlich eine Grundlage für weiterführende Arbeiten darstellen.

Abbildung: Luftultraschall an CFK-Probe

### 4.2.13. Entwicklung eines Algorithmus zur Messdatenreduzierung bei der Streifenlichtprojektion an Blisk-Laufrädern

Masterarbeit von Anne Jooß
Betreuung: Dipl.-Ing. Philipp Jatzlau

Diese Arbeit thematisiert die Oberflächenerfassung einer Blisk (Blade Integrated Disk) durch Triangulation mit Hilfe einer Streifenlichtprojektion und wurde in Kooperation mit der MTU Aero Engines AG durchgeführt. Dabei werden die Messdaten aus unterschiedlichen Perspektiven über Transformationen zu einem einheitlichen 3D-Modell zusammengesetzt. Die Roboterpositionen des Messprogramms werden durch manuelles Teaching erstellt. Da-

durch können überbestimmte Teilmessungen vorhanden sein. Diese erhöhen die Zeiten zur Durchführung der Messung und zur Berechnung des Oberflächennetzes, dem sogenannten Polygonisieren.

Die redundanten Messungen gilt es deshalb anhand eines Algorithmus zu detektieren und anschließend zu entfernen, um den Messprozess zu beschleunigen. Die Genauigkeit des Gesamtergebnisses darf sich dabei ausschließlich innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen verändern. Um überflüssige Teilmessungen erkennen zu können, wird die Punktewolke einer Messung analysiert. Eine redundante Messung zeichnet sich dadurch aus, dass in einem gewissen Abstand für jeden Punkt ein Referenzpunkt aus den anderen Messungen gefunden werden kann. Dieser Abstand ist abhängig von der Krümmung der Oberfläche. Zusätzlich dazu wird eine geeignete Kombination der einzeln redundanten Messungen, unter Berücksichtigung der Überlappungen, berechnet und anschließend entfernt. Zuletzt wird die Genauigkeit des reduzierten Oberflächennetzes anhand eines Falschfarbenvergleiches, der Anzahl der Löcher und dem Vergleich ausgewählter Maße untersucht.

In der vorliegenden Arbeit werden sieben Varianten zur Messdatenreduzierung der Oberflächenerfassung einer Blisk vorgestellt. Dabei werden bis zu 599 von 1 298 Teilmessungen als redundant detektiert. Die Zeit zur vollständigen Digitalisierung kann dadurch um 74% und die Zeit zur Berechnung des Oberflächennetzes um 81% gesenkt werden. Die Genauigkeit des Gesamtergebnisses bleibt dabei innerhalb der gewählten Toleranzgrenzen. Außerdem wird im Zuge der Messdatenreduzierung beobachtet, dass es zu Abweichungen bei mehrmaligem Polygonisieren gleicher Messdaten kommen kann. Der entworfene Algorithmus dieser Arbeit kann allgemein auf Messdaten zur Oberflächenerfassung mithilfe einer Streifenlichtprojektion angewendet werden. Er bietet somit erstmals die Möglichkeit, manuell erstellte Messprogramme automatisiert zu optimieren und folglich den Messablauf zu beschleunigen und die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zu steigern.

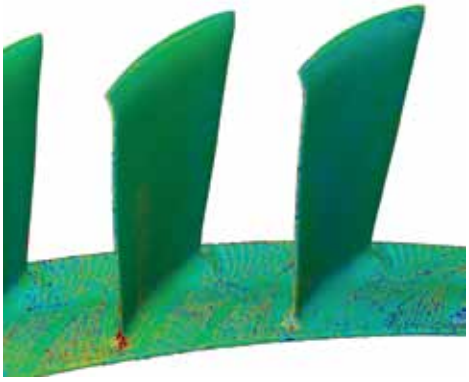


Abbildung: Digitale Darstellung der Blisk mittels Streifenlichtprojektion

### 4.2.14. Non-Destructive Testing and Simulation of Mortar Prisms with Self-Healing Properties

Masterarbeit von Gergana Maznikova
Betreuung: Fabian Malm, M.Sc.

In Anlehnung an das Projekt „healCON“ entstand die Masterarbeit von Frau Gergana Maznikova mit dem Thema der zerstörungsfreien Prüfung von Betonprobekörpern mit Selbstheilungseigenschaften. Dafür wurden Betonprobekörper (150*150*550 mm) hergestellt. Mittels risskontrollierter 3-Punkt-Biegeprüfungen konnte eine künstliche Risserzeugung durchgeführt werden, worunter die autonome Selbstheilung durch polymerbasierte Heilmittel zerstörungsfrei geprüft und charakterisiert werden konnte. Die Schallemissionsanalyse wurde zum besseren Verständnis der Bruchprozesse zum einen der Probekörper und zum anderen der mit Heilmittel gefüllten Glaskapseln, bei Erstbelastung und im geheilten Zustand während der Wiederbelastung angewandt. Die Rückgewinnung mechanischer Ei-

genschaften konnte mit Bildkorrelation in Verbindung gebracht werden. Zudem konnte zwischen einem stark elastischen und einem sehr steifen Verhalten zweier unterschiedlicher Heilmittel während der Wiederbelastung unterschieden werden. Die Charakterisierung der Rissformation nach Brucherzeugung und nach Heilung konnte durch die P-Wellen Ersteinsätze der Ultraschall-in-Transmission-Messung und Bildkorrelation ermittelt werden. Ähnliches Verhalten konnte mittels Detektion der R-Wellen festgestellt werden. Die über die Schwingungsanalyse gewonnenen Elastizitätsmoduln der Gesamtstruktur einzelner Probekörper in ihren verschiedenen Zuständen bestätigt die Charakterisierung der Selbstheilungseffizienz. Abschließend konnte mit dieser Arbeit ein hohes Potential der verwendeten ZfP-Methoden für die praktische Umsetzung zur Prüfung der Selbstheilungseffizienz von Bauteilen mit Selbstheilungseigenschaften aufgezeigt werden.

### 4.2.15. Experimentelle Untersuchung des nicht-linearen Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens zementgebundener Werkstoffe mit Ultraschall

Masterarbeit von Maximilian Müller
Betreuung: Fabian Malm, M.Sc.

Die Masterarbeit von Herrn Maximilian Müller beschäftigt sich mit der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung von Frischbeton bzw. Frischmörtel durch Ultraschallmessungen (US). Das Ziel ist, Methoden zu entwickeln, den betontechnologischen Verlauf der Erstarrung und Erhärtung von Zement – als Hydratation bezeichnet – über das Alter der Probe qualitativ und dauerhaft beschreiben zu können. Außerdem soll so eine Möglichkeit geschaffen werden, verschiedene baupraxisrelevante Materialien – Beton, Mörtel und Zement – untereinander anhand von Charakteristiken vergleichen und zueinander gegenüberstellen zu können. Aus den US-Signalen werden diesbezüglich die Parameter Wellengeschwindigkeit und das Amplitudenspektrum analysiert werden, um Rückschlüsse auf die Werkstofftechnologie des Betons bzw. Mörtels schließen zu können.

Des Weiteren werden vergleichend zu den US-Experimenten noch Messungen der in Deutschland genormten Prüfverfahren zur Beschreibung der Frischbeton bzw. Frischmörteleigenschaften durchgeführt. Hierbei werden speziell auf die Bestimmung des Erstarrungsanfangs und des Erstarrungsendes von Zementpaste (Eindringversuch nach Vicat), auf das Durchführen von Druckfestigkeitsprüfungen und auf Wärmeflussmessungen während der Zementhydratation (Kalorimetrie) eingegangen. Zudem sollen ebenfalls Ergebnisse von alternativen Versuchsmethoden wie der Dunkelfeldmessung, die ebenfalls den Fortschritt der Zementhydratation darstellt, als Vergleichsgrundlage genutzt werden. Zur Beschreibung des Erhärtungsverlaufs wird dann eine mathematische Ausgleichsrechnung benutzt werden, um die einzelnen Proben untereinander mithilfe von Funktionsparametern vergleichen und gegebenenfalls Auffälligkeiten charakterisieren zu können.

### 4.2.16. Experimentelle Impakt-, Ondulations- und Porositätscharakterisierung an CFK-Probekörpern mittels zerstörungsfreier Prüfmethoden

Masterarbeit von Raphael Setz
Betreuung: Dipl.-Ing. Philipp Jatzlau

Um die Effizienz von Flug- und Fahrzeugen noch weiter zu steigern ist der Einsatz von CFK als Leichtbaumaterial mittlerweile unverzichtbar. Um nicht nur die Sicherheit der Bauteile zu erhöhen, sondern auch das Leichtbaupotential weiter auszureizen, werden zerstörungsfreie Prüfmethoden eingesetzt. Dies geschieht bereits bei der Fertigung der Bauteile, um sogenannte Produktionsschäden wie Porosität, Ondulationen und Delaminationen zu detektieren.

Das Ziel dieser Arbeit war, im Rahmen der Ringversuche des MAlzfp-Projekts, verschiedene zerstörungsfreie Prüfverfahren im Hinblick auf die Erfassung und Quantifizierung solcher Schäden zu bewerten. Hierzu wurden zahlreiche Porositäts-, Ondulations- und Impakt-Prüfkörper mit künstlich eingebrachten Schäden mit Ultraschall, Lock-In- und Blitz-Thermographie untersucht. Eine weitere Probenreihe stellten drei Blindproben dar, bei denen keine Information zur Schädigung vorliegt. Zur Auswertungen der Prüfdaten wurden Methoden entwickelt, die möglichst unabhängig vom Einfluss eines Prüfers arbeiten und die Schäden zuverlässig erkennen.

Aus den Messungen mit Ultraschall und Lock-In-Thermographie wurden die Schadensflächen der Impaktproben ermittelt und verglichen. Anhand der relativen Signaldämpfung bei der Ultraschallprüfung und der thermischen Diffusivität, die aus der Blitz-Thermographieprüfung berechnet wird, wurden die Porositätsproben miteinander verglichen. Die Ondulationsproben wurden mit Ultraschall untersucht, die Daten wurden aufgrund von Problemen mit der Prüftechnik jedoch nicht ausgewertet. Die Blindproben wurden sowohl mit Ultraschall als auch mit Lock-In-Thermographie geprüft und die damit erkannten Schäden quantifiziert.

### 4.2.17. Experimentelle Modalanalyse von Schienenbefestigungssystemen zur Untersuchung von Resonanz als mögliche Schadensursache

Masterarbeit von Erik Weirather
Betreuung: Dipl.-Geophys. Robin Groschup

Sicherheit steht speziell in der Personenbeförderung an allererster Stelle. Sie kann nur gewährleistet werden, wenn alle Komponenten eines Systems einwandfrei funktionieren und durch die üblichen Belastungen nicht vorzeitig versagen. Ein sehr wichtiges Bauteil im Schienenverkehr sind die Spannklemmen, welche die Schiene in ihrer Position halten sollen.

Diese Masterarbeit befasst sich mit der Modalanalyse zweier verschiedener Spannklemmen, die im Eisenbahnbau zur Befestigung der Schienen zur Anwendung kommen. Hintergrund der Arbeit ist die Fragestellung, ob sich durch dynamische Anregungen im Betrieb Schäden an den Spannklemmen infolge von Resonanzeffekten ausbilden können.
Die Modalanalyse wurde mit Hilfe zweier verschiedener Messtechniken durchgeführt: zum einen mit kontaktgebundener Sensortechnik und zum anderen mit einer berührungslosen Messung mittels Laservibrometer. Die Spannklemmen wurden sowohl im freien Zustand wie auch im eingebauten Zustand untersucht. Als Anregungsquelle wurde ein Impulshammer verwendet.

Die Ergebnisse beider verwendeter Messtechniken sind sich sehr ähnlich und zeigen, dass die ermittelten Eigenfrequenzen im selben Bereich liegen wie Erregerfrequenzen, die im Schienenverkehr auftreten, und diese somit einen Beitrag bei Ermüdungserscheinungen an Spannklemmen leisten können.

## 4.3. Workshop Baustofferzeugende Industrien

Der jährlich vom Lehrstuhl Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen für Masterstudenten des Bauingenieurwesens angebotene „Workshop Baustofferzeugende Industrien“ fand im Jahr 2015 an vier Tagen im Mai statt. Ziel des Workshops ist es, den Studierenden einen Einblick in die Produktionsstätten der Materialien zu geben, mit denen sie im täglichen Geschäft des Bauingenieurs in Kontakt kommen. Folglich brachen 28 hochmotivierte Studierende unter Betreuung von Daniel Weger, M.Sc. (siehe Abb. 1) auf, um folgende Ziele zu besuchen:

Tag 1: Donnerstag, 21. Mai 2015
Fertigteilwerk Max Bögl in Sengenthal
Tag 2: Dienstag, 26. Mai 2015
Maschinenproduktion der BAUER Gruppe in Schrobenhausen
Tag 3: Mittwoch, 27. Mai 2015
Kalksteinproduktion der Kalksandsteinwerke Südbayern in Friedberg-Derching
Ziegelproduktion der Hörl & Hartmann Ziegeltechnik in Dachau
Tag 4: Donnerstag, 28. Mai 2015
Fertigungsanlage und Forschungszentrum der BASF Construction Solutions GmbH in Trostberg
Zementproduktion der Südbayerischen Portland-Zementwerke in Rohrdorf

Abbildung 1:
Gruppenbild beim Besuch des Fertigteilwerks von Max Bögl

Die Studierenden bekamen die Aufgabe, die einzelnen Stationen in Berichten festzuhalten. Als Repräsentant der allesamt schön gestalteten und gelungenen Berichte wird nachfolgend die leicht gekürzte Version eines dieser Berichte angefügt.

## BASF Construction Solutions GMBH in Trostberg

Bericht von Regina Gerg, Alexander Wiendl und Markus Witzgall

### Die Fahrt beginnt…

Schon längst besteht Beton nicht mehr nur aus den Komponenten Zement, Wasser und Gesteinskörnung. Die Ansprüche an Druckfestigkeit, Dauerhaftigkeit und Ästhetik des Festbetons sowie an die Verarbeitbarkeit des Frischbetons lassen sich kaum noch alleine mit diesen drei Komponenten erfüllen. Zur Umsetzung dieser Anforderungen werden häufig Betonzusatzmittel verwendet.

Mit dieser Thematik setzte sich unsere 28-köpfige Studentengruppe am vierten und letzten Exkursionstag des Workshops Baustofferzeugende Industrien auseinander.

Das Ziel war der Chemiestandort Trostberg, der Teil des Chemiedreiecks im südöstlichen Oberbayern ist. Während der Fahrt erhielten wir von einem Kommilitonen eine kurze Einführung zum angesteuerten Unternehmen, der BASF. […]

### Werksführung

Nach dem gemeinsamen Rundgang durch das F&E-Kompetenzzentrum (siehe Abb. 2) wurde der Kurs in zwei Gruppen geteilt. Die eine bekam eine Führung durch die Labore, während die andere die Produktionsanlagen besichtigte. Anschließend erfolgte ein Wechsel.

Für die Werksführung musste eine Sicherheitsausrüstung, bestehend aus Warnweste, Helm, Schutzbrille und langärmliger Oberbekleidung, getragen werden.

Zu Beginn informierte uns Maria Ferriz im Technikraum des Produktionsgeländes über die Geschichte der Süddeutsche Kalkstickstoff-Werke AG, kurz SKW AG. Die SKW AG entstand aus der Bayerische Stickstoffwerke AG und der Bayerische Kraftwerke AG. Der Standort Trostberg war für die Unternehmensgründung der Bayerische Stickstoffwerke AG

Abbildung 2:
Das BASF F&E-Kompetenzzentrum in Trostberg (Architektur: raupach architekten, Fotograf: Jens Weber)

kein Zufall. Für die energieintensive Kalkstickstoff-Produktion bot die Nähe zur Alz und deren Nutzung für die Stromproduktion durch die Wasserkraft einen wesentlichen Standortvorteil. Mit der Entwicklung eines modifizierten Melaminharzes als Verflüssiger für zement- und gipsbasierte Produkte begann das Geschäft mit Baupolymeren. Dieses Produkt wurde ab 1968 unter dem Namen Melment vermarktet. Danach entwickelte sich die SKW AG in Trostberg zu einem Zentrum bauchemischer Forschung und Entwicklung. Im Jahr 2001 wurde die SKW AG mit der Degussa AG verschmolzen und 2006 akquirierte die BASF AG die Bauchemiesparte der Degussa AG. Mittlerweile arbeiten circa 400 Mitarbeiter am Chemiestandort Trostberg, von denen etwa 100 in der Produktion tätig sind.

Nach dieser allgemeinen Einführung machten wir uns auf den Weg in den Steuerstand für die Produktionsanlage. Dort erklärte uns Frau Ferriz die Herstellung der Produkte. Hierfür kommen grundsätzlich drei verschiedene Reaktionen in Frage: Radikalische Oxidationen, Kondensationen und Fällungen. Die Kondensation findet beispielsweise bei den aus Melamin hergestellten Super-Plasticizern Anwendung. Die Reaktionen der Flüssigrohstoffe finden entweder in einem Batch-Reaktor oder einem Semibatch-Reaktor bei Temperaturen von über 200 °C und einem Druck von bis zu 3 bar statt. Für die Produktion stehen vier Reaktoren und zehn Hilfsbehälter für Starter- und Hilfslösungen zur Verfügung. Die vier Reaktoren haben dabei ein Volumen von jeweils 6, 9, 11 und 20 $m^3$. Im Werk werden alle Vorgänge mit der Software WOLF aufgezeichnet, die vor allem für die Transportlogistik entwickelt wurde. Sie kennt die Rezepturen der Produkte und stellt die Ansätze automatisch her. Nach Abschluss der Reaktion erfolgt eine Qualitätskontrolle. Fällt diese positiv aus, wird das fertige Produkt in Tanks zwischengelagert. Es gibt unterirdische und oberirdische Lagertanks, wobei die unterirdischen sicherer sind. Wegen der problematischen Wartung werden jedoch oberirdische bevorzugt. Lagertanks müssen gesäubert werden, wenn ein anderes Produkt gelagert wird. Erfolgt eine fortgesetzte Lagerung des gleichen Produkts, ist keine Reinigung nötig. Wegen des verminderten Aufwandes ist dies das Ziel der BASF.

Für die Pulverproduktion verfügt die BASF über Walzen- und Sprühtrockner, die wir in einer benachbarten Halle besichtigten. In Sprühtrocknern wird das viskose Material durch eine Düse geleitet, wo es durch Heißluft zu Pulver getrocknet wird. Je kleiner die Tropfen sind, desto feiner wird das Pulver. Das Ausgangsmaterial darf dabei nur eine niedrige Viskosität haben. Bei Walzentrockner wird das nasse Produkt in einer 1-2 cm dünnen Schicht durch zwei gegenläufige Walzen geführt und dabei in einer Dreivierteldrehung bei 140°C getrocknet. Die beiden Walzen werden dabei mit Dampf beheizt. Verdampftes Wasser muss wegen der organischen Teile in einem Wäscher vor dem wiederholten Gebrauch gesäubert werden. Das entstandene Pulver wird nach dem Trocknen durch ein Sieb mit Maschenweite 500 µm gesiebt und anschließend in einem Silo gelagert. Im Regelfall werden Sprühtrockner bevorzugt, da sie schneller und effizienter arbeiten und dabei weniger Energie verbrauchen als Walzentrockner. Für die Pulverisierung von hochviskosen Stoffen ist aber der Walzentrockner besser geeignet.

Als nächstes besichtigten wir die Abfüllstation. Hier wird das Pulver jeweils nach Wunsch des Kunden in Säcke oder in Kanister gefüllt und etikettiert. Dabei erhielten wir weitere Informationen über die Produkte der BASF. Insgesamt werden in Trostberg 200 verschiedene Produkte hergestellt. Diese sind flüssig (ca. 100.000 t Jahresproduktion) oder pulverförmig (ca. 20.000 t Jahresproduktion). Die hergestellten Produkte umfassen dabei Verflüssiger, Plasticizer, Super-Plasticizer, Rheologiemodifizierer, Beschleuniger und Ölfeldanwendungen.

Viele Produkte, die am Standort produziert werden, sind Durchgangsprodukte. Dies bedeu-

tet, dass nach Trostberg gelieferte Rohstoffe schon sechs bis sieben Produktionsschritte hinter sich haben und erst der siebte bzw. achte Schritt im Werk durchgeführt wird. Danach werden die Produkte z. B. nach Ludwigshafen oder England weiter transportiert, wo dann die Endsynthese stattfindet und das Markenzeichen verliehen wird. Während der Transport für einen Großteil des gesamten Volumens über die Straße erfolgt, werden vor allem die Flüssigpolymere per Zug transportiert. Dafür verfügt das Produktionsgelände über einen eigenen Gleisanschluss.

Lieferzuverlässigkeit und Qualität haben bei BASF einen hohen Stellwert. Dies ist unter anderem auch an den häufigen internen Qualitätskontrollen zu erkennen. Von jedem LKW, der das Werk verlässt, wird eine Probe entnommen und kontrolliert. Falls es zu einer Kundenreklamation kommt, können Rückstellproben und die Aufzeichnungen des Herstellungsvorgangs begutachtet werden. Dies geschieht im Jahr aber nur etwa zwei- bis dreimal.

Abschließend sprach Frau Ferriz das Thema Sicherheit an. In diesem Zusammenhang erfuhren wir, dass die auf dem Gelände gelagerte Acrylsäure ein großes Explosionsrisiko birgt. Für den Störfall hat die BASF ein dreistufiges Sicherheitssystem entwickelt. Je nach der Höhe der Temperatur in den Tanks nimmt die Größe des Evakuierungsbereichs zu. Solch ein Ernstfall trat bisher aber nicht auf. Der einzige nennenswerte Störfall auf dem Gelände trat im Jahr 2000 in Form eines Brandes auf. Ethanol, das in einer undichten Wanne aufgefangen werden sollte, gelangte durch eine Decke in einen Bereich, in dem Schweißarbeiten stattfanden. Die Auswirkungen des Brandes legten die Produktion für Wochen lahm. Momentan ist der Betrieb seit einer Million Stunden unfallfrei. Grundsätzlich liegt ein Unfall vor, wenn die Fehlzeit eines Mitarbeiters aufgrund eines betrieblichen Unfalls drei Tage überschreitet. Dabei passieren die meisten Unfälle im Büro.

### Betonlabor

Der zweite Teil unserer Führung bestand aus der Besichtigung des Labors im Obergeschoss und dem Betonlabor im Untergeschoss. Im ebenfalls zum Forschungs- und Entwicklungszentrum gehörenden Technikum, das 2006 ergänzt wurde, erhielten wir eine allgemeine Einführung in die Aktivitäten des Betonlabors. Wir erfuhren, dass dort in erster Linie Forschung bezüglich Betonzusatzmittel betrieben wird. Diese bezieht sich vor allem auf Hochleistungsfließmittel auf der Basis von Polycarboxylatether. Schwerpunkt ist die Verbesserung der Robustheit der Systeme in Bezug auf Materialschwankungen der Ausgangsstoffe, wie z. B. den Wassergehalt oder die Temperatur der Gesteinskörnung. Dabei ist das Labor in aktuelle Forschungsprojekte mit einbezogen, für die es die Wirkung neuer Zusatzmittel testet. An mehreren Mischständen werden bei Normklima (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte) die sich meist nur im Zusatzmittel unterscheidenden Rezepturen hergestellt. Neben den Frischbetoneigenschaften können an verschiedenen Prüfständen Parameter des Festbetons gewonnen werden. Darunter unter anderem Würfeldruck- und Biegezugfestigkeiten sowie die Frosttaubeständigkeit, ermittelt im CDF-Verfahren.

Anschließend zeigten uns zwei Labormitarbeiter das Vorgehen bei der Herstellung eines selbstverdichtenden Betons, kurz SCC (self compacting concrete). Der Einsatz dieses in Japan entwickelten Betons ist neben der intensiven Verwendung in Japan und den skandinavischen Länder auch in Europa immer mehr auf dem Vormarsch. Der große Vorteil dieses Systems ist die ersparte Verdichtung. Dadurch wird ein wirtschaftlicher Einbau ohne Lärmbelästigung möglich.

Der angestrebte Wasser-Zement-Wert des für uns hergestellten Betons lag in unserem Bei-

spiel bei 0,46. Wasser (3,93 kg), Zement (CEM I 42,5 N, 8,75 kg), KS-Mehl (7,5 kg), unterschiedliche Kornfraktionen Quarzsand (insgesamt 5,63 kg), Kies und Sand mit Größtkorn 16 mm (insgesamt 34,54 kg) sowie 136,36 g Fließmittel wurden gleichzeitig zusammengegeben und gemischt. Die Mischdauer betrug vier Minuten. Anschließend konnten die Frischbetoneigenschaften getestet werden. Zunächst wurde das Setzfließmaß mit einem Blockierring ermittelt. Dieses Maß beurteilt das Fließverhalten des SCC durch den Zwischenraum der Bewehrungsstäbe. Dazu positionierte ein Labormitarbeiter einen umgedrehten Setztrichter und einen Blockierring mittig auf einer Setzfließplatte. Ohne zusätzliche Verdichtung wurde danach Frischbeton in den Setztrichter gefüllt. Sobald dieser bis zum Rand gefüllt war, wurde der Setztrichter in einem Hub nach oben gezogen und der Beton begann sich nur unter Wirkung der Schwerkraft über die Platte zwischen den Stäben hindurch auszubreiten. Nach Stillstand des Ausbreitvorgangs konnte über den Durchmesser des entstandenen Betonkuchens das Setzfließmaß bestimmt werden. Es betrug 69 cm.

Darüber hinaus war erkennbar, dass sich zwischen den Bereichen innerhalb und außerhalb des Blockierrings kein Niveauunterschied eingestellt hatte. Die Gesteinskörnung wurde vom Zementleim durch die Bewehrungsstäbe bis zum Rand transportiert und war über den gesamten Betonkuchen gut verteilt. Auch zeigten sich am Rand keine Wasserfahnen, die ein Bluten des Betons anzeigen würden. Neben der Bestimmung des Setzfließmaßes mit Blockierring bekamen wir mit der Kajimabox eine weitere Möglichkeit präsentiert, die Verarbeitbarkeit des Betons zu testen. Die Kajimabox besteht aus einem Plexiglaskasten mit den Maßen 500×300×300 mm, in welchem 35 Bewehrungsstäbe mit Durchmesser 20 mm eingebaut sind. Der Beton wurde über einen Fülltrichter von einer Seite in die Box gegossen. Durch das transparente Plexiglas konnte der Verteilungsvorgang gut beobachtet werden. Dabei zeigte sich, dass der Einfluss der Bewehrung auf das Füllverhalten sehr gering war. Der Betonspiegel glich sich an und auch die groben Gesteinskörner wurden über den gesamten Probekörper verteilt.

### Anwendungstechnik für fließfähige Systeme

Im Anschluss führte uns der Mitarbeiter Sebastian Sulfert durch das Labor der Abteilung Anwendungstechnik für fließfähige Systeme. Dabei erklärte er uns einige Geräte und Tests, die für Qualitätsprüfungen an zement- oder gipsbasierten Produkten verwendet werden.

Mithilfe eines Härteprüfgerätes kann der Shore-Wert einer Masse bestimmt werden. Dieser zeigt die Festigkeit und Begehbarkeit z. B. eines Betons auf. Während 0 Shore der maximal möglichen Eindringtiefe von 2,5 mm entspricht, bezeichnet ein Wert von 100 Shore eine Eindringtiefe von 0 mm. Ab einem Shore-Wert von 40 ist eine Masse begehbar. Bei der Messung sollte eine Temperatur von circa 23 °C eingehalten werden. Zu Unterdrückung einer unerwünschten Schaumbildung auf der Oberfläche von Bauteilen kann ein Entschäumer verwendet werden. Um dessen Wirkung zu prüfen, wird die Oberflächengüte auf einer Fläche von 1×1 cm unter einer Lupe untersucht. Das Vicat-Nadelgerät dient der Ermittlung des Zeitpunktes, an dem ein Mörtel oder Zementleim erstarrt. Dabei wird der Widerstand des Materials gegen das Eindringen der Vicat-Nadel ermittelt.

Des Weiteren zeigte uns Sebastian Sulfert ein Schwindschichtgerät, mit welchem die Volumenminderung von z. B. Beton erfassbar ist. Hierfür werden Laser und Reflektoren verwendet, die die geometrischen Längenänderungen messen. Anschließend durften drei Freiwillige aus der Gruppe die Wirkungsweise der entwickelten Produkte beim Mischen eines Zementleims testen. Dazu erhielten sie jeweils vier Behälter mit unterschiedlichen, bereits

abgewogenen Substanzen, einen Rührlöffel und ein Mischgefäß. In der ersten Dose befand sich ein CEM I 52,5 N. Diesen vermischten die drei mit dem vorbereiteten Wasser aus der zweiten Dose. Das Mischen verlief zäh und lieferte eine steife, schlecht verarbeitbare Masse. Durch die Zugabe des pulverförmigen Fließmittels Melflux 4930F wurde die Masse stark verflüssigt und konnte leicht gemischt werden. Dieses Gemisch prüften wir anschließend mit einem Fließring auf einer Glasplatte. Dazu wurde der Fließring bis zum Rand mit dem Zementleim gefüllt und senkrecht nach oben weggezogen. Der verbleibende Zementleim breitete sich ungleichmäßig über die Glasplatte aus. Es zeigte sich eine deutliche Entmischung der Zementkörner vom Anmachwasser. Dieses rann in milchigen Fahnen über die sedimentierten Zementkörner. Durch die Zugabe der letzten, ebenfalls pulverförmigen Substanz, Starvis 3070 F sollte diese nachteilige Eigenschaft kompensiert werden. Beim Mischen zeigte sich kein merklicher Einfluss auf den bereits verflüssigten Zementleim. Die erneute Prüfung des Ausbreitverhaltens mit dem Fließring zeigte, dass sich der Leim gleichmäßig ausbreitete und keine Sedimentation stattfand. Der Zementleim behielt seine Homogenität und die vorher sichtbaren wässrigen Fahnen waren nicht mehr zu erkennen.

## …und das Beste zum Schluss

Nach diesen umfangreichen Führungen versammelte sich der Kurs auf der Dachterrasse unter dem Glasdach des F&E-Kompetenzzentrum. Dort waren eigens für uns ein üppiges Buffet und Getränke vorbereitet worden. Beim gemeinsamen Mittagessen konnten wir mit den Mitarbeitern, die uns bei den Führungen begleiteten, Kontakt knüpfen. Im persönlichen Gespräch bestand u. a. die Möglichkeit zum Austausch über deren beruflichen Werdegang und den Einstieg bei der BASF.

Insgesamt präsentierte sich die BASF mit einem wohl organisierten Programm und informativen, nicht zu überfrachteten Vorführungen. Auch die Befürchtung mancher Kommilitonen, mit allzu chemischen Zusammenhängen überrollt zu werden, stellte sich als unbegründet heraus.

Abbildung 3:
Beton-Fertigteil-Produktion bei Max Bögl in Sengenthal (Foto: Reinhard Mederer)

An dieser Stelle möchten wir uns bei allen beteiligten Firmen zu bedanken, die es uns ermöglichten, ihre Produktionsstätten mit einer so großen Gruppe von Studierenden zu besuchen und sich die Zeit nahmen, uns durch die Anlagen zu führen. Darüber hinaus wurden uns in Vorführungen und Vorträgen sehr anschaulich weitere interessante Informationen vermittelt:

Abbildung 4:
Ankerbohrgerät der Firma BAUER, Schrobenhausen

Abbildungen 5 + 6:
Ziegelproduktion der Hörl & Hartmann Ziegeltechnik in Dachau

Abbildungen 7 ff:
Impressionen der Kalksandsteinwerke Südbayern,
(Fotos: © UNIKA GmbH)

Abbildungen 11 ff.:
Südbayerisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH

# 5. Veranstaltungen

## 5.1. Tag des Lehrstuhls ZfP am 16.01.2015

Bereits zum dritten Mal veranstaltete der Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung einen „Tag des Lehrstuhls“, um über laufende Projekte und Abschlussarbeiten zu informieren. Eingeladen waren neben den cbm-Mitarbeitern, Masteranden und Hiwis auch alle externen Doktoranden sowie die Studierenden im Menteeprogramm der Munich School of Engineering, die von Prof. Große betreut werden. Etwa 30 Personen verfolgten zunächst die Präsentationen aus den einzelnen Projektbereichen und nutzen anschließend die Gelegenheit, sich die Einrichtungen und ZfP-Geräte des Lehrstuhls anzusehen. Ein leckeres Buffet in der Pause bot auch die Möglichkeit zur vertieften Diskussion über die Projekte und für viele Gespräche, die der Vernetzung dienten.

## 5.2. 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 **29. Juli 2015** eine Exkursion für Studenten und Doktoranden der Ingenieurwissenschaften Bau Geo Umwelt, des Maschinenwesens 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 drei Stationen konnten sich die insgesamt 14 Teilnehmer über die zerstörungsfreie Prüfung mittels Computertomografie, Ultraschall-Echo-Verfahren und Infrarot-Thermografie informieren. Zusammen mit den 6 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.

Prof. C. Große (2.v.r.) mit Team und Studierenden der ZfP sowie BMW-Mitarbeitern

## 5.3. Deutsche Betonkanu-Regatta

**Die 15. Deutsche Betonkanu-Regatta fand vom 19. bis 20.06.2015 in Brandenburg a. d. Havel statt.**
Projektbetreuung: Kai Fischer, M.Sc.

K. Fischer (1.v.l.) und Mitarbeiter K. Kriegel (1.v.r.)

Unter dem Motto „Römisches Reich“ konstruierten von September 2014 bis Juni 2015 13 Bau- und Umweltingenieursstudenten am Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) sowie am Zentrum Geotechnik der TU München zwei voll schwimmfähige Kanus aus Beton und ein weiteres spezielles Betonwasserfahrzeug, um an der 15. Deutschen Betonkanu-Regatta 2015 auf der „Regattastrecke Beetzsee“ in Brandenburg an der Havel teilzunehmen.

Die zwei Rennkanus wurden am Computer als maßstabsgetreues CAD-Modell konstruiert, welches später als Vorlage für die Form der Schalung diente. Dabei entschied man sich für eine 6-teilige Außenschalung (drei Steuerbord, drei Backbord) aus Holz. Die hölzerne Schalhaut wurde mit einem Harz verkleidet, um ihren Widerstand zu erhöhen und um eine glatte Oberfläche für eine schönere Betonaußenansicht zu schaffen. Die Anforderungen an die Frisch- und Festbetoneigenschaften wurden über die Entwicklung einer hochfesten Feinbetonrezeptur – bestehend aus Portlandzement, gesichteter Steinkohlenflugasche, Quarzsand und Quarzmehl – realisiert. Um die erforderliche Biegezugfestigkeit zu erreichen,

wurden zwei Lagen Glasfasermatten als Bewehrung der 8 – 11 mm dicken Bootswände eingelegt. Zur Aussteifung des Bootes wurden Spanten in Form von zwei Strängen aus PE-Schaum einbetoniert.

Die fertigen Kanus mit einem Gewicht von jeweils rd. 100 kg und den Namen „Remus“ und „Romulus“ gingen gemeinsam mit 63 weiteren Booten von insgesamt 45 Teams am Samstag, dem 19. Juni, in Brandenburg an der Havel an den Start. Die TU München stellte zwei Herrenteams sowie ein Frauenteam. Dabei schaffte es ein Damenteam bis ins Halbfinale. Den Sieg holten sich einmal mehr die Studenten der Universität Twente Enschede.

Die erstmalige Teilnahme eines Teams der TU München an der offenen Klasse wurde durch den Bau eines Streitwagens aus Beton – passend zum römischen Motto – realisiert. Dieser bestand aus drei separaten Schwimmkörpern – zwei Zugpferde und dem eigentlichen Streitwagen –, die über eine Deichsel miteinander verbunden waren. Als Antrieb fungierten zwei Fahrradrahmen auf dem Streitwagen über deren Pedale jeweils ein Schaufelrad angetrieben wurde. Für die Pferde als auch für die Schwimmkörper wurde eine hochfeste Betonrezeptur verwendet, die sich aus Weißzement, Kalksteinmehl, Quarzsand und Quarzmehl zusammensetzte. Für ein braunes Betonpferd wurde zusätzlich ein entsprechendes Farbpigment verwendet. Analog zu den Rennkanus wurden zwei Lagen aus Glasfasermatten als Bewehrung der Betonkörper eingelegt.

Auf Betonkanu-Regatta war der rd. 600 kg schwere römische Streitwagen eines von insgesamt 13 Wasserfahrzeugen, welches die vielen interessierten Besucher beeindruckte und mit dem zehnten Platz ausgezeichnet wurde.

Ohne die Unterstützung von Sponsoren wäre dieses Projekt nicht realisierbar gewesen. Aus diesem Grund bedanken wir uns recht herzlich bei HeidelbergCement AG, Dyckerhoff GmbH, Quarzwerke GmbH, MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG, Fuchs Lubritech Gmbh, Harold Scholz & Co. GmbH, BauMineral GmbH und der KIEL Zulieferungen GmbH.

## 5.4. Betriebsexkursion 2015

**Versuchsanstalt Wasserbau Obernach**
Planung und Durchführung: Max Botz, M.Sc. und Philip Jatzlau, Dipl.-Ing.

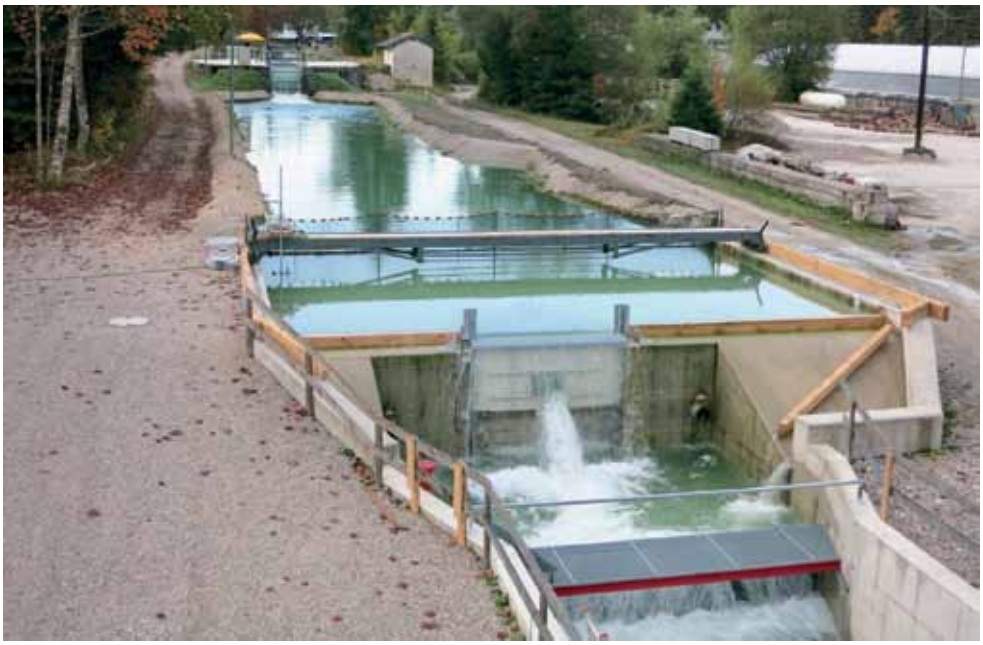
Ziel der Betriebsexkursion des cbm am **29. September 2015** war die Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TUM in Obernach. Circa 60 interessierte Mitarbeiter versammelten sich dafür am frühen Morgen bei einem Frühstück in den Räumlichkeiten des cbm. Die Fahrt mit dem Bus zur in den bayerischen Voralpen – am Walchensee – gelegenen Versuchsanstalt dauerte 1,5 Stunden.

Fotos im gesamten Beitrag: B. Bollmann, D. Heinz, Lehrstuhl für Wasserbau

Ansprechpartner vor Ort waren Prof. Rutschmann und Dr. Hartlieb vom Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, die abwechselnd und ergänzend durch den Tag führten. Nach der Begrüßung wurde im Besprechungsraum der Versuchsanstalt eine Einführung in die Historie der Anstalt sowie des Lehrstuhls gegeben, welche mit einer Erläuterung aktueller Projekte endete. Die Versuchsaufbauten der genannten Projekte wurden anschließend besichtigt und ausführlich erklärt.

Bei dem ersten Projekt handelte es sich um ein neu entwickeltes Konzept eines Wasserkraftwerks für geringe Strömungsgeschwindigkeiten, dem Schachtkraftwerk. Es zeichnet sich durch eine modulare, kostengünstige Bauweise, einen hohen Wirkungsgrad sowie einem besonderen Schutz von Fischen beim Abstieg aus. Durch die sohlparallele Einlaufebene soll ein „Einsaugen“ von Fischen verhindert werden. Das Migrationsverhalten von kleinen und schwimmschwachen Fischen soll dafür untersucht werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen soll in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung des cbm ein System zur Verfolgung der Position der Fische entwickelt werden.

Abbildung 2:
Prototypversuchsstand des Schachtkraftwerks



Eine weitere Kernkompetenz der Versuchsanstalt besteht in der Prognose des Sedimenttransports im Flussbett. Diese Fragestellungen können noch nicht durch Simulationen behandelt werden. Daher werden große Modelle des Flussbetts aufgebaut und der Sedimenttransport bei Durchströmung ausgewertet. Insbesondere zur Auslegung von Einbauten zur Steuerung des Sedimenttransports sind die genannten Versuche sehr hilfreich. Der in Abbildung 2 dargestellte Versuchsaufbau stellt einen Abschnitt der oberen Isar in der Nähe der Versuchsanstalt nach. Auch im Rahmen der Renaturierung der Isar in München wurden entsprechende Flusslaufmodelle an der Versuchsanstalt eingesetzt.

Als letztes wurde das Modell einer Talsperre aus Schweden gezeigt. Im Rahmen des Projekts sollten konstruktive Möglichkeiten entwickelt werden, den maximalen Volumenstrom durch die Sperre zu erhöhen. Besonders interessant und spannend hierbei war die Flutung des Versuchsaufbaus.

Abbildung 3:
Modell des Isar-Flussbetts zur Untersuchung des Sedimenttransports

Abbildung 4:
Modell einer Talsperre in Schweden

Die Exkursion wurde durch ein Abendessen und einen Spaziergang durch das Almdorf Eng im Karwendel ergänzt. Dies bot die Möglichkeiten zur vertieften Diskussion und zur Vernetzung in und unter den Arbeitsgruppen.

## 5.5. Workshop in Malmö und Riso von Greentech und Euro Tech Universities

### Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung organisiert Trainingsprogramm

Von 21. bis 25. September 2015 fand der 5th MARE WINT/EuroTech Workshop mit Trainingsprogramm in Malmö (Schweden) und Roskilde (Dänemark) statt. MARE WINT steht für “new MAterials and REliability in offshore WINd Turbines technology” und gehört zu den von der Europäischen Kommission geförderten „Marie-Curie Action – Initial Training Networks". Die „EuroTech Universities“ sind eine strategische Partnerschaft von vier führenden technischen Universitäten Europas, der Technical University of Denmark (DTU), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Eindhoven University of Technology (TU/e) und Technische Universität München (TUM), bei denen der Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung auf dem Gebiet GreenTech und insbesondere WindEnergy mit den Partneruniversitäten zusammenarbeitet. Der erste Teil des Workshops fand an der World Maritime University (siehe Foto) in Malmö statt, die unter der Schirmherrschaft der Vereinten Nationen steht. Der zweite Teil des Workshops wurde am Standort Riso der Technical University of Denmark bei Rosklide durchgeführt. Der Lehrstuhl übernahm das Trainingsprogramm zum Thema „Non-destructive inspection of blades, tower, foundations and gear – integrated design“.

## 5.6. AIForS

### Erstes Alumni-Forschungs-Symposium am 13. und 14.11.2015 im cbm

Organisation: Dr. Kai Osterminski

### Programm zum AIForS im cbm

cbm · Centrum Baustoffe und Materialprüfung

Professoren
**Dr.-Ing. C. Gehlen**
**Dr.-Ing. habil. C. Große**
**Dr.-Ing. D. Heinz**

Baumbachstraße 7
81245 München
Germany

Tel +49.89.289.27061
Fax +49.89.289.27064

www.cbm.bgu.tum.de

**1. Alumni-Forschungs-Symposium (AIForS)**

**13. November ab 18:00 Uhr**
**Geselliges Beisammensein**
**mit festlichem Abendessen** im Schloss-Gewölbe der Blutenburg, Seldweg 15, 81247 München, www.blutenburg.de.
Den Gewölbekeller im Haupthaus erreichen Sie über den Innenhof des Schlosses. Das Abendessen beginnt um 19:00 Uhr.

**14. November um 09:00 Uhr**
**Fachliche Vorträge**
**(15-20 Min Präsentation; 5-10 Minuten Diskussion)**

| | |
|---|---|
| 9:00 Uhr | Begrüßung |
| 9:05 Uhr | Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton mit Granit? |
| 9:35 Uhr | 3D-Drucken von Betonbauteilen |
| 10:05 Uhr | Korrosionsverhalten von Betonstahl im Bereich von Biegerissen nach kurzzeitiger Chloridbelastung |
| 10:35 Uhr | Kaffeepause |
| 11:15 Uhr | Die Rolle des Aluminiums in C-A-S-H bei chemischem Angriff auf Beton |
| 11:45 Uhr | Asphalt - Performance und Vertrag |
| 12:15 Uhr | Schwingt die Windenergieanlage? UND Messtechnik für die Autobahn |
| 12:45 Uhr | Mittagssnack |
| **danach** | **Rundgang im cbm mit Posterpräsentationen** |
| **und** | **Ausklang der Veranstaltung** |

Mit großem Interesse waren rund 40 ehemalige und zur Zeit am cbm tätige wissenschaftliche MitarbeiterInnen dem Aufruf zum wissenschaftlichen Austausch gefolgt. Die Professoren Christoph Gehlen, Detlef Heinz und Christian Große hatten alle wissenschaftlichen MitarbeiterInnen, die seit Entstehung des Instituts in den 70er Jahren die Baumbachstraße 7 durch ihr Wirken bereichert haben zu einem Gedankenaustausch eingeladen.

Begrüßt wurden die Teilnehmenden am Freitag Abend in der Blutenburg in München-Obermenzing. Dort genossen sie zum Teil in Begleitung von Eheleuten und Lebenspartnern ein festliches Menü im Gewölbekeller des Schlosses und einen lebhaften, kurzweiligen Abend.

Am Samstag Morgen traf sich die gesamte Mannschaft dann zu einem wissenschaftlichen Kolloquium, dessen Programmpunkte die Forschungsvielfalt des Centrum Baustoffe und Materialprüfung aufzeigte. Es wurde dabei viel Raum eingeräumt für spannende und informative Gespräche zu aktuellen Forschungsbereichen und dem Transfer der Forschungserkenntnisse in die freie Wirtschaft. Dass sowohl der Vorgänger von Herrn Professor Gehlen, Professor Schießl, als auch dessen Vorgänger, Professor Springenschmid, die Veranstaltung mit ihrem Besuch bereicherten, erfreute die Anwesenden, die ja zum großen Teil unter derern Fittiche ihre Karriere begonnen hatten.

Mit einem Rundgang durch die Labore und der Präsentation neuer Geräte und Einrichtungen wurde die Veranstaltung gegen 16:00 Uhr beendet. Alle Teilnehmenden waren sich sicher, dass das 1. AlForS ein gelungener Auftakt zu einer hoffentlich regelmäßig stattfindenden Veranstaltungsreihe war. Nun soll das AlForS im Zweijahresrhythmus und im Wechsel zum cbm-Baustoffseminar stattfinden.

Teilnehmer des AlForS am 14.11.15 (Foto Kai Osterminski)

# 6. Ehrungen

## 6.1. Studentenpreis der DGZfP

**Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung zeichnet J.-C. Grager aus**

Herr Jan-Carl Grager hat den Studentenpreis 2015 der DGZfP für seine Masterarbeit „Quantitative Impact- und Porositätscharakterisierung an CFK-Werkstoffen mittels zerstörungsfreier Prüfmethoden“ gewonnen. Herr Grager hatte bereits seine Semesterarbeit am Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung mit einem Thema zur Prüfung von Faserverbundbauteilen der Automobilindustrie (mit den Firmen Roding und BMW) angefertigt. Die prämierte Masterarbeit entstand in Kooperation mit der Firma Airbus Group Innovation in Ottobrunn. Seit Juni ist Herr Grager Doktorand des Lehrstuhls in einem Kooperationsprojekt mit der Firma Siemens AG und Mitglied im Fakultätsgraduiertenzentrum der Fakultät für Maschinenwesen.

## 6.2. Doce et Delecta

**1. Preis geht an Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffkunde im Bauwesen**

Für die Master-Vorlesung "Baustofferzeugende Industrie – Exkursionen" verleiht die Fachschaft Bau, Umwelt & Vermessung den 1. Preis des Doce et Delecta an den Lehrstuhl von Professor Gehlen. Mit diesem Preis würdigen die Studierenden exzellente Lehre. Daniel Weger, der die Organisation der Exkursion maßgeblich leitet, nimmt im Rahmen des "Tag der Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt" den Preis entgegen. Einen Bericht zur Lehrveranstaltung finden Sie auf S. 25.

2.v.r. Daniel Weger
(Foto: A. Heddergott / TUM)

# 7. Berichte aus den Arbeitsgruppen

## 7.1. Arbeitsgruppenschwerpunkte

### 7.1.1. AG 1 Bindemittel und Zusatzstoffe

Die Arbeitsgruppe 1 beschäftigt sich mit den drei Aufgabenfeldern Forschung, Lehre und Materialprüfung. Die Forschungsschwerpunkte liegen auf den Gebieten der Dauerhaftigkeit, Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit mineralischer Baustoffe sowie der Entwicklung neuartiger Bindemittel und Behandlungsmethoden.

Ein wesentlicher, durchlaufender Schwerpunkt der Forschungsarbeiten ist die Dauerhaftigkeit zementgebundener Baustoffe. In diesem Bereich werden derzeit vor allem Projekte zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) und zum Sulfatwiderstand bearbeitet. Das Thema AKR wird in mehreren – z.T. langfristig angelegten – Projekten abgewickelt. Dabei wird der Einfluss von Betonzusatzstoffen, insbesondere Steinkohlenflugasche (SFA), auf die AKR in Betonen untersucht und ein AKR-Performance-Prüfverfahren bei Einsatz von SFA im Beton bewertet und modifiziert. 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. In einem laufenden DFG-Projekt sollen die Mechanismen der AKR beim Eintrag von Tausalz in Betone verschiedener Zusammensetzungen weiter geklärt werden

In einem weiteren DFG-geförderten Forschungsvorhaben wurden die Möglichkeiten für eine Beschleunigung der Reaktionskinetik einer Hydratation von puzzolanischen Gläsern, hier am Beispiel Steinkohlenflugasche, durch organische Zusätze und zusätzlich durch mechanische Aktivierung untersucht und vorläufig abgeschlossen.

Weitergeführt wurde ein ebenfalls DFG-gefördertes Forschungsprojekt zu den Mechanismen und Wirkungen einer gezielten Carbonatisierung von Zementstein und -mörtel unterschiedlicher Zusammensetzung unter erhöhtem Druck und z.T. auch überkritischen Bedingungen. Ziel ist hier die Entwicklung alternativer Prozesse zur Herstellung zementgebundener Werkstoffe mit rascher Erreichung definierter Produkteigenschaften.

Abbildung:
Kühlvorgang des Sulfoaluminat-Belit-Klinkers

Im Jahr 2015 wurden auch jüngere Forschungsarbeiten im Bereich des Klinkerbrandes fortgesetzt. Hier wurden Belit-Sulfoaluminatklinker aus verschiedenen Rohstoffen synthetisiert und der Einfluss der über die Rohstoffe eingetragenen Alkalien auf die Bildung der Klinkerphasen und deren Hydratation systematisch untersucht.

Eng mit der Forschung verknüpft sind auch die Bereiche der Materialprüfung, die die Arbeitsgruppe 1 bearbeitet. Neben der Überwachung von Flugasche wurden auch die Klärung von Schadensursachen an Betonen oder die Lösung anwendungstechnischer Probleme bei Baustoffen behandelt. Einen großen Anteil in der Materialprüfung hat die Prüfung der Alkalireaktivität von Gesteinen und die Beurteilung der AKR-Empfindlichkeit von Betonen unter den Einwirkungen der Feuchtigkeitsklasse WS (feucht + Alkalien von außen + dynamische Belastung). Gesteinskörnungen aus verschiedenen Regionen der Welt werden hinsichtlich einer AKR-Empfindlichkeit mittels Schnellprüfverfahren geprüft. Auch wurden zahlreiche Prüfungen des Sulfatwiderstandes verschiedener Bindemittel z.B. für Auftraggeber von der arabischen Halbinsel durchgeführt. In diesen thematischen Zusammenhang gehören auch theoretische und experimentelle Untersuchungen an Ringspaltmörteln auf die Empfindlichkeit gegen einen thaumasitbildenden Sulfatangriff. Zum Widerstand von Betonen und geotechnischen, zementgebundenen Baustoffen in sulfathaltigen Böden konnte eine umfangreiche theoretische Studie zur Entwicklung ausreichend dauerhafter Rezepturen abgeschlossen werden.

### 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

- Mechanismen der Carbonatisierung von Beton,
- Lebensdauerbemessung von Verbundankern sowie
- Verarbeitung und Qualitätskontrolle von Tiefbaubetonen auf Basis rheologischer Messungen.

Ein brandaktuelles Forschungsthema stellt darüber hinaus die additive Fertigung („3D-Drucken“) von Betonbauteilen dar. Hierbei spielt die Rheologie der auszubringenden Zementleimsuspension eine wesentliche Rolle. Zur grundlegenden Charakterisierung der visko-elastischen Eigenschaften der Suspension wurde ein Rheometer MCR 502 der Fa. Anton Paar angeschafft. Das nach dem Searle-Prinzip arbeitende „MCR 502“ kann rheologische Tests so-

Abbildung 1: Rheometer MCR 502 von Anton Paar

wohl unter Rotation als auch Oszillation durchführen. Das System ist modular aufgebaut und kann durch unterschiedliche Temperierkammern, anwendungsspezifische Zubehörteile sowie Messgeometrien erweitert werden. Daher ist es möglich, das Rheometer sowohl zur Messung von zementären Systemen wie Leim, Mörtel und feinkörnigen Beton als auch zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von beispielsweise reaktionsharzgebundenen Systemen einzusetzen. In Rotation kann das Gerät ein minimales Moment von 1 nNm und unter Oszillation ein minimales Moment von sogar nur 0,5 nNm aufzeichnen. Als Messgeometrien wurden ein Vane-Paddel mit einer Baustoffmesszelle, welche durch eine spezielle Rippengeometrie an der Wand der Messzelle das Phänomen des Wandgleitens verhindern soll, und ein Platte-Platte Messsystem mit einem Durchmesser von 50 mm angeschafft. Durch die Vielzahl der Einsatzfelder und der hohen Messgenauigkeit stellt das neue Gerät eine große Bereicherung der Messausstattung des Hauses dar, eröffnet viele neue Forschungsmöglichkeiten und wird bereits in einigen laufenden Forschungsvorhaben eingesetzt.

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

Ein aktuelles Forschungsvorhaben befasst sich mit der lärmtechnischen Optimierung von Grinding- und Groovingtexturen. Im Rahmen dieses Projekts wurde im Jahr 2015 auf der A 5 eine Erprobungsstrecke gebaut. Insgesamt wurden auf der A 5 drei unterschiedliche Oberbetone eingebaut und diese mit jeweils drei Varianten texturiert. Die Texturen sowie die Betonzusammensetzungen sind Weiterentwicklungen der im letzten Jahr durchgeführten Simulationsrechnungen und Laborversuche. Im Frühjahr 2016 werden an der A 5 die Lärm- und Griffigkeitsmessungen durchgeführt. Abb. 2 zeigt die drei Texturen am Beispiel eines Oberbetons.

Abbildung 2: Grinding- und Groovingtexturen auf der A 5

### 7.1.3. AG 3 Stahl und Korrosion

Im Fokus der Arbeitsgruppe stehen der Werkstoff Stahl, dessen maßgebende Schädigungsmechanismen Korrosion und Ermüdung sowie die probabilistische Zustandsbeschreibung und Lebensdauerprognose von Bewehrungskorrosion in Stahlbetonbauwerken. So wurde im November das fib-Bulletin 76 “Benchmarking of Deemed-to-Satisfy Provisions in Standards” von der Arbeitsgruppe fib-TG 8.6 unter Einberufung von Prof. Gehlen und auf Basis der Arbeiten von Herrn Rahimi veröffentlicht. Im Heft werden die nationalen Vorgaben ausgewählter Länder zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen gegenüber chloridinduzierter Betonstahlkorrosion gegenübergestellt und die resultierenden Zuverlässigkeiten mit probabilistischen Ansätzen berechnet.

Ein zentrales Forschungsprojekt untersucht das Korrosionsverhalten von Stahl in Beton bei Anwendung des Instandsetzungsprinzips W-Cl in gerissenem Beton. Das Ziel ist die Beantwortung der Frage, unter welchen Randbedingungen das Instandsetzungsprinzip W-Cl erfolgreich und dauerhaft angewendet werden kann. Neben numerischen und experimentellen Arbeiten wird die Fragestellung auch anhand von Bauwerksmonitoring in gerissenen Stahlbeton an geeigneten Referenzbauwerken überprüft und diskutiert.

Neben der einfachen „blanken“ Bewehrung wird das Korrosionsschutzpotential von epoxidharzbeschichteter Bewehrung in Beton in einem weiteren Forschungsvorhaben untersucht. Hauptfaktoren für die Korrosionsschutzwirkung sind die etwaige Dichtigkeit der Beschichtung gegen einen anliegenden Elektrolyten (z.B. Beton) sowie die Anzahl und Größe herstellungs- bzw. baustellenbedingter Fehlstellen. Die bisherigen Ergebnisse sind sehr vielversprechend und deuten auf eine erhebliche Lebensdauerverlängerung beim Einsatz von ECR im Vergleich zu unbeschichtetem Betonstahl hin. Neue, bewilligte Forschungsprojekte, die das Profil der Arbeitsgruppe erweitern, sind zum einen die Erforschung der Diffusionspotentiale im porösen Beton, die im Bereich 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 neues 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.

Im Zuge unserer Kooperation mit dem CBMA, China Building Materials Academy, konnten wir im Oktober den Gastwissenschaftler CAO Yin in unserer Arbeitsgruppe begrüßen. Herr Cao wird bis April 2016 bei uns bleiben und beschäftigt sich mit den Grundlagen für die Dauerhaftigkeitsmodellierung von Beton unter kombinierten Einwirkungen.

Im Bereich der Materialprüfung konnte auch 2015 an die guten Ergebnisse aus den vorangegangenen Jahren angeknüpft werden. Dies ist nicht zuletzt das Ergebnis eines kontinuierlichen Prozesses zur Verbesserung unserer Prüftechnik. Exemplarisch steht dafür die Inbetriebnahme eines neuen optischen Systems zur Dehnungsmessung an unserer Universalzugprüfmaschine. Hier werden durch Kameras digitalisierte Bilder der Proben in Echtzeit verarbeitet, in Längenänderungen umgerechnet und an die Steuerelektronik übertragen. Ein innovatives Feature dieser Anwendung besteht darin, dass Zugversuche aufgezeichnet

und anschließend mit verändertem (z.B. auf den dann bekannten Versagensbereich fokussierten) Dehnungsmessbereich virtuell wiederholt werden können. Neben den Aktivitäten zur ständigen Verbesserung der Prüftechnik und der Qualität der Ergebnisse wurde im abgelaufenen Jahr der Mitarbeit in Ausschüssen, Arbeitskreisen, Gremien und Fachkommissionen als wichtigem Beitrag sowohl zur Stärkung unserer Kompetenz als auch unserer Außenwirkung größere Aufmerksamkeit gewidmet. Hier sei als Beispiel die seit Mitte 2015 bestehende Mitgliedschaft von Herrn Dipl.-Ing. F. Meyer im ASTM-Committee A01 „Steel, Stainless Steel and Related Alloys“ aufgeführt.

### 7.1.4. AG 4 Chemie

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

Auch in diesem Jahr ergaben sich wieder personelle Änderungen in der Gruppe. So hat Frau Ehrhardt nach Ablauf ihres befristeten Vertrags im Sommer unser Labor verlassen. Als Nachfolger konnte Herr Markus Koll gewonnen werden. Er beendete im Frühjahr seine Chemielaborantenausbildung hier an der TU München, wobei er sein erstes Ausbildungsjahr schon am cbm verbracht hatte. So konnte er nach kurzer Einarbeitungszeit unser Team unterstützen. Für ein halbes Jahr konnten wir Frau Marina Mago als wissenschaftliche Hilfskraft in unserer Gruppe beschäftigen. Sie hatte Chemie an der Universiad de Oriente in Cumana, Venezuela, studiert und mit dem Diplom abgeschlossen. Sie beschäftigte sich vor allem mit der Laserablations-ICP-MS und der Auswertung der Messdaten mit der Software Iolite. Entsprechend dem jährlichen Rhythmus hat die angehende Chemielaborantin Karolina Koch nach Abschluss ihres ersten Ausbildungsjahres im September ihre Zeit im cbm beendet und führt ihre Ausbildung nun im Chemiedepartment in Garching fort. An ihrer Stelle begann Matthias Heinzl seine Ausbildung bei uns. Auch in diesem Jahr nutzten wieder mehrere Schüler bzw. Ausbildungsanwärter ein einwöchiges Praktikum im Rahmen der Berufsvorbereitung, um Einblick in den Betrieb eines Chemielabors und den damit verbundenen Aufgaben des Chemielaboranten zu erhalten.

Neben den zahlreichen Aufgaben aus Forschungsprojekten der anderen Arbeitsgruppen beschäftigte uns in diesem Jahr vor allem das Forschungsprojekt über die Rolle des Aluminiums in C-A-S-H bei chemischem Angriff auf Beton.

Die Lehre umfasste im Sommersemester wieder die chemische Analytik des Praktikums „Analytik und Prüftechnik“ für die Baustoffingenieurvertiefer (Masteranden). Durch eine Neuorganisation der Veranstaltung wird nun ein roter Faden zwischen den verschiedenen Analysenmethoden gezogen, was bei den Studierenden sehr gut ankommt. Zum Einsatz kam hier auch das neue über Studiengelder finanzierte Mikrowellendruckaufschlussgerät. Dadurch konnten die Studenten selbst Aufschlüsse an Proben durchführen. Im Wintersemester wurde der Grundlagenteil der Vorlesung „Bauchemie“ (Teil der Baustoffkundevorlesung des Studiengangs „Bachelor Bauingenieurwesen“) deutlich gekürzt und in einer eigenen freiwilligen Veranstaltung angeboten, was ein großer Zeitgewinn für die eigentlichen bauchemischen Themen ist! 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 seit 2013 über das MPA BAU der TU München als Zertifizierungsstelle nach DIN EN 45011 akkreditiert und durch das DIBt unter der Kennnummer 1211 im Rahmen der EU-Bauproduktenverordnung in Brüssel notifiziert.

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 Perfomance-Prüfungen an Asphalt (Widerstand gegen bleibende Verformungen, Steifigkeit, Widerstand gegen Ermüdung) nehmen einen immer größeren Raum in der Prüftechnik der FG Asphalt ein.

Im abgelaufenen Jahr wurde die Fachgruppe Asphalt von E.on mit der Überwachung der Asphaltarbeiten im Zuge der Erneuerung der Asphaltdichtung des Unterbeckens am Pumpspeicherwerk Langenprozelten beauftragt. Die Asphaltarbeiten erstreckten sich über den Zeitraum von Juni bis September und wurden vor Ort intensiv überwacht, die Untersuchung der anfallenden Proben erfolgte im Labor in Pasing (Bilder 1 und 2).

Abbildung 1 und 2: Einbau des Dichtungsasphaltes mit umgebautem Straßenfertiger, Beschicker und Windenwagen

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

Im abgelaufenen Jahr stellten in der Fachgruppe Bitumen und Abdichtungen die vom Bundesverkehrsminister im Rahmen des ARS 11/2012 geforderten „Bindemittelprüfungen im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit“ 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 bayerischer Produktion. In dieser Fachgruppe werden zudem Eignungsprüfungen an Baustoffgemischen für Schichten mit hydraulischem Bindemittel und teer-/pechhaltigen Ausbaustoffen durchgeführt.

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

Die Ausbildung von derzeit 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 gleicherweise das Alter von Anlagen und Bauwerken zunimmt. Ein weiterer Schwerpunkt der AG 6 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 AG 6 im Bereich Bauwesen wurden 2015 durch zwei neue Forschungsvorhaben gefördert, die sich mit der Tragstruktur und Dauerhaftigkeit von Windenergieanlagen (MistralWind) und mit scannenden Prüfverfahren für Betondecken von Fahrbahnen befassen. Nähere Informationen enthält der Abschnitt über neue Forschungsvorhaben. Intensiviert wurde zudem die Kooperation mit den Industriefirmen im Großraum München auf dem Gebiet der Prüfung und Qualitätssicherung von Faserverbundwerkstoffen. Diese Zusammenarbeit mit Firmen wie BMW, Airbus, Siemens, MTU und IABG geht mittlerweile deutlich über die Inhalte des Projektes MAIzfp (s. Forschungsvorhaben) hinaus. 2015 konnte sich die Arbeitsgruppe mit Max Botz, M.Sc. (Maschinenbau) verstärken, der im neuen Projekt MistralWind (siehe Forschungsprojekte) mitarbeiten wird. Zudem konnte Frau Dr. Katja Pinkert gewonnen werden. Sie übernimmt als Postdoktorandin die stellvertretende Leitung der Arbeitsgruppe 6 am cbm und wird die Lehre maßgeblich verstärken.

## 7.2. Abgeschlossene Forschungsvorhaben

### AG Bindemittel und Zusatzstoffe

#### 7.2.1. Einfluss von Temperatur, Zusammensetzung und Konzentration der Lagerungslösung auf Expansionsreaktionen von Granit

Bearbeitung: Dr.-Ing. A. Heisig
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 Prüfungen 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 der Aussage der Praxis und den Ergebnissen im Prüfverfahren. Die Betone 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.

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 (Temperatur, Zusammensetzung und Konzentration der Lagerungslösung) auf die Expansionsreaktionen von Granit untersucht.

Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden ein Prüfzement ($Na_2Oeq$ = 1,2 m.-%) und einer der auffällig gewordenen Granite als Ausgangstoffe herangezogen. Ausgehend von der Rezeptur des Schnellprüfverfahrens der Alkali-Richtlinie (w/z = 0,47, Gesteinskörung/ Zement-Verhältnis = 2,25:1) wurden Mörtelprismen (40x40x160 $mm^3$) hergestellt und bei 80 °C sowie 60 °C in verschiedenen Lagerungslösungen über 12 Monate gelagert. Die vier verwendeten Lagerungslösungen setzten sich folgendermaßen zusammen: 1 molare NaOH-; 0,5; 1 und 2 molare NaCl-Lösung.

Neben der Längen-, Massen- und E-Modul-Änderungen wurden ebenfalls die Porenlösungen nach 28 d und 332 d mittels ICP-OES analysiert sowie lichtmikroskopische Untersuchungen durchgeführt.

Der Einfluss der verschiedenen Lagerungslösungen bei 80 °C sind in Abbildung 1 (links) dargestellt. Sehr hohe Dehnungen traten, wie erwartet, in 1 molarer NaOH-Lösung auf. Für die Proben in NaCl-Lösungen treten unabhängig von der Konzentration bei allen Lagervariationen kaum Dehnungen auf. Ein ähnliches Ergebnis mit etwas geringeren Dehnwerten wird bei einer Lagerungstemperatur von 60 °C erzielt. Bei einer detaillierteren Betrachtung zeigen sich tendenziell für die höher konzentrierten NaCl-Lösungen geringfügig erhöhte Werte gegenüber der weniger konzentrierten Lagerungslösung.

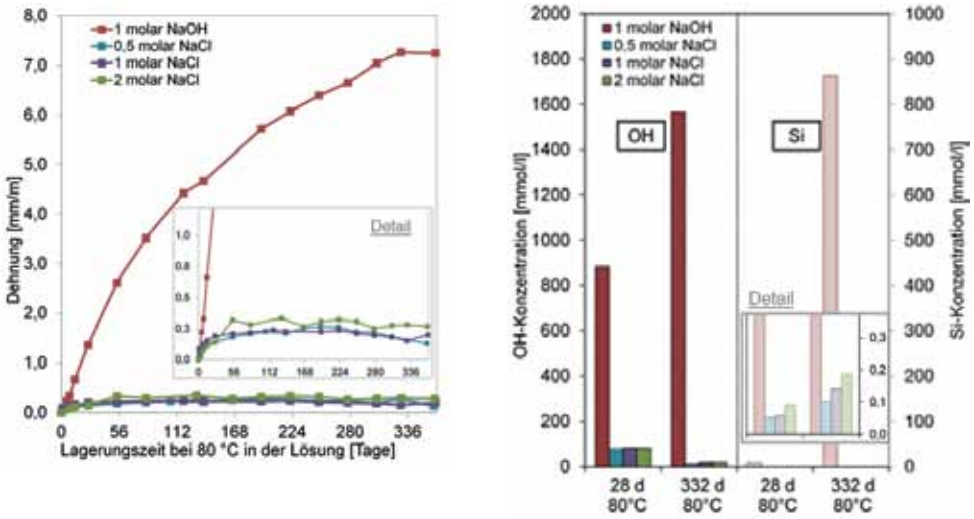



Abbildung 1: Expansion der Prismen bei 80 °C (links); Zusammensetzung der Porenlösung: OH- und Si-Konzentration (rechts)

Die Porenlösungsanalytik zeigt, dass die Si-Konzentration der in NaOH gelagerten Proben erwartungsgemäß mit steigender OH-Konzentration der Porenlösung ansteigt (Abbildung 1, rechts). Bei höherer Temperatur und Lagerungsalter liegt auch eine höhere OH-Konzentration in den Porenlösungen dieser Mörtel vor. Dies spiegelt sich auch an den hohen Dehnungen, die bei den Mörtelprismen in NaOH-Lösung auftreten, wider.

Die OH-Konzentration der Proben, die in NaCl-Lösungen gelagert wurden, nimmt dagegen aufgrund von Auslaugeffekten über die Zeit hinweg ab. Diese zeitlich abhängige Abnahme der OH-Konzentration zeigt sich auch an der K-Konzentration (ohne Abbildung). Dem gegenüber steigt aber die Si-Konzentration in der Porenlösung mit steigender Konzentration

an NaCl in der Lagerungslösung an. Es liegt die Vermutung nahe, dass die NaCl-Konzentration das Löseverhalten von $SiO_2$ beeinflusst [2]. Da es sich allerdings noch um sehr geringe Si-Mengen handelt, äußert sich dies nicht durch Dehnungen am Probekörper.

Das Lösen des $SiO_2$ in die Porenlösung wird indirekt auch anhand von mikroskopischen Untersuchungen sichtbar. Mit zunehmendem Angriffsgrad und Lagerungsdauer treten vermehrt Lösungserscheinungen innerhalb des Granitgefüges auf (Abbildung 2). Auch Risse und AKR-Gelmengen in Poren und Rissen häufen sich.

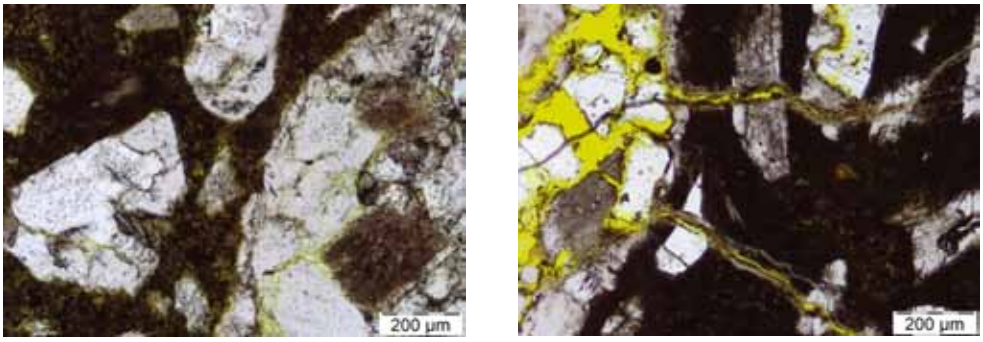



Abbildung 2: Lichtmikroskopische Aufnahmen an Proben in 1 molarer NaOH bei 80 °C: Lagerungsalter 28 d (links) und 332 d (rechts)

In den Proben, die in NaCl-Lösungen gelagert waren, sind bisher keine Lösungserscheinungen erkennbar. Allerdings weisen bei einigen Gesteinskörnern der Proben, die in 2 molarer NaCl-Lösung lagen, erste feine „Linien“ innerhalb des Gesteinsgefüges darauf hin, dass eine beginnende Gesteinsauflösung stattfindet (ohne Abbildung).

Die Untersuchungen zeigen, dass durch Temperatur und Konzentrationserhöhung in beschleunigenden Prüfverfahren das AKR-Schädigungspotential deutlich gesteigert werden kann. Auch kann herausgestellt werden, dass die hier geprüften Granite ausreichende Mengen an $SiO_2$ freisetzen können, um AKR-Schäden auszulösen. Der Beitrag von NaCl aus z.B. Tausalz scheint dabei die Reaktion noch zu begünstigen. Ein Übertrag auf die Praxis ist mit dem vorliegenden Prüfprogramm jedoch nicht möglich. Dennoch finden sich in den lichtmikroskopischen Aufnahmen ähnliche Auflösungserscheinungen an den Granitkörnern, wie sie in etwas geringerem Ausmaß aus Betonbauteilen bzw. Straßendecken bekannt sind.

Literatur

[1] Müller, C.; Borchers, I.; Eickschen, E.: AKR-Prüfverfahren: Auf dem Weg zur Performance-Prüfung. Beton- und Stahlbetonbau, 102, 2007, S. 528 - 538

[2] Dressler, A.: Einfluss von Tausalz und puzzolanischen, aluminiumhaltigen Zusatzoffen auf die Mechanismen einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton, Dissertation TU München, 2013

### 7.2.2. Wirkung von Additiven auf die Lösungsmechanismen von Flugaschen in zementären Systemen

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

Steinkohlenflugaschen (SFA) sind weltweit als Betonzusatzstoffe und Hauptbestandteile im Zement im Einsatz. Durch die SFA können Verarbeitbarkeit sowie Dauerhaftigkeit von Betonen positiv beeinflusst werden. Nachteilig ist hingegen die geringe Frühfestigkeit flugaschereicher Betone, welche durch die später einsetzende puzzolanische Reaktion bedingt ist. Um nun diese Reaktion zu beschleunigen, ohne die Dauerhaftigkeit durch zusätzliche Alkalien zu gefährden, sollen organische Additive zum Einsatz kommen, die eine höhere Lösungsrate des Flugascheglases in der Porenlösung ermöglichen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Lösungsmechanismen von Flugaschegläsern in Abhängigkeit von einer Zugabe organischer Additive untersucht. Das Projekt konzentrierte sich vor allem auf die Wirkung von Triethanolamin (TEA), welches zur Gruppe der Alkanolamine gehört und in der Zementproduktion als Mahlhilfsmittel eingesetzt wird. Die Verwendung von Alkanolaminen kann die Frühfestigkeit von flugaschehaltigen Mörteln steigern. Um die Mechanismen dieser Steigerung systematisch zu untersuchen, wurden in der vorangegangenen Arbeit Lösungsversuche an Steinkohlenflugaschen (SFA) und künstlichen Gläsern durchgeführt. Aus den Lösungsversuchen ging hervor, dass Alkanolamine und Hydroxycarbonsäuren (z.B. Zitronensäure) in der Lage sind, die Löslichkeit von Bestandteilen des Flugascheglases durch eine Komplexierung von Aluminium und Eisen zu erhöhen. Es wurde davon ausgegangen, dass Komplexbildner eine katalytische Funktion erfüllen, die zu höheren Hydratationsraten führt.

Der Nachweis einer katalytischen Wirkung von TEA in Bezug auf gesteigerte Lösungsrate von Aluminium wurde mit Hilfe der Ettringitsynthese aus CaO, Gips und amorphem $Al(OH)_3$ in basischer Lösung mit und ohne Additive angegangen. In dem Filtrat des Syntheseproduktes mit TEA-Zugabe konnte ein 20-facher Al-Gehalt bei einem gleichzeitigen Ettringitzuwachs von 43% im Feststoff im Vergleich zur Referenzprobe ermittelt werden. Ein direkter Nachweis eines komplexierten Aluminiumhydroxides mittels $^{27}$Al-NMR im Endprodukt konnte aufgrund einer sehr niedrigen Al-Konzentration nicht erfolgreich durchgeführt werden. Allerdings wurde der Komplex in der basischen $Al(OH)_3$-TEA-Lösung eindeutig festgestellt. Aus diesem Grund wurde die Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie als eine alternative Analysemethode angewandt. Die Auswertung der FTIR-Spektren brachte einen Hinweis auf ein mögliches Vorhandensein des komlexierten Aluminiumhydroxides auch im Filtrat des Endproduktes. Zusammenführend können alle o. e. Gegebenheiten als ein qualitativer Beleg der katalytischen Wirkung von TEA aufgefasst werden.

Neben der katalytischen Wirkung von TEA wurde ebenfalls die Rolle der SFA-Oberflächenbeläge auf die Glaslösung bzw. auf ihre mögliche Beeinflussung der Additivwirksamkeit untersucht. Hierfür wurden die Flugaschen gewaschen und ihre leicht löslichen Anteile bestimmt. Diese lagen bei der ersten Flugasche (F1) hauptsächlich als Alkalisulfate und Freikalk, und bei der zweiten (F2) als Calciumsulfat vor. Zudem wurde festgestellt, dass Natrium in den gegebenen Flugaschen offensichtlich eher leicht löslich als Natriumsulfat vorkommt, während Kalium zum überwiegenden Teil im Glas gebunden ist.

Die Wärmeentwicklung in den Zementleimen mit 50% Zementtausch durch die gewaschenen und ungewaschenen Flugaschen zeigte einen gewissen Einfluss sowohl von Sulfaten,

als auch von Alkalien aus den Oberflächenbelägen auf das Hydratationsverhalten untersuchter Proben. So kann die Hydratationsreaktion durch die leicht lösliche Alkalisulfate beschleunigt werden. Ebenfalls wurde festgestellt, dass die Oberflächenbeläge einige Bestandteile enthalten können, welche die Chemisorption von Calciumionen auf der Oberfläche der Flugaschepartikel behindern und somit die puzzolanische Reaktion verzögern können. In Bezug auf die Erhöhung der Frühfestigkeiten durch die Additivzugabe konnte keine negative Einwirkung der Oberflächenbeläge festgestellt werden.

Als eine Erweiterung der o. e. Versuche wurde allgemein die Bedeutung von Alkalien, die als Bestandteile von Zement bzw. Flugasche in das System eingetragen werden, in Bezug auf ihre Beeinflussung der Wirkung von TEA verifiziert. Hierfür wurde der zuvor verwendete Zement durch einen alkaliarmen Zement in den Mörtelmischungen ersetzt. Aus dem Vergleich beider Versuchsreihen im Rahmen dieser Studie konnte keine signifikante Behinderung des leistungssteigernden Effektes des TEA durch die Alkalien festgestellt werden.

Da übliche, praxisgerechte Betone nicht mehr ohne der organischen Zusatzmittel wie z.B. Fließmittel auskommen, wurden zusätzlich Untersuchungen zur Interaktion des eingesetzten Additivs mit Betonzusatzmitteln durchgeführt. Hierfür wurde ein handelsübliches Fließmittel auf PCE-Basis ausgewählt und in den Mörtelmischungen mit Triethanolamin kombiniert. Die Wechselwirkung zwischen den TEA-optimierten flugaschehaltigen Zementen und einem Fließmittel wurde durch die Bestimmung der Festigkeitsentwicklung von 1 bis zu 28 Tagen, sowie des Ausbreitmaßes des Frischmörtels verfolgt. Während die Zugabe von TEA zu den fließmittelfreien Mischungen einen Trend in Richtung höherer Frühfestigkeiten zeigt, bleibt dieser Trend in den TEA-PCE-Proben aus. Somit konnte anhand der Untersuchungsergebnisse keine positive Wechselwirkung zwischen dem Einsatz von Triethanolamin in Kombination mit dem in dieser Studie verwendeten Fließmittel festgestellt werden.

### 7.2.3. AKR-Vermeidung durch Flugasche – Langzeitlagerung

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

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, das Verhalten flugaschehaltige Betone, die alkalireaktive Gesteinskörnung enthalten, bis zu einem Alter von 9 bis 11 Jahren unter freier Bewitterung zu beurteilen. Dafür wurde die Rissbildung an etwa 90 Betonwürfeln (30 cm Kantenlänge) unterschiedlichster Zusammensetzung bestimmt.

Die Entwicklung der Rissweiten wurde an Betonwürfeln aus Normalbetonen und selbstverdichtenden Betonen mit unterschiedlichen reaktiven Gesteinskörnungen (Grauwacke, Splitt/Kies aus dem Oberrheingebiet, Kies mit Opalsandstein/Flint, Abbildung 1, links) und Bindemittelkombinationen untersucht. Es wurden Zemente (CEM I) mit verschiedenen Alkaligehalten ($Na_2O_{eq}$ = 0,65 – 1,20 M.-%) und hüttensandhaltige Zemente (CEM II/A-S, CEM III/A-S, CEM III/B-S) eingesetzt. In weiteren Betonmischungen wurden die Zemente anteilig durch drei Flugaschen mit verschiedenen Alkaligehalten bzw. Feinheiten und einem Kalksteinmehl, als inerten Betonzusatzstoff, ausgetauscht (Abbildung 1, rechts).

Bei Proben mit Rissweiten von weniger als 0,1 mm wird bislang nicht vom Vorhandensein einer schädigenden AKR ausgegangen. Probekörper mit Rissweiten von 0,1 mm stehen unter besonderer Beobachtung.

Ein Zementaustausch von mindestens 30 M.-% Flugasche (F1, F2, F3) bei Betonproben mit dichten und langsam reagierenden Gesteinskörnungen (Grauwacke, Splitt/Kies Oberrhein) bewirkt eine Begrenzung der Rissweiten auf maximal 0,1 mm. Ein Austausch von 25 M.-% F2 (gesichtete Flugasche mit hoher Feinheit) und F3 (alkaliarme Flugasche) bei Bindemittelgehalten von 400 kg/m³ verhindert das Auftreten von Rissen gänzlich. Die Verwendung von Zementen mit einem Alkaliäquivalent von weniger als 0,65 M.-% bzw. die Anwendung von hüttensandhaltigen Zementen mit einem Hüttensandanteil von mehr als 42 M.-% bei Betonproben mit Grauwacke bewirkt ebenfalls eine Begrenzung der Rissweiten auf unter 0,1 mm.

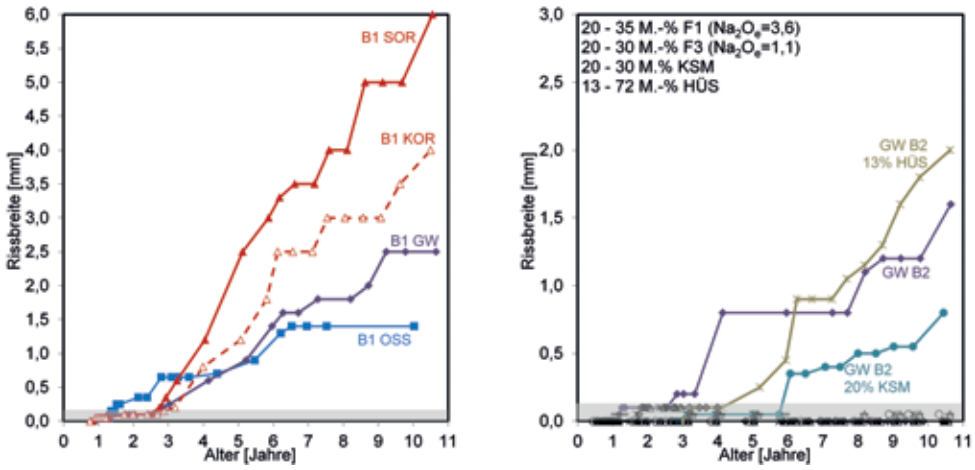



Abbildung 1: Rissbreitenentwicklung von Betonwürfeln (30 cm Kantenlänge) unter freier Bewitterung:
links – Betone mit verschiedener reaktiver Gesteinskörnung (z = 500 kg/m³, w/z = 0,5, CEM I ($Na_2O_{eq}$ = 1,2 M.-%)), SOR = Splitt aus dem Oberrheingraben, KOR = Kies aus dem Oberrheingraben, GW = präkambrische Grauwacke, OSS = Kies mit Opalsandstein / Flint;
rechts – Betone mit verschiedenen Betonzusatzstoffen (z = 400 kg/m³, w/z = 0,45, CEM I ($Na_2O_{eq}$ = 1,2 M. %), Grauwacke), F1 = Steinkohlenflugasche ($Na_2O_{eq}$ = 3,6 M.-%), F2 = Steinkohlenflugasche ($Na_2O_{eq}$ = 1,1 M.-%), KSM = Kalksteinmehl, HÜS = Hüttensand

Die Probekörper mit Opalsandstein/Flint als reaktive Gesteinskörnung zeigen hohe Rissweiten bei Verwendung von 15 M.-% bzw. 30 M.-% Kalksteinmehl. Ein Anteil von 35 M.-% Flugasche (F1) verringert die Rissbreiten auf maximal 0,1 mm.

Die selbstverdichtenden Betone (Grauwacke, Splitt/Kies Oberrhein) mit Flugasche weisen nach 10 Jahren Lagerung im Freien Rissweiten von maximal 0,1 mm auf. Selbstverdichtende Betone mit Kies, der Opalsandstein und Flint enthält, zeigen bei einem Mindestgehalt von 35 M.-% Flugasche ebenfalls keine Schädigungserscheinungen infolge AKR.

Die Ergebnisse der Langzeitlagerung an Betonen mit potentiell AKR-reaktiver Gesteinskörnung (Kies mit Opalsandstein/Flint, präkambrische Grauwacke, Splitt und Kies aus dem Oberrheingraben) zeigen, dass nach einer Lagerungszeit zwischen 9 bis 11 Jahren durch den Einsatz von mindestens 30 M.-% Flugasche bei dichten, langsam reagierenden Gesteinskörnungen (Grauwacke, Splitt Oberrhein) auch bei Zementen mit hohem Alkaligehalt eine schädigende AKR vermieden werden kann. Bei porösen, schnell reagierenden Gesteinskörnungen (Opalsandstein/Flint) sollten bei Flugaschen mit hohen Alkaligehalten mindestens 35 M.-% Flugasche eingesetzt werden. Auch in diesem Fall kann dann mit Zementen mit hohen Alkaligehalten ($Na_2O_{eq}$ = 1,2 M.-%) gearbeitet werden.

## AG Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine

### 7.2.4. Bestimmung der Verfahrenspräzision des modifizierten Micro-Deval-Verfahrens nach TP Gestein-StB, Teil 5.5.3

| | |
|---|---|
| Projektleitung | Ltd. Akad. Dir. Dr.-Ing. Thomas Wörner |
| Sachbearbeitung | Dipl.-Geol. Dr. rer. nat. Sara Neidinger,<br>Dipl.-Geol. Dr. rer. nat. Erhard Westiner |
| Auftraggeber | FGSV 1/2014<br>AG Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln |

Die mechanische Festigkeit von Baustoffgemischen bzw. Gesteinskörnungen für Bettungs- und Fugenmaterialien nach TL Pflaster-StB unter Bezug zu den TL Gestein-StB wird über den Widerstand gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch oder dem Los-Angeles-Prüfverfahren beschrieben. Die hierfür zugrunde liegenden Prüfkörnungen 8/12,5 mm bzw. 10/14 mm bilden aber nicht den bei Bettungs- und Fugenmaterialien wichtigen Kornbereich von 0/5,6 mm ab, dies ist jedoch mit dem modifizierten Micro-Deval-Verfahren möglich. Der dabei festgestellte modifizierte Micro-Deval-Koeffizient (MMDE) bzw. Abriebwert (AMMD) stellt gegenüber den Prüfverfahren zum Widerstand gegen Zertrümmerung ein wesentlich geeigneteres Maß zur Beschreibung der mechanischen Festigkeit von Bettungs- und Fugenmaterial dar.

Das in den TP Gestein-StB, Teil 5.5.3 beschriebene modifizierte Micro-Deval-Verfahren soll für den Bereich der Bettungs- und Fugenmaterialien nach TL Pflaster-StB national weiterentwickelt werden. In dem vorliegenden Forschungsprojekt sind die bislang fehlenden Angaben zur Verfahrenspräzision zu ermitteln. Die Bestimmung der Präzision des modifizierten Micro-Deval-Verfahrens erfolgt im Rahmen eines Ringversuches. Hieran sollen auftragsgemäß mindestens zwölf Prüfstellen teilnehmen und drei Prüfniveaus berücksichtigt werden, um sowohl die Vergleichs- als auch die Wiederholpräzision ermitteln zu können. Grundlage für die Durchführung und Auswertung des Ringversuches ist das „Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen“.

Insgesamt hatten 22 Prüfstellen ihre Teilnahme am Ringversuch zur Bestimmung der Verfahrenspräzision des Modifizierten Micro-Deval-Verfahrens nach TP Gestein-StB, Teil 5.5.3 zugesagt (12 Prüfstellen aus Deutschland; 7 Prüfstellen aus Frankreich, jeweils eine Prüfstelle aus Österreich, der Schweiz und Luxemburg); 17 Prüfstellen haben letztlich Ergebnisse gemeldet. Für das Modifizierte Micro-Deval-Verfahren wurde ein breiter Bewertungshintergrund erstellt, der zum Zeitpunkt der Auswahl der Proben für den Ringversuch ca. 50 verschiedene Materialien umfasste. Im Rahmen der Erstellung des Bewertungshintergrundes für das Modifizierten Micro-Deval-Verfahrens hat sich gezeigt, dass das Verfahren eine hohe Spreizung bei den Ergebnissen aufweist und damit eine gute Differenzierung unterschiedlicher Qualitätsstufen ermöglicht. Der Bewertungshintergrund umfasst bislang Gesteinskörnungen mit einem Wertebereich von 14 bis 63. Die Auswahl der Proben erfolgte auf der Grundlage des Bewertungshintergrundes. Es wurde hierbei darauf geachtet, mit den drei Prüfniveaus die gesamte Spanne des Prüfverfahrens, welche bislang von 14 bis 63 reicht, sowie unterschiedliche Gesteine/Gesteinsgruppen zu erfassen. Es wurden die folgenden drei Gesteine (Gesteinskörnungen) für den Ringversuch ausgewählt:

| | |
|---|---|
| Messniveau 1 | Diabas aus Oberfranken mit MMDE kleiner 20 |
| Messniveau 2 | carbonatischer Kies gebrochen aus Oberbayern mit MMDE von ca. 30 |
| Messniveau 3 | Kalkstein aus dem unteren Muschelkalk Nordbayerns mit MMDE von ca. 60 |

Im Rahmen des Ringversuches fiel hinsichtlich der Gerätenutzung auf, dass das Micro-Deval-Verfahren im europäischen Ausland (insbesondere in Frankreich, Luxemburg und der Schweiz) deutlich häufiger zum Einsatz kommt (bis zu 50 Prüfungen pro Jahr) als in Deutschland (wenige Prüfungen pro Jahr). Ursächlich hierfür ist, dass das Micro-Deval-Verfahren in den französischsprachigen Ländern im Regelwerk mit Anforderungen an die groben Gesteinskörnung verankert ist. Erfahrungen mit dem Modifizierten Micro-Deval-Verfahren können nur wenige Prüfstellen vorweisen.

Die statistische Auswertung des Ringversuches erfolgte nach dem „Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen Teil 2: Erkennen und Behandeln von Ausreißern“ und „Teil 4: Auswertung von Ringversuchen und Errechnung von Prüffehlern“. In der statistischen Auswertung konnten die Ergebnisse von 15 der 17 Prüfstellen berücksichtigt werden. Nach der Ausreißerprüfung müssen 6 der insgesamt 90 Ergebnisse (15 Prüfstellen à 6 Ergebnisse aus 3 Messniveaus) als echte Ausreißer betrachtet werden. Diese werden bei der weiteren Auswertung auch nicht berücksichtigt. Die Auswertung zeigt, dass sowohl die Standardabweichungen unter Wiederholbedingungen als auch die Standardabweichungen unter Vergleichsbedingungen eine deutliche Abhängigkeit vom Zahlenwert (MMDE) aufweisen. Deshalb wurden die Präzisionsdaten in Abhängigkeit vom Messniveau angegeben. Die entsprechenden Werte der Standardabweichung für Einfachbestimmungen, der Standardabweichungen unter Wiederhol- und Vergleichsbedingungen, sowie die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit sind in nachfolgender zusammengestellt. Es wird empfohlen, die Präzisionsdaten in die Prüfvorschrift (TP Gestein-StB, Teil 5.5.3) aufzunehmen.

**Endergebnisse der Ringanalyse zum Modifizierten Micro-Deval-Verfahren**

| | | |
|---|---|---|
| Standardabweichung für Einfachbestimmung | $s_a$ | 0,572 |
| Zulässige Spannweite | $d_a$ | 1,58 |
| Standardabweichung unter Wiederholbedingungen | $s_r$ | $0{,}033 \cdot MM_{DE} - 0{,}222$ |
| Standardabweichung unter Vergleichsbedingungen | $s_R$ | $0{,}041 \cdot MM_{DE} + 0{,}550$ |
| Wiederholpräzision (2,77 $s_r$) | r | $0{,}091 \cdot MM_{DE} - 0{,}615$ |
| Vergleichspräzision (2,77 $s_R$) | R | $0{,}114 \cdot MM_{DE} + 1{,}524$ |

## AG Zerstörungsfreie Prüfung

### 7.2.5. Zerstörungsfreie Prüfung an Hochgeschwindigkeits-Impact Proben

**MEMIN II (Multidisciplinary Experimental and Modeling Impact Crater Research Network)**

Bearbeitung: Manuel Raith M. Sc.

Impactprozesse stellen eine der prägenden Mechanismen der Strukturbildung im Sonnensystem dar. Vor allem in der Frühzeit des Sonnensystems waren heftige Kollisionen ein allgegenwärtiger Prozess. Auch heute lassen sich sowohl auf der Erde, als auch auf anderen Himmelkörpern Impactereignisse beobachten. Um den Mechanismus des Einschlages und der daraus resultierenden Schädigung besser zu verstehen, wurden am Ernst-Mach-Institut in Freiburg entsprechende Experimente durchgeführt. Dabei wurden mit Hilfe einer zweistufigen Leichtgaskanone Hochgeschwindigkeits-Impacte im Labormaßstab nachgestellt. Im Rahmen des Teilprojektes „Geophysikalische Untersuchungen zur Kraterentstehung im Labor“ wurde das Target sowohl während des Impacts, als auch danach einge-

hend untersucht. Es kamen unterschiedliche Methoden der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) zur Anwendung.

Die zerstörungsfreie Prüfung ermöglicht in vielen Bereichen die Charakterisierung und Bewertung von Bauteilen und Materialien. Auch für die Bewertung von Schäden ist die ZfP von besonderer Bedeutung. Dies gilt insbesondere, da bei den übrigen Verfahren stets in Betracht gezogen werden muss, dass der Schaden erst durch die Untersuchung eingebracht wurde. Beispielsweise Kernbohrungen oder Dünnschliffe stellen einen erheblichen Eingriff in das untersuchte Material dar.

Abbildung 1: Target mit Beschleunigungssensoren

Um die Ausbreitung der beim Aufschlag entstehenden Schockwelle zu analysieren, wird im Zuge der Impactexperimente ein System zur Schallemissionsanalyse installiert. Ein Teil des Systems sind Beschleunigungssensoren, die an der Oberfläche des Probekörpers befestigt werden. Mit diesen Sensoren wird die durch den Impact ausgelöste elastische Welle aufgenommen und im Weiteren mit einem geeigneten Datenrekorder aufgezeichnet.

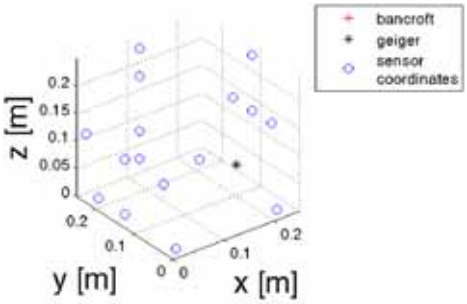



Abbildung 2: Impactposition berechnet aus Ersteinsätzen

Durch die Verwendung von 16 Sensoren konnte der Einschlagpunkt mit einer Abweichung von 1,5 cm bestimmt werden.

Ein weiterer Aspekt des Projektes war die Charakterisierung des Impactschadens innerhalb des Targetwürfels. Dazu wurden zwei unterschiedliche Ultraschallverfahren angewandt. Der geschädigte Bereich konnte mit Hilfe der Ultraschalltomografie abgebildet werden. Dabei wurde festgestellt, dass die verwendeten Targetwürfel für die Experimente nur eingeschränkt geeignet waren. Sichtbar wird das am Rand des Probekörpers, wo Bereiche mit reduzierter Ausbreitungsgeschwindigkeit auftreten. Diese decken sich mit Rissen, die bei hoch belasteten Probekörpern an der Oberfläche sichtbar wurden. Erklärt wird dies mit der Phasenumkehr der Druckwelle am Rand des Probekörpers, was zu starken Zugbelastungen und damit zur Ablösung einzelner Teile führt.

## 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. Carbonatisierung von zementgebundenen Baustoffen mit $CO_2$ unter erhöhtem Druck oder im überkritischen Zustand**
Bearbeitung: Dr.-Ing. L. Urbonas
Förderer: DFG

### AG Betontechnologie

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

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

**7.3.9. Einfluss von $CO_2$-Druck und Betonfeuchtegehalt auf das Porengefüge des Betons während der Carbonatisierung**
Bearbeitung: Dipl.-Ing. C. Thiel
Förderer: DFG

**7.3.10. Modellierung des Einflusses der Temperatur auf das Tragverhalten von Verbunddübeln unter dauerhafter Lasteinwirkung**
Bearbeitung: Dipl.-Ing. T. Kränkel
Förderer: HILTI AG/ fischerwerke GmbH

**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“

## AG Stahl und Korrosion

**7.3.13 Beurteilung der Korrosionsschutzwirkung bei Betonstahl, der mit Epoxidharz pulverbeschichtet ist**
Bearbeitung: Dipl.-Ing. M. Zintel
Förderer: Industrie

**7.3.14. Korrosionsverhalten von Stahl in Beton bei Instandsetzungsprinzip W-Cl in gerissenem Beton**
Bearbeitung: Florian Hiemer, M.Sc
Förderer: DFG

**7.3.15. Korrosionsmonitoring in Rissbereichen realer Stahlbetonbauteilen**
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. Gütebewertung der zerstörungsfreien Detektion von Korrosion in Stahlbetonbauwerken**
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

### AG Chemie

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

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

### AG Zerstörungsfreie Prüfung

#### 7.3.20. MAIzfp: Kombinierte zerstörungsfreie Prüfmethoden zur Qualitätssicherung von Faserverbundwerkstoffen

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

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

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

#### 7.3.22. COST TU1404

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

## 7.4. Neue Forschungsvorhaben

### AG Bindemittel und Zusatzstoffe

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

Bearbeitung: K. Fischer, M.Sc.
Förderer: DFG

Im April 2015 wurde ein Fortsetzungsantrag zum Thema: „Einfluss von Tausalz und aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen der Alkali-Kieselsäure Reaktion in Beton“ durch die DFG bewilligt.

In Deutschland sind Schäden infolge einer Alkali-Kieselsäure Reaktion (AKR) im Beton durch die Verwendung von alkalireaktiven Gesteinskörnungen (z.B. Opalsandstein, Flint, Grauwacke) bekannt. Ursache war hier die Verwendung reaktiver Gesteinskörnungen, die zusammen mit den Alkalien des Zementsteines und der Einwirkung von Wasser quellfähige Gele bilden. Überschreitet die Quellspannung der Gele die Festigkeit der Zementsteinmatrix, kommt es zu Rissen in der Matrix und fortlaufend zu einer Schädigung des Betons. In neuerer Zeit sind bekanntlich auch an Beton-Fahrbahndecken Schäden aufgetreten, die nach ersten Untersuchungsergebnissen auf eine AKR zurückzuführen sind. Durch den steigenden Streusalzeinsatz des Winterdiensts erfolgt ein zunehmender, externer Alkalieintrag in die mit Tausalz beaufschlagten Betonbauteile. Gerade in Bereichen mit Vorschädigungen durch Risse kann Feuchtigkeit eindringen und verstärkt Alkalien ins Bauteilinnere transportieren.

Diese AKR-Schadensfälle deuten darauf hin, dass hier die Alkalizufuhr von außen eine schädigende AKR verursacht oder verstärkt hat. Die veröffentlichten Untersuchungsergebnisse zum Einfluss des Alkalieintrags von außen auf eine AKR und auch die Ergebnisse aus dem ersten Förderabschnitt bestätigen diese Vermutung.

Ziel des zweiten Förderabschnittes ist die Charakterisierung des Schadensablaufs einer AKR bei natürlichen Gesteinskörnungen unter praxisnahen Temperaturbedingungen in Gegenwart von NaCl und unter Berücksichtigung des Beitrags aluminiumhaltiger Zusatzstoffe im Bindemittel zur Zusammensetzung und Quellfähigkeit von AK-Gelen.

Ein wesentlicher Fokus liegt dabei auf dem Vergleich der Schädigungsmechanismen und -abläufe in Betonen mit sehr alkalireaktiver, synthetischer Gesteinskörnung und Betonen mit reaktionsträgen natürlichen Gesteinskörnungen (Diabas, Granit). Insbesondere soll dabei, als neuer Ansatzpunkt, der Einfluss silicatischer Spezies in der Betonporenlösung auf die Bildung von AK-Gel betrachtet werden. Welchen Effekt übt dabei die Beschaffenheit (v.a. mineralogische Zusammensetzung und Gefügeausbildung) der reagierenden Gesteinskörnung aus? Weiterhin wird diesbezüglich die Wirkung von Temperaturvariationen und die Zusammensetzung der eingetragenen Salze (NaCl oder KCl) auf die Bildung bzw. Stabilitäten der silicatischen Spezies untersucht. Anhand dieser Ergebnisse kann ein Zusammenhang zwischen Zusammensetzung und Quellfähigkeit der Gele sowie einer damit verbundenen Schädigung des Betons hergestellt werden.

Zur Vollendung des Untersuchungsprogramms des ersten Förderabschnittes soll daher die Lagerung der bereits bestehenden Feinbetonprismen fortgesetzt werden. Die zweite Förderperiode ermöglicht es, weitere offen gebliebene und neu entstandene Fragen zu beantworten:

- Wie verändert sich die Betonporenlösung bei längeren Lagerungszeiten während einer ablaufenden AKR bei natürlichen Gesteinskörnungen in Gegenwart von NaCl und welche Effekte treten auf?
- Kann NaCl dazu führen, dass auch bisher als nicht reaktiv geltende Gesteinsarten, wie Granit und Diabas, eine schädigende AKR im Beton auslösen?
- Wie setzen sich die durch NaCl-Eintrag gebildeten AK-Gele zusammen und welchen Einfluss hat hierbei das verwendete Bindemittel (Zement und Zusatzstoffe) und die Beschaffenheit der reagierenden Gesteinskörnung?
- Welche silicatischen Spezies bilden sich in der Betonporenlösung im Beisein von NaCl und inwiefern korreliert deren Gehalt mit dem Ausmaß einer AKR? Bilden sich dieselben Spezies auch bei KCl?
- Forcieren winterliche Temperaturen bei gleichzeitiger Tausalzbeanspruchung durch die beobachteten Veränderungen der Porenlösung eine schädigende AKR, trotz einer temperaturbedingten Verlangsamung der chemischen Reaktionen?

## AG Betontechnologie

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

Bearbeitung: S. Illguth, M.Sc.
Förderer: BMVI / BASt

Waschbetonfahrbahndecken erfüllen bei ausreichender Texturtiefe und hohem Polierwiderstand der groben Gesteinskörnung sicher die bauvertraglichen Anforderungswerte an die Griffigkeit. Bislang existiert jedoch vergleichsweise wenig Kenntnis über die langfristige Dauerhaftigkeit der Griffigkeit dieses Oberflächentyps. Daher ist es wünschenswert, hier über ein ausreichend sicheres Prognoseverfahren zu verfügen, mit dem die Fragen der längerfristigen Entwicklung der Griffigkeit auf Waschbetonstrecken ausreichend sicher geklärt werden können. Insbesondere ist von Interesse, welche Eigenschaften der Oberfläche und der groben Gesteinskörnung für den langfristigen Erhalt einer ausreichenden Griffigkeit ausschlaggebend sind.

Für Asphaltoberflächen ist eine Korrelation von Griffigkeitswerten, gemessen mit der Wehner/Schulze-Prüfung und mit dem Seiten-Kraft-Messverfahren, bekannt. Inwieweit diese Korrelation auch für Waschbetonoberflächen brauchbare Anhaltswerte liefert, ist derzeit noch unklar. Sicher ist derzeit hingegen, dass die von der Polieranlage Wehner/Schulze aufgebrachte Polierung auf Betonoberflächen weit weniger wirksam ist, als dies von Asphaltoberflächen bekannt ist. Vorangegangene Forschungsvorhaben haben gezeigt, dass die Prüfanlage Wehner/Schulze ohne Modifizierung nur bedingt geeignet ist, die Griffigkeit von Betonoberflächen zu prognostizieren. Derzeit kann eine realitätsnahe Oberflächenpolierung nur mit deutlich verlängerter Polierdauer erreicht werden. Neben der deutlich verlängerten Polierdauer findet ein höherer Verschleiß der Prüfgummis zur Messung der Bremsverzögerung auf Waschbetonoberflächen statt, vgl. Abb..

Abbildung:
Messgummis zur Griffigkeitsbestimmung;
vorn: beansprucht nach einer Griffigkeitsmessung bei Waschbeton;
hinten: unbeansprucht

Möglicherweise hängen beide Phänomene zusammen, weil sowohl beim Polieren als auch beim Bremsen die bei Waschbeton fehlende Kornorientierung zu sehr wenigen, dafür aber scharfkantigen Kontaktpunkten führt. Bei den konventionellen Gesteinskörnungs- und Asphaltprüfungen hat die durch Walzen oder Legen der Körnung erzeugte Oberfläche eine deutlich unkritischere Orientierung der groben Gesteinskörnung. Fehlt diese, wie z. B. bei abgestreutem Gussasphalt, zeigen sich auch bei Asphaltprüfungen ähnliche Schwierigkeiten bei der Verwendung der Prüfanlage Wehner/Schulze.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es daher, zunächst durch technische Anpassung die Prüfanlage Wehner/Schulze zu ertüchtigen, um unter sinnvollen Rahmenbedingungen hinsichtlich Prüfdauer und Messgummiverschleiß aussagekräftige Prognosen für die Griffigkeit von Waschbetonoberflächen zum Zeitpunkt der Verjährung der Mängelansprüche sowie für das sich endgültig einstellende stabile Griffigkeitsniveau während der Nutzungsdauer zu erzielen. Im Ergebnis soll eine Prüfvorrichtung zur Bewertung der Griffigkeitsentwicklung von Waschbeton-Oberflächen zur Verfügung stehen, mit der systematisch die verschie-

denen Einflussfaktoren auf die Griffigkeit untersucht werden können. Ziel des Projektes ist neben einer funktionierenden Griffigkeitsprognose für Waschbetonoberflächen auch eine Empfehlung für die Erzeugung dauerhaft griffiger Waschbetonoberflächen, um den Erhaltungsaufwand für eine ausreichende Griffigkeit während der Liegedauer zu minimieren.

### 7.4.3. Rheology and Workability Testing of Deep Foundation Concrete

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

Betone für den Spezialtiefbau, etwa zur Herstellung von Bohrpfählen oder Schlitzwänden im Kontraktorverfahren, enthalten neben den klassischen Komponenten Zement, Wasser und Gesteinskörnung vermehrt auch hohe Gehalte an Zusatzstoffen und -mitteln. Neben Flugaschen, Kalksteinmehlen und Silicastäuben kommen insbesondere auch verflüssigende Zusatzmittel zum Einsatz. So wird die sehr weiche bis fließfähige Konsistenz der Spezialtiefbaubetone realisiert, welche für das Einbringen im Kontraktorverfahren notwendig ist. Hinzu kommt, dass die Spezialtiefbaubetone oft hohe Gehalte an Verzögeren aufweisen, um eine gleichbleibend gute Verarbeitbarkeit des Betons während des meist über mehrere Stunden andauernden Betoniervorgangs zu gewährleisten. Nur so können die vollständige Formfüllung und Einbettung der Bewehrung sichergestellt werden, welche notwendig sind, um die an das Tiefbauwerk gestellten strukturellen Anforderungen sowie eine geringe Wasserdurchlässigkeit zu erfüllen.

Bodenaushub zur Herstellung eines Schlitzwandelements

Obwohl sich die Mischungszusammensetzung der Spezialtiefbaubetone maßgeblich verändert hat, kam es bis dato zu keiner Anpassung der Prüfverfahren zur Beurteilung deren Verarbeitbarkeit. So wird die Verarbeitbarkeit der auf der Baustelle ankommenden Betone i.d.R. lediglich durch das Ausbreitmaß und/oder das Setzmaß nach DIN EN 12350 beurteilt. Beide Werte geben indirekt Auskunft über die Fließgrenze des Betons. Für die Formfüllung entscheidende rheologische Eigenschaften wie die Viskosität und die Thixotropie des Betons bleiben dagegen gänzlich außer Acht. Gerade die Viskosität und die Thixotropie des Betons sind es jedoch, die durch den Einsatz von Betonzusatzstoffen und -mitteln maßgeblich beeinflusst werden. Eine zuverlässige Vorhersage der vollständigen Formfüllung auf Grundlage der auf der Baustelle durchgeführten Frischbetonprüfungen ist somit nicht möglich.

Das Projekt befasst sich daher mit der Rheologie und Verarbeitbarkeit von Betonen für den Spezialtiefbau. Das Ziel ist es, ein fortschrittliches Konzept zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit der Betone auf der Baustelle zu entwickeln. So soll eine zuverlässige Vorhersage der Formfüllung tiefer Bohrpfähle und Schlitzwände gewährleistet werden. Um

die praktische Anwendbarkeit des Konzepts zu gewährleisten, muss dieses auf einfach zu handhabenden Prüfverfahren basieren, welche die Bestimmung eines Maßes für die Fließgrenze und die Viskosität der Betone unter Baustellenbedingungen ermöglichen. Des Weiteren soll das Konzept den für die Formfüllung wichtigen thixotropen Strukturaufbau durch geeignete praxistaugliche Prüfverfahren zielsicher erfassen. Um dies zu erreichen, muss zunächst geklärt werden, welche Frischbetonprüfverfahren geeignet sind, ein Maß für die Fließgrenze, die Viskosität und die Thixotropie zu bestimmen. Zu diesem Zweck werden klassische Verarbeitbarkeitstests wie Ausbreit- und Setzfließversuch sowie L-Kasten-Versuch mit rheologischen Untersuchungen in einem Rotationsrheometer kombiniert. Die Versuche sollen auf verschiedenen Baustellen durchgeführt werden, um ein möglichst breites Spektrum der realen Spezialtiefbaubetone zu erfassen. Andererseits kann so die Anwendbarkeit der Prüfverfahren unter Praxisbedingungen sichergestellt werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen die mit den untersuchten Betonen hergestellten Bohrpfähle oder Schlitzwandelemente im Nachhinein freigelegt (ausgegraben) und deren Oberflächenoptik dokumentiert werden. Dies ermöglicht es, die am Frischbeton ermittelten Maße für die Fließgrenze, die Viskosität und die Thixotropie mit den sich ausbildenden Formfüllungseigenschaften zu verknüpfen. Ergänzend sollen in Laborversuchen weitere Spezialtiefbaubetone mit einer möglichst großen Variation ihrer rheologischen Kennwerte geprüft werden, um den Bereich der in der Praxis auftretenden rheologischen Eigenschaften zu ergänzen.

Das abschließende Ziel des Projekts ist es, für die mittels praxistauglicher Verarbeitbarkeitstests bestimmten Maße für die Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie der Spezialtiefbaubetone Akzeptanzkriterien festzulegen, die eine vollständige Formfüllung und Einbettung der Bewehrung der Bohrpfähle und Schlitzwände gewährleisten. So wird es dem Bauunternehmer einerseits ermöglicht, dem liefernden Transportbetonwerk die geforderten Frischbetoneigenschaften (Akzeptanzkriterien) mitzuteilen. Andererseits besitzt der Bauunternehmer durch die Akzeptanzkriterien eine Entscheidungshilfe, ob ein Beton bei der Anlieferung anzunehmen ist, oder ob er aufgrund von Werten außerhalb der Akzeptanzkriterien zurückzuweisen ist. So wird die Herstellung qualitativ hochwertiger Tiefbauwerke, welche den strukturellen Anforderungen sowie den Anforderungen an eine geringe Wasserdurchlässigkeit sicher genügen, begünstigt.

## AG Stahl und Korrosion

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

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

Die Erhaltung der alternden Infrastrukturbauwerke stellt in den nächsten Jahren hohe Anforderungen an Ingenieure, um die Mobilität unserer modernen Gesellschaft sicherzustellen. Dabei ist die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion in der Regel der lebensdauerbestimmende Faktor in der Geschichte eines Stahlbetonbauwerkes. Ziel des Forschungsvorhabens ist, dem Ingenieur in der Praxis ein Mess- und Auswertekonzept in die Hand zu legen, mit dem verdeckt korrodierende Bereiche in Stahlbetonbauwerken zuverlässiger und ortsaufgelöst identifiziert und prognostiziert werden können, um Bauwerksmessungen optimal analysieren und verwerten zu können.

Für die Lebensdauerprognose von Stahlbetonbauwerken stehen voll-probabilistische Dauerhaftigkeitsmodelle für Einleitung- und Fortschrittphase der Korrosion zur Verfügung. Diese Modelle liefern bis heute aber nur punktuelle Aussagen zum Bauwerkszustand, d. h. eine Versagenswahrscheinlichkeit wird an jeder Stelle einer großen Fläche oder für das gesamte Bauwerk als gleich groß angenommen. Räumliche Streuungen von Materialwiderständen oder Einwirkungen bleiben unberücksichtigt. Mit der Potentialfeldmessung steht aber ein Messverfahren zur Detektion von Korrosion zur Verfügung, welches örtlich differenzierte Aussagen zum Bauwerkszustand ermöglicht.

Zur probabilistischen Nutzung der Potentialfelddaten werden im Antrag die Einflussfaktoren der Potentialfeldmessung und deren Korrelationen auf die Prüfqualität der Potentialfeldmessung systematisch analysiert. Die Zuverlässigkeit der Potentialfeldmessung wird mit Hilfe von Probability of Detection (POD) Modellen quantifiziert. Aus den Informationen zur POD der Potentialfeldmessung kann die probabilistische Zustandsbewertung mit den Inspektionsdaten aus einer realen Potentialfeldmessung auf Basis der Bayes'schen Statistik aktualisiert werden. Die Überprüfung des entwickelten, zuverlässigkeitsbasierten Mess- und Auswertekonzepts erfolgt an geeigneten Referenzbauwerken.

Mit Hilfe dieses Mess- und Auswertekonzeptes kann eine zustandsbasierte Inspektions- und Instandsetzungsplanung realisiert werden, welche erstmals alle zur Verfügung stehenden Informationen eines Bauwerkes (Inspektionsdaten) und die vorhandenen voll-probabilistischen Dauerhaftigkeitsmodelle auf flächiger Basis kombiniert.

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

Bearbeitung: Dr.-Ing. Sylvia Keßler, Dr. Ueli Angst
Förderer: DFG/ SNF (Schweizer Nationalfond)

Although reinforced concrete, the worldwide most common construction material, is normally a durable material, it may deteriorate due to a variety of mechanisms which is almost related to transport mechanism of different ions. The environment with which the concrete is in contact is typically very different from the internal concrete. Thus, there is a strong driving force for mass transport such as hydroxide leaching or chloride penetration. In addition, reactions between the constituents of concrete and the exposure environment are likely to occur that also lead to differences in concrete chemistry with distance from the exposed surface. Thus, as a result of exposure, profiles of sodium, potassium, hydroxide, chloride and other ionic species with increasing depth from the exposed surface are typically present in concrete. This leads to diffusion potentials in the cover zone of concrete. Diffusion potentials may easily reach several tens of millivolts or exceed 100 mV. A major influence has been identified in gradients in pH and the higher anions mobility in comparison to the complementing cations. Diffusion potentials in concrete have a significant effect on measurements in practice (potential mapping, corrosion monitoring, etc.) and on research related to durability of reinforced concrete. The present state of the art only allows a qualitative assessment of diffusion potentials, such as the sign of the diffusion potential arising under certain circumstances. The magnitude may be predicted given the main cause are differences in pH and the absence of perm-selective action (porous mortar or concrete). For other differences in pore solution chemistry (e.g. chloride profiles etc.) or for denser concrete, prediction and interpretation of diffusion potentials is currently associated with large uncertainties, if not impossible.

The overall objective of this project is to significantly increase the understanding of diffusion potentials arising in concrete. The situations of main interest are those of practical relevance, i.e. conditions arising from chloride and sulphate exposure as well as pH differences due to carbonation or leaching. The aim is to enhance the accuracy of predictions of diffusion potentials based on material parameters and exposure conditions. The approach is based on separating and quantifying the individual parameters contributing to the global diffusion potential. These are primarily the overlap of concentration profiles of different ions, the influence of perm-selective action of cement hydration products, and the potential chemical reactivity of the latter with the ions moving through the pore system.

Being able to predict diffusion potentials is crucial to apply adequate corrections in case the diffusion potential is an error source such as e.g. in potentiometric measurements. Thus, it is expected that the results of this project will improve the accuracy of potentiometric sensors such as chloride and pH sensors to be used in concrete. A better understanding of diffusion potentials will also allow refined interpretations of potential measurements as a method frequently used for condition assessment of reinforced concrete structures. Finally, an improved understanding of the perm-selective properties of cement-based materials and their influence on diffusion potentials may also allow using measurements of diffusion potentials as a means to obtain information related to the material under study. For example, it may be possible to determine diffusion characteristics of a certain concrete by measuring diffusion potentials in combination with chloride profiles.

### 7.4.6. Korrosionsmonitoring in Rissbereichen realer Stahlbetonbauteile zur Wirksamkeitskontrolle des Instandsetzungsprinzips W-Cl

Bearbeitung: Florian Hiemer, M.Sc.
Förderer: DAfStb (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.)

Bei der Stahlbetonbauweise ist die Rissbildung im Beton auch bei bedingungsgemäßer Anwendung unumgänglich. Wie in Untersuchungen gezeigt wurde, geht durch Risse in der Betondeckung die Barrierewirkung gegenüber von der Oberfläche eindringenden, korrosionsfördernden Stoffen, wie z. B. Chloriden, sehr schnell verloren. Dadurch ist an der risskreuzenden Bewehrung früh mit einer Depassivierung zu rechnen. Um dieser Tatsache bei besonders gefährdeten Stahlbetonbauten entgegenzuwirken, wurde 2010 vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein e.V. das Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ als Entwurfsgrundsatz zur Erstellung gleichnamiger Bauten herausgegeben. Eine darin angegebene Maßnahme beruht auf dem Instandsetzungsprinzip „Korrosionsschutz durch Begrenzung des Wassergehaltes im Beton (Instandsetzungsprinzip W)“ nach der DAfStb-Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen. Im DBV-Merkblatt wird empfohlen, die Oberfläche erst nach jahreszeitlichen Temperaturwechseln und abgeschlossener Rissbildung mit einem Oberflächenschutzsystem (OS) zu beschichten. Es wird davon ausgegangen, dass bei kurzen Chlorideindringzeiten von maximal einer Wintersaison nicht mit standsicherheitsrelevanten Korrosionsschäden an der Bewehrung zu rechnen ist. Diese Annahme wurde bislang jedoch weder durch Laborversuche, noch durch Praxisuntersuchungen hinreichend abgesichert.

Um diese Fragen zu klären, wird am Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München (cbm) aktuell ein DFG-Forschungsvorhaben mit Untersuchungen an Laborprobekörpern bearbeitet. Im Zuge des Forschungsvorhabens wird geklärt, inwiefern ein durch Chloride initiierter Korrosionsprozess im gerissenen Stahlbeton durch die Aufbringung einer Beschichtung nach DBV-Merkblatt zum Erliegen gebracht werden kann. Ziel des vor-

liegenden Forschungsvorhabens ist es, durch Untersuchungen an realen Bauwerken die Wirksamkeit des Instandsetzungsprinzips W-Cl zu überprüfen. Das Vorhaben ergänzt somit das von der DFG geförderte Vorhaben.

Mit Hilfe entsprechend installierter Sensorik an realen Bauten werden wesentliche Korrosionsparameter fortwährend erfasst. Dadurch soll festgestellt werden, inwiefern der Korrosionsvorgangs durch die Aufbringung des Oberflächenschutzsystems beeinflusst wird.

Es gilt zu klären, ob eine chloridinduzierte Bewehrungskorrosion in gerissenen Bauteilen nach Beschichtung der Betonoberfläche unter bestimmten Bedingungen tatsächlich zum Stillstand kommt. Weiterhin soll quantifiziert werden, wie lange der Zeitraum andauert, bis ein bereits begonnener Korrosionsprozess im Riss ggf. zum Erliegen kommt.

### 7.4.7. MISTRALWIND Arbeitspaket 5: Lebensdauerakte Windenergieanlagentürme (in Kooperation mit Lehrstuhl Statik, TUM)

Bearbeitung: Dr.-Ing. K. Osterminski, Altug Emiroglu, M.Sc. (Lehrstuhl Statik, TUM)
Förderer: BMWi (PtJ)

Für Windenergieanlagen (WEA) wird heutzutage eine Lebensdauer von 20 Jahren angesetzt. Dabei müssen sowohl die Turbine als auch die Tragstruktur (Turm und Fundament) die angestrebte Lebensdauer erreichen. Aufgrund der hochgradig dynamischen Einwirkung auf die WEA'n wird der Ermüdung der eingesetzten Werkstoffe die dominant lebensdauerbeschränkende Wirkung zugeordnet. Im Rahmen von Planung neuer und Bewertung bestehender Anlagen sind Modelle und Eingangsdaten erforderlich, die die Ermüdung der Tragstruktur beschreiben. Für Tragstrukturen aus Baustahl existieren Kenntnisse über das Ermüdungsverhalten. Die Verbundbauweise des Stahlbetons hingegen, welche klare Vorteile im Onshore-Bereich der Windenergie besitzt (Ortbetonfertigung → sehr hohe Konstruktionen), ist im Rahmen der Ermüdung der einzelnen Verbundwerkstoffe wesentlich komplexer.

Die Tragfähigkeit bzw. der Widerstand der Tragstruktur insbesondere mit Blick auf Ermüdung ist Thema des Arbeitspakets 5 von MISTRALWIND. Darin sollen aus komplexen Finite-Elemente Berechnungen ein ingenieurmäßig vereinfachter Ansatz zur Ermittlung von Detailbeanspruchungen hergeleitet werden. Diese sollen durch Vergleich von geeigneten Ermüdungsmodellen und Schadensakkumulationsansätzen zu einer Beurteilung der Restlebensdauer bzw. auch zur Ermittlung der benötigten Materialwiderstände bzw. Tragstruktureigenschaften führen. Da es sich bei Beanspruchung (z. B. Eigengewicht, Wind) und Widerständen (z. B. Steifigkeit, Ermüdungsfestigkeit der Materialien) um streuende Eingangsgrößen handelt, muss eine risikobasierte Aussage über die Lebensdauer oder die Restlebensdauer der Tragstruktur erfolgen. Der Einsatz von Messdaten zur Tragwerksauslenkung ermöglicht, die Beanspruchung direkt herzuleiten. Aus diesem Grund werden im Arbeitspaket die Schnittstellen zu den Live-Daten der Turmstrukturerfassung aus den Arbeitspaketen 2 bis 4 implementiert. Auf Seite der Widerstände müssen über umfangreiche Recherchen und Untersuchungen die benötigten Eingangswerte für die Bemessung quantifiziert werden. Abschließend werden alle Ergebnisse des Projekts zur Entwicklung einer systematischen Online-Lebensdauerakte (LIDOC) verwendet, die stets eine aktuelle Aussage über den Zustand der Tragstruktur bereitstellt.

Sowohl die Kombination von FEM und Messdaten für die Beanspruchung als auch die umfangreiche Quantifizierung der Materialwiderstände sowie deren Implementierung in einem vereinfachten kombinierten Ermüdungsansatz erlauben erstmals eine live Berechnung der

Lebensdauer von WEA. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, den Betrieb einer WEA-Turbine auf Grundlage der in diesem Vorhaben entwickelten Algorithmen adaptiv zu steuern.

## AG Zerstörungsfreie Prüfung

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

Bearbeitung: C.T. Geiss, M.Sc., M. Raith, M.Sc., M. Botz, M.Sc., Dipl.-Ing. B. Wondra
Förderer: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (FKZ-Nr. 0325795E)

Maintaining and operating the structure of a Wind Turbine as long as possible makes sense from a technical and economical point of view, as it is one of the most expensive parts of a Wind Turbine. The issue is becoming more and more relevant, because in the coming years, many established Turbines are going to reach the end of their service life, which is 20 years. In the course of the MistralWind research project a concept is being developed to enable further operation and thus a lengthening of the service life.

To reach this aim, a methodology for inspection and monitoring of structures of Wind Turbines is developed in cooperation with IABG, Siemens, Max Bögl Wind AG as well as the Chair of Structural Analysis and the Chair of Materials Science and Testing of Technische Universität München. A focus will be put on instrumented monitoring of the tower and support structure of existing and new onshore wind power plants. Furthermore non destructive testing methods will be identified which allow an assessment of the actual state and by that enable an extended service life.

With the aid of the acquired data, maintenance and servicing costs shall be optimized. Beyond that the data will be employed as a basis for an extension of the service life of Wind Turbines and for the development of a control strategy that considers the remaining service life.

### 7.4.9. Projektbericht: Entwicklung eines scannenden Prüfverfahrens für Betonfahrbahndecken

Bearbeitung: Dipl.-Geophys. Robin Groschup
Förderer: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur unter FE-Nr. 08.238, durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

Ein bedeutender Teil des Straßennetzes in Betonbauweise weist potentiell gefährliche Schädigungen auf, welche die Restlebensdauer der Bauelemente entscheidend begrenzen oder sogar die Betriebssicherheit gefährden können. Zu solchen Schädigungen zählen Delaminationsstörungen und horizontale Risse. Eine Instandsetzung oder ein Neubau von geschädigten Straßenabschnitten kann aus wirtschaftlichen und operationellen Gründen u.U. nicht flächendeckend erfolgen.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Messprinzips einschließlich der Umsetzung in einen Funktionsprototyp, der scannende Messungen auf Betonfahrbahnen erlaubt, um Bereiche mit horizontalen Rissen und Delaminationsschäden mit möglichst großer Scangeschwindigkeit zu identifizieren. Mit Hilfe der Messergebnisse können Bereiche eingegrenzt werden, in denen kritische Schädigungen vorliegen. Autobahnbetreiber

können so gezielt Instandsetzungsmaßnahmen einleiten und die Betriebssicherheit von Betonfahrbahnen erhöhen. Insbesondere soll das Risiko von hitzeinduziertem plötzlichem Versagen der gesamten Betondecke verringert werden.

Trotz einiger vielversprechender und in aktueller Literatur diskutierter Ansätze existiert zur Abbildung der in diesem Forschungsvorhaben relevanten Schädigungen noch kein etabliertes Messverfahren. Übliche Verfahren zur Untersuchung von Betonbauteilen, wie z.B. Potentialfeldmessgeräte, Georadar oder Ultraschall-Schwerwellen-Array-basierte Geräte weisen einen hohen Verbreitungs- und Automatisierungsgrad auf. Für die Detektion von Delaminationsstörungen existieren leider keine Systeme auf vergleichbarem Niveau.

Die Arbeiten in diesem Forschungsvorhaben werden dazu führen, die theoretischen Kenntnisse auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung zur Detektion von Delaminationsstörungen zu erweitern und helfen, geeignete Auswerteverfahren und Sensortechniken für den Praxiseinsatz zu entwickeln.

## 7.5. Ausgewählte Materialprüfung

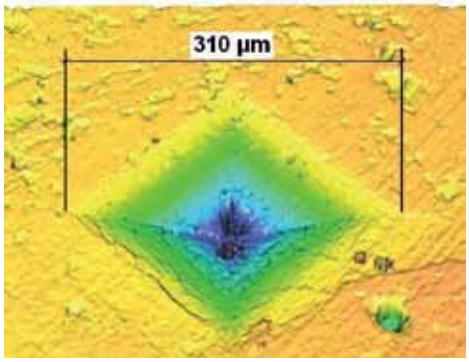
### AG Betontechnologie

#### 7.5.1. Anwendung der Kleinhärteprüfung zur Beurteilung der Gefügeeigenschaften von Beton

Im Rahmen von Sanierungsarbeiten wurden Betonwände eines Bauwerks mit Spritzbeton beschichtet. Dabei kam es wenige Tage nach der Applikation zu großflächigen Ablösungen des Spritzbetons. Zur Klärung der Schadensursache wurde ein Bohrkern (d= 50 mm) aus einem Bereich entnommen, an dem sich der Spritzbeton nicht vom Betonuntergrund gelöst hatte. Wir wurden beauftragt, an diesem Bohrkern Gefügeuntersuchungen mithilfe der Vickershärte durchzuführen. Zur Bestimmung der Vickershärte wird eine pyramidenförmige Diamantspitze mit definierter Kraft in eine Prüffläche gedrückt. Anhand der Diagonalenlängen des Abdrucks wird die Vickershärte berechnet. Die Vickershärte korreliert mit der Festigkeit eines Werkstoffs. Der große Vorteil dieses Verfahrens ist, dass auch im Bereich weniger Quadratmillimeter Unterschiede in den Gefügeeigenschaften eines Werkstoffs festgestellt werden können. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurde ein Härteprüfgerät der Firma Nanovea verwendet. Der Bohrkern wurde zur Probenvorbereitung längs halbiert und die Schnittfläche geschliffen und poliert.

Abbildung 1: Härteprüfgerät mit optischem Mikroskop und Härteprüfeinheit

Anschließend wurde an der polierten Fläche die Härte innerhalb der Mörtelmatrix des Spritzbetons tiefengestaffelt bestimmt, indem mit einer Kraft von 5 N die Pyramidenspitze in die Mörtelmatrix gedrückt wurde. Abb. 2 zeigt beispielhaft einen Abdruck in die Mörtelmatrix des Spritzbetons. Je Tiefenstufe wurden dabei mindestens fünf Prüfungen vorgenommen.



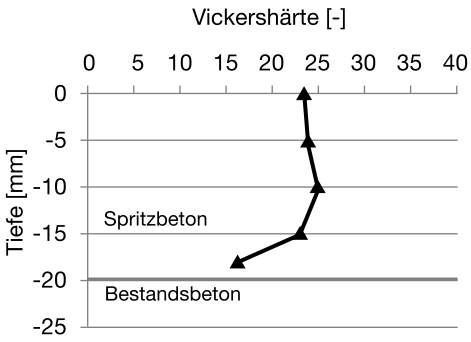




Abbildung 2 links: Pyramidenabdruck in der Mörtelmatrix des Spritzbetons (Durchmesser der Diagonale rd. 160 µm)

Abbildung 2 rechts: Verlauf der Härte im Spritzbeton über die Tiefe

Die Ergebnisse zeigen, dass am Übergang zum Bestandsbeton die Härte signifikant abnimmt. Geringere Härten im Übergangsbereich zum Bestandsbeton deuten auf eine höhere Porosität im Vergleich zum Kernbeton hin. Möglicherweise wurde der Bestandsbeton unzureichend vorgenässt, was zur Folge hatte, dass nach der Applikation des Spritzbetons ein Teil des Anmachwassers in den Bestandsbeton kapillar abgegeben wurde. Dadurch fehlt dem Spritzbeton an der Übergangszone Wasser zur Hydratation und es kommt zu einer erhöhten Porosität und damit verbunden zu einem nur schwachen Verbund von Spritzbeton und Bestandsbeton.

## AG Chemie

### 7.5.2. Untersuchung von Korrosionserscheinungen an einer Lampe

Bearbeitung: Dr. rer. nat. H. Hilbig

An einer exklusiven Deckenlampe, bei der Porzellanscherben an Edelstahlstäben angeordnet wurden, ist Korrosion an den Edelstahlstäben aufgetreten. Teilweise führte dies zum Ablösen der Porzellanteile.

Durch Oberflächenanalysen sollte die Ursache bestimmt werden. Hierzu wurden folgende Proben untersucht:

Foto: (c)
Ingo Maurer GmbH, München,
Lampe "Porca Miseria!"

Abbildung 1: Teile der Lampe

| Probe | Beschreibung |
|---|---|
| Stahl kor | Stahlteile von einer Lampe, an der Korrosionserscheinungen aufgetreten sind |
| Keramik kor | Keramikteile mit dunklen Belägen, von einer Lampe, an der Korrosionserscheinungen aufgetreten sind |
| Stahl Ref | Stahlteile für eine Lampe, die jedoch noch nicht verbaut wurden |
| Keramik Ref | Keramikteile für eine Lampe, die jedoch noch nicht verbaut wurden |
| Stahl Kleber | Kleberrückstände auf einem korrodierten Stahlteil |
| Stahl Kleber Ref | Kleberrückstand auf einem noch nicht verbautem Stahlteil |

[1] ICP-MS = Massenspektroskopie mit induziert gekoppeltem Plasma als Ionenquelle

Mit Hilfe der Laserablations-ICP-MS[1] (kurz LA-ICP-MS) wird Material von der Probenoberfläche mit einem Laser abgelöst und mit einem Trägergas (hier Helium) in die ICP-MS transportiert, wo es analysiert wird. Es wurde jeweils mit einem Laserspot von 100 µm Durchmesser eine 2000 µm lange Linie ablatiert und das Material anschließend ortsaufgelöst ausgewertet. In den Abbildungen 2 und 3 sind die Ergebnisse für die Chlor- und Kohlenstoffgehalte jeweils für die Stahl- und die Keramikproben dargestellt. Die Kohlenstoffgehalte auf den Oberflächen der Keramikproben, bzw. der Stahlproben, waren jeweils, unabhängig, ob korrodiert oder nicht, gleich. Dagegen konnte festgestellt werden, dass auf der Oberfläche der korrodierten Stahlfläche Chlor vorhanden war, während die Referenzprobe kein Chlor enthielt. Auch im Kleber auf dem korrodierten Stahlteil konnte eine gewisse Menge an Chlor nachgewiesen werden.

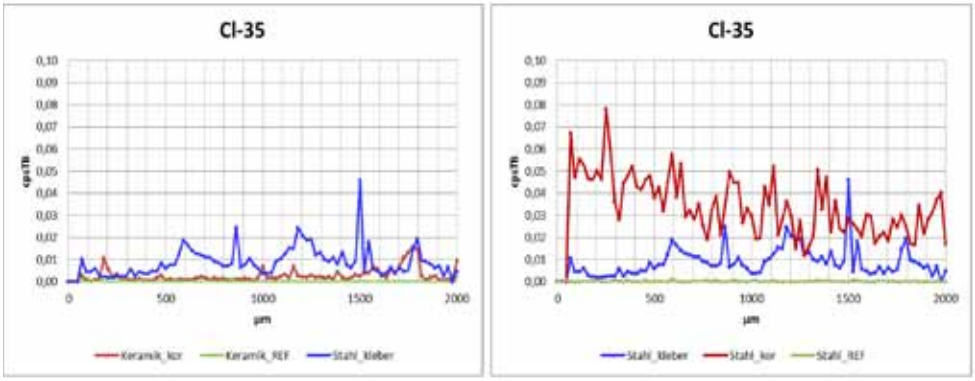



Abbildung 2: rel. Chloridgehalte auf den Oberflächen der Proben

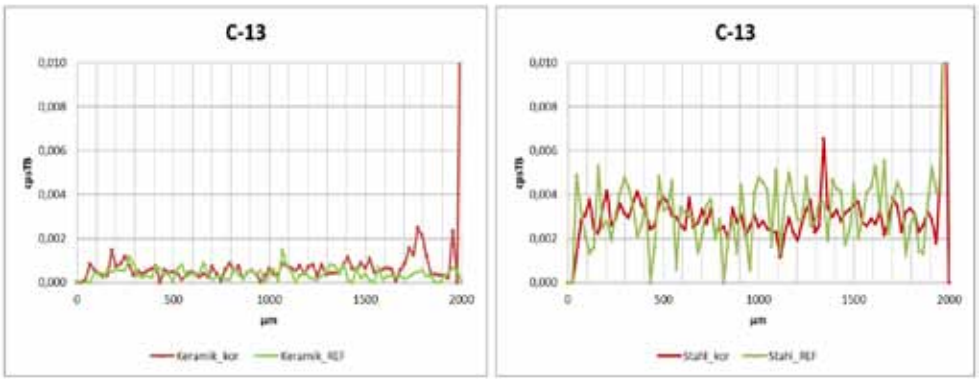



Abbildung 3: rel. Kohlenstoffgehalte auf den Oberflächen der Proben

Eine direkte Gegenüberstellung der Messergebnisse vom Kleber, einmal auf einer Referenzfläche und einmal auf einem korrodierten Stahlteil, ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Ergebnisse für die Chlor- und Kohlenstoffgehalte sind als mittlerer Messwert über alle Linien dargestellt. Während die gefundene Kohlenstoffgehalte für beide Proben sehr ähnlich waren (was auf eine vergleichbare Ablation hinweist), enthält der Klebstoff der korrodierten Probe deutlich mehr Chlor. Offensichtlich führte eine Chloridbelastung zu den Korrosionserscheinungen. Als Quelle des Chlorids wurden Reinigungsmittel oder Chlor vom Entkeimen der Klimaanlage gemutmaßt.

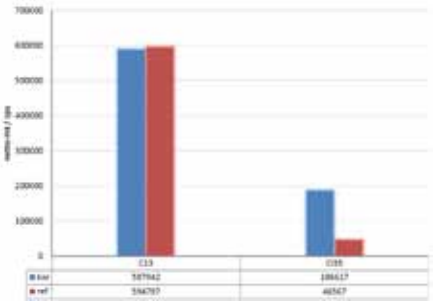


Abbildung 4: rel. Kohlenstoff- und Chlorgehalte des Klebers auf den Oberflächen

## AG Zerstörungsfreie Prüfung

### 7.5.3. HEALCON
### (Self-healing concrete to create durable and sustainable concrete structures)

Bearbeitung: F. Malm, M.Sc.

Nach wie vor genießt das Projekt Healcon zur Herstellung und Prüfung von Beton mit Selbstheilungseigenschaften in den Medien große Aufmerksamkeit. So drehte ein Kamerateam der BBC für einen weltweit ausgestrahlten Beitrag in der Reihe „BBC – Horizons“ über die Arbeit in diesem Projekt. Dieser Beitrag ist (als Clip Nr. 5) abrufbar unter: http://www.bbc.com/specialfeatures/horizonsbusiness/seriesfive/reinforcing-road-rail/?vid=p02pcngf.

Da die Sende- und Verwertungsrechte nicht beim cbm oder der TU München liegen, wurde von einem weiteren Filmteam der TU München ein vergleichbarer Beitrag im Sommer 2015 gedreht, der in deutscher und englischer Sprache auf Youtube unter dem Stichwort „Project Healcon“ gefunden werden kann.
https://www.youtube.com/watch?v=rtlBe47k4DQ
https://www.youtube.com/watch?v=SzhWM_oWVCg

## 7.6. Sonstiges

### AG Bindemittel und Zusatzstoffe

#### 7.6.1. Zusammenarbeit mit der Hokkaido University, Sapporo, Japan

Anlässlich der Teilnahme an der vom cbm, Fachgebiet Gesteinshüttenkunde, mitveranstalteten Tagung EuroCoalAsh 2014 in München kam Prof. Takafumi Sugiyama von der Hokkaido University in Sapporo, Japan, zu einem ersten Besuch in die Baumbachstraße. Anknüpfungspunkte waren gemeinsame Interessen zu Fragen der Betondauerhaftigkeit und der Betonzusatzstoffe sowie des gesamten Themenkomplexes der Nachhaltigkeit der Betonbauweise.

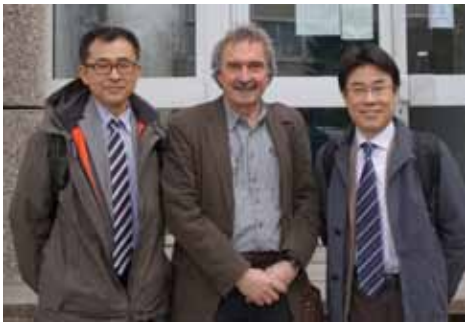


Abbildung 1: Prof. Sugiyama (rechts) und Prof. Sato (links), Hokkaido University, Sapporo, zu Gast im cbm bei Prof. Heinz (Mitte)

Abbildung 2: Hauptgebäude der Faculty of Engineering der Hokkaido University, Sapporo, März 2015.

Prof. Sugiyama leitet das Environmental Material Engineering Laboratory der Faculty of Engineering der HU Hokkaido University in Sapporo, dem Verwaltungszentrum der größten japanischen Insel. Die HU – eine der Top Ten Universitäten in Japan mit einem ähnlichen fachlichen Profil wie die TU München und mit dieser durch eine Kooperationsvereinbarung verbunden – nimmt teil an einem staatlichen Förderprogramm zur Verbesserung der internationalen Sichtbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit der universitären Ausbildung, genannt „Top Global University Project“. Prof. Sugiyama und seine Arbeitsgruppe wurden ausgewählt, zum Thema „Collaborative Research and Teaching on Sustainable Construction Materials“ international renommierte Kollegen zu gemeinsamen Projekten in diesem Kontext einzuladen. Ziel ist es, neben der Erhöhung der Attraktivität der Ausbildung, insbesondere auch für ausländische Studierende, auch die guten Arbeitsbedingungen und die hervorragende Ausstattung der Universität den internationalen Kollegen zu vermitteln und für aktuelle Forschungsthemen gemeinsam zu nutzen.

Japanisches Flugasche-Maskottchen

Details zu der Summer School unter Beteiligung von Prof. Heinz im Juli 2016 mit dem Titel „Who builds the world and how it should be — Sustainable construction technology with concrete –“ sind festgelegt worden und können eingesehen werden unter https://hokkaidosummerinstitute.oia.hokudai.ac.jp/. Wir freuen uns auf die weiteren Kontakte mit den japanischen Kollegen.

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

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

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

### Comité Européen de la Normalisation (CEN)

| | | |
|---|---|---|
| TC 104/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/ Rahimi |
| 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 062-01-78 AA | „Kathodischer Korrosionsschutz“ | Keßler |
| NA 062-03-13 AA | „Gesteinskörnungen; Prüfverfahren, Petrographie, Probenahme“ | Neidinger |
| NA 062-03-32 | „Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel“ | Wörner |

## Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

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

## 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 |
| 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 |

**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**

| | | |
|---|---|---|
| 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 |
| DFG – Fachkollegium Bau | Gehlen/Große/Heinz |
| DFG – Fachkollegium Maschinenbau | Große |
| Estonian Research Council (ETAG) | Gehlen |
| Fund for Scientific Research - FNRS, Brüssel, Belgien | Große |
| FWO, Fonds Wetenschappelijk Onderzoek, 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 |
| Studienstiftung des Deutschen Volkes, Bonn | Gehlen |
| Swiss National Science Foundation (SNF) | Gehlen/Heinz |

* = Obmann / ** = Chairman

# 9. Dissertationen

## 9.1. Laufende Dissertationen

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

| | |
|---|---|
| Ying Wang, M.Sc.<br>seit 01.07.2011 | Hydratations- und Erhärtungsmechanismen der wasserbeständigen Bindemittelmischungen auf Gipsbasis |
| Kai Fischer, M.Sc.<br>seit 15.05.2012 | Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen in Beton unter beschleunigenden und praxisgerechten Bedingungen |
| Linda Irbe, M.Sc.<br>seit 01.10.2013 | Die Rolle des Aluminiums in C-A-S-H bei chemischem Angriff auf Beton |

### AG Betontechnologie (Betreuung Prof. C. Gehlen)

| | |
|---|---|
| Jens Skarabis, Dipl.-Ing.<br>seit 01.05.2006 | Anwendung der Mikroindentation zur Beurteilung der Gefügeeigenschaften von Straßenbetonen |
| Thomas Kränkel, Dipl.-Ing.<br>seit 15.04.2007 | Nichtlinear viskoelastisches Deformationsverhalten von Verbunddübeln in Abhängigkeit der Belastungsdauer und -höhe |
| Charlotte Thiel, Dipl.-Ing.<br>seit 01.04.2008 | Einfluss von CO2-Druck und Betonfeuchtegehalt auf das Porengefüge von Beton während der Carbonatisierung |
| Sandy Illguth, M.Sc.<br>seit 01.05.2009 | Faserbewehrter Feinkornbeton für filigrane Betonfertigbauteile |
| Daniel Weger, M.Sc.<br>seit 01.01.2014 | Additive Fertigung im Bauwesen |

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

| | |
|---|---|
| Amir Rahimi, Dipl.-Ing.<br>seit 01.05.2011 | Semiprobabilistisches Modell zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken unter Chlorideinwirkung |
| Florian Hiemer, M.Sc.<br>seit 25.11.2013 | Korrosionsverhalten von Stahl in gerissenem chloridbelasteten Beton bei Anwendung des Instandsetzungsprinzips W-Cl |

### AG Chemie (Betreuung Prof. D. Heinz)

| | |
|---|---|
| Tobias Gutberlet, M.Sc.<br>seit 01.02.2009 | Hydratation der Calciumsilikate |

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

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

## AG Zerstörungsfreie Prüfung (Betreuung Prof. C. Große)

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

## 9.2. Dissertation Fact Sheets

### 9.2.1. Alkali Reactivity of Coarse Aggregate and Sand in Concrete in Laboratory and Service Conditions

| | |
|---|---|
| Name: | Kai Fischer |
| E-Mail: | kai.fischer@tum.de |
| Supervisor: | Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz<br>Chair of Mineral Engineering |
| Started: | 05/2012 |
| Status: | ongoing |


**Background / Aim of work**

Within the last two decades, damaging alkali silica reaction (ASR) has been repeatedly observed in German concrete motorway pavement. The damage is due to the reaction of SiO2 in siliceous aggregate with alkalis in the cement to form a swelling alkali-silica gel. Besides an increased dynamic load caused by traffic, external exposure to de-icing salt is considered to be a major factor affecting damaging ASR. Usually, this reaction is slow and leads to visual damage after 5 to 10 years. As a consequence, performance tests for the evaluation of the ASR potential of aggregates and concrete compositions have been developed. According to current regulations, they must be applied to prevent ASR damage in future concrete structures [1, 2]. The approved 60 °C performance test with external alkalis provides reliable results for the common alkali reactive rock types in Germany such as greywacke or rhyolite. However, there is little experience with performance tests on concrete with other rock types (e. g. granite or gabbro). These are also commonly used for concrete motorway pavement, but have not shown significant ASR damages up to now.

In fact, performance tests on concretes with aggregates from several igneous rocks resulted in unexpectedly high expansion and damage caused by ASR. Microscopic examinations (Fig. 1) of the specimens indicate that especially the combination of natural quartzitic sand with the coarse aggregate leads to different forms of ASR. These differences are related to the degree of damage caused by certain reactive constituents of the fine or the coarse aggregate.

Therefore, one aspect of the doctoral thesis focusses on the identification of relevant properties of specific aggregates (igneous rocks and natural quartzitic sands) that promote

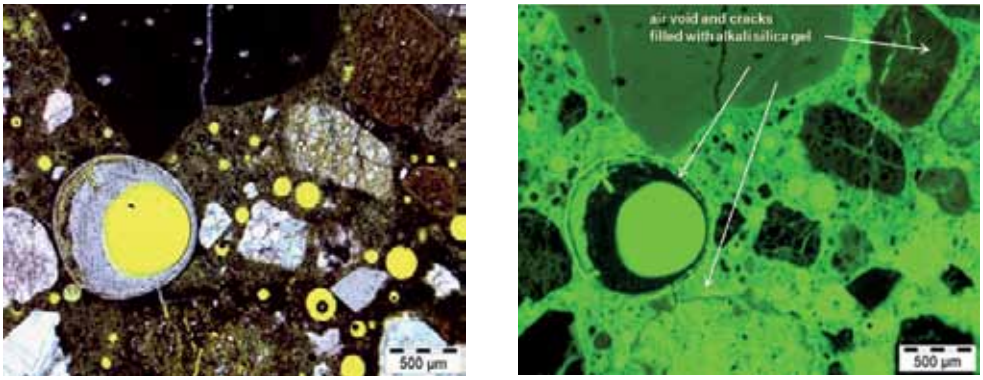



Figure 1:
Microscopic image (above: linear polarized light; bottom: UV light) of a concrete microstructure damaged by ASR after the performance test.

ASR. The aggregates are characterized by their mineral content, chemical composition, microstructure and porosity. The effect of these properties will be related to the conditions that effect ASR in performance tests as well as in real service conditions. According to this, the following investigations will be performed.

- An intensive exposure in the extended ASR mortar bar test according to the Alkali Guideline [3] to show which mineral phases participate in the ASR
- 60 °C performance tests (with external alkalis) on concrete with different compositions (varying coarse aggregate and sand). Changes in the concrete due to ongoing ASR are quantified by length measurements, concrete pore solution analyses, porosity measurements, determination of the dynamic Young's modulus, polarization microscopy and SEM-EDX.
- Coarse aggregate and sand are stored separately as well as together in synthetic concrete pore solutions (with and without de-icing agents) to simulate the conditions of core concrete and obtain information on mineral dissolution and the formation of alkali silica gels. Changes in the aggregate properties (e.g. microstructure, mineral content and chemical composition) are followed in order to investigate the ASR mechanisms.

**References**


[1] Müller, C.; Borchers, I.; Eickschen, E. (2007): AKR-Prüfverfahren: Auf dem Weg zur Performance-Prüfung. Beton- und Stahlbetonbau, 102(8): p. 528-538.

[2] Allgemeines Rundschreiben Nr. 04/2013: Vermeidung von Schäden an Fahrbahn decken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 2013.

[3] DAfStb-Richtlinie - Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Beuth Verlag, Berlin. 2007. p. 46


### 9.2.2. Faserbewehrter Feinkornbeton für filigrane Betonfertigbauteile

Name: Sandy Illguth
E-Mail: illguth@tum.de
Supervisor: Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Chair of Materials Science and Testing

Started: 10/2011
Status: ongoing

Die Herstellung filigraner Betonfertigbauteile stellt hohe Ansprüche an die Schalungs-, Herstell- und Betontechnologie. Beim Bau von Schalentragwerken, die räumlich gekrümmt sind, erhöhen sich die Anforderungen zusätzlich. Die Erfüllung von architektonisch ansprechenden Geometrien ist mit den Fließ- und Festigkeitseigenschaften von Betonen oft nicht in Einklang zu bringen. So muss der Beton beispielsweise ein hohes Maß an Fließfähigkeit aufweisen, um die Schalung hohlstellenfrei auszufüllen. Andererseits dürfen aber Gesteinskörner und Fasern nicht unkontrolliert sedimentieren und den Beton damit entmischen. Dies würde wiederum die Festigkeitseigenschaften negativ beeinflussen. Die Filigranität der Schalen stellt ebenfalls hohe Anforderungen an die Festigkeit des Betons. So ist neben der geforderten Druckfestigkeit insbesondere auch eine höhere Zugfestigkeit notwendig.

In dieser Arbeit werden faserbewehrte Feinkornbetone entwickelt, mit denen filigrane Betonfertigbauteile zielsicher hergestellt werden können. Der Schwerpunkt liegt bei der Fa-

Abbildung 1:
Bruchfläche eines Feinkornbetons mit Fasern

serbewehrung. Um die Zugtragfähigkeit gegenüber üblichen Faserbetonen zu steigern, werden höhere Fasergehalte von über 5 Vol.-% eingesetzt. Die Kraftübertragung der Fasern im Schalenquerschnitt wird durch unterschiedliche Fasern untersucht und optimiert. An Zugprobekörpern wird die Zugtragfähigkeit und damit das tatsächliche Werkstoffverhalten ermittelt. Die Fließeigenschaften der Betone werden sowohl am Mörtel als auch am Beton bestimmt. Neben der Viskosität, der Thixotropie und dem Ansteifverhalten des Betons ist vor allem die Fließgrenze von enormer Bedeutung. Dabei stellen das Formfüllungsvermögen und die Sedimentationsbeständigkeit gegenläufige Anforderungen an die Fließgrenze. Um sicherzustellen, dass die Schalung komplett gefüllt wird und der Beton selbst entlüftet, sollte diese möglichst gering sein. Jedoch ist – insbesondere bei hohen Fasergehalten – ein Mindestmaß an Fließgrenze notwendig, um die Sedimentation der Fasern zu verhindern. Neben theoretischen Berechnungen werden experimentelle Untersuchungen zur Formfüllung mit unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften durchgeführt.

**References**


[1] Stengel, T.: Optimierung des Verbundverhaltens von Stahlfasern in UHPC. Doktorandensymposium 2010 des DAfStb am 11. und 12. November an der TU Kaiserslautern

[2] Lowke, D.: Sedimentationsverhalten & Robustheit Selbstverdichtender Betone - Optimierung auf Basis der Modellierung interpartikulärer Wechselwirkungen. Doktorandensymposium 2010 des DAfStb am 11. und 12. November an der TU Kaiserslautern


### 9.2.3. Semi-Probabilistic Concept to the Service Life Design and Assessment of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides

| | |
|---|---|
| Name: | Amir Rahimi |
| E-Mail: | amir.rahimi@tum.de |
| Supervisor: | Univ.-Prof. Christoph Gehlen<br>Chair of Materials Science and Testing |
| Started: | 09/2011 |
| Status: | ongoing |


Chloride-induced corrosion is the decisive aspect governing the durability of structures in saline environments. Corrosion of the reinforcement is initiated when chloride ions penetrate into concrete and reach a threshold at the surface of the rebar which disrupts the passive layer protecting the rebar. The time required for such corrosion initiation depends besides the environmental factors on the properties of concrete, in particular its resistance against chloride diffusion.

This initiation time is followed by a propagation period which refers to the evolution of different forms of deterioration after corrosion has been initiated. Although the service life of structures is resulted in the sum of these two periods, in most cases the initiation time defines the service life because the propagation period may be very short. To satisfy the

durability of concrete structures, in generally, current standards and guidelines pretend deemed-to-satisfy provisions which based on application experiences. Contrary to this prescriptive methodology of standards at present performance-based probabilistic design models are developed using time-dependent mathematical models.

In the case of new structures (1-layer systems), time-dependent models, based on Fick's 2nd law of diffusion, for example, are used to describe chloride ingress into concrete, thus permitting the service life design of structures. For repaired structures, the transport model first has to be adapted to a multilayer model that considers both the layer of repair material and the remaining concrete layer. Where chloride ions are present in the remaining concrete layer, redistribution, i.e. transport into the repair layer as well as towards the inside of the structure has to be considered.

In this work semi probabilistic models are to be developed for service life design of marine structures with respect to chloride induced depassivation of rebar. The service life is to be treated to design new structures as well as to appraise the residual service life of existing structures before and after restoration. For repaired structures the chloride transport mechanisms (2-layer system) are to be analysed and a probabilistic model is to be developed.

**References**


[1] Gehlen, C. (2000): Probability-based service life design of reinforced concrete structures – Reliability studies for prevention of reinforcement corrosion. DAfStb Heft 510, Berlin, Beuth, (in German).

[2] Rahimi, A.; Gehlen, C.; Reschke, T.; Westendarp, A. (2014): Approaches for Modelling the Residual Service Life of Marine Concrete Structures. International Journal of Corrosion 1/2014.


### 9.2.4. NDT with Air-Coupled Elastic Wave Methods for Concrete Elements

Name: Robin Groschup
E-Mail: robin.groschup@tum.de
Supervisor: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Geophys. Christian U. Große
Chair of Non-Destructive Testing

Started: 10/2013
Status: ongoing

Many non-destructive testing (NDT) methods for damage detection and material characterization of concrete exist. Some of these methods have their main application area in laboratory settings, such as high frequency ultrasonics. Other methods are readily available as field portable devices (e.g. ground penetrating radar, GPR). Most of the common NDT techniques based on ultrasonics have their drawbacks when it comes to special requirements such as high acquisition speeds required for routine applications. On the other hand, faster methods, like GPR, have limitations regarding the types of discernible damage. For certain applications, methods employing low frequency ultrasonic waves can in theory avoid some of the drawbacks of the conventional approaches.

This applies to the impact-echo (IE) method. With this method lots of relevant characteristics of concrete elements can be examined. The conventional impact-echo test utilizes contact type sensors and is an efficient NDT method that is used to identify geometric

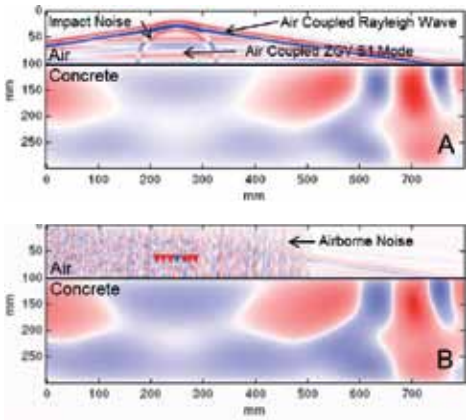



Figure 1:
Snapshots of simulated elastic and acoustic wave fields after mechanical excitation of a concrete surface.

dimensions and internal defects of concrete structures. Recent developments have shown that IE has high potential in certain measuring tasks where other methods come to their limits. These tasks range from backfill detection of tunnel linings to the detection of delamination in concrete pavements.

However, the conventional application of IE is quite labour-intensive and time-consuming. To avoid these disadvantages a contactless, air-coupled IE test setup will be developed in this study. High measurement speeds are feasible by means of air-coupled transducers.

The advantages of contactless sensing and higher acquisition rates are offset by other problems, e.g. airborne noise and more complicated data handling. These problems are addressed by hardware developments and new data processing and visualization schemes. The hardware related aspect lead to the development of a microphone array tailored to IE measurements. This newly developed sensor was employed in a semi-automatic scanning device for fast data acquisition. Aside to the practical aspects of air-coupled IE measurements numerical simulations are conducted to study the propagation and conversion of elastic and acoustic waves in solid media and gases.

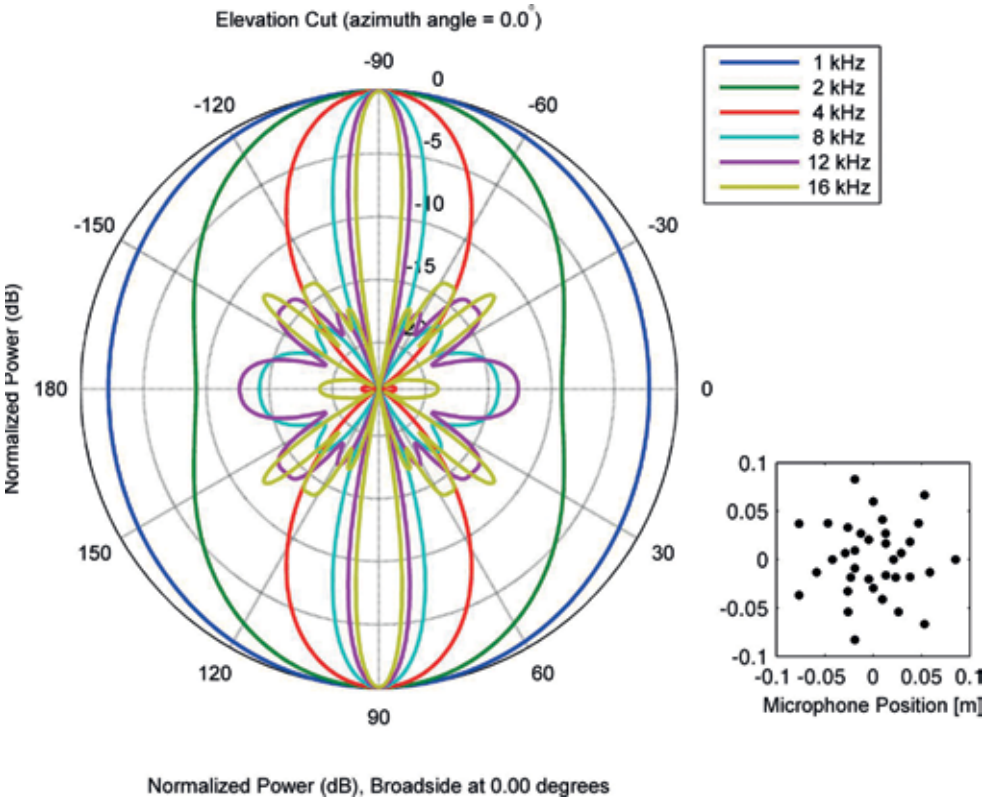



Figure 2:
Directional response of a microphone array developed in this study for impact echo measurements.

Ongoing work addresses specific aspects and the applicability of the developed methods to non-destructive evaluation of concrete pavements.

**References**

[1] Groschup, R.; Grosse, C.: MEMS Microphone Array Sensor for Air-Coupled Impact-Echo. Sensors, 2015. 15(7): p. 14932-14945.

### 9.2.5. Development of a practice-oriented sample pretreatment for the skid resistance prognosis

Name: Fabian Malm
E-Mail: fabian.malm@tum.de
Supervisor: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Geophys. Christian U. Große
Chair of Non-Destructive Testing
Started: 01/2013
Status: ongoing

**Introduction**

The sustainability of structures in civil engineering is becoming a more and more important issue. Related to this are problems to assess the structural condition, to measure the performance and to determine the residual lifetime of structures or structural components. Following the recent developments there is a clear trend to involve more and more innovative materials, new construction concepts and optimized maintenance procedures. The question is how non-destructive and monitoring techniques can support these new developments. A combined approach is necessary consisting of monitoring and inspection techniques to improve the sustainability of large structures in civil engineering. The main purpose of monitoring civil structures is to support regular visual examinations or inspections based on non-destructive testing techniques (NDT). There are different stages in the lifetime of a structure where NDT and self-healing materials (SHM) techniques can be helpful.

The range of applications from small to larger lab scale tests and up to real constructions requires different NDT approaches making the selection and combination of techniques more difficult. There are in general two ways NDT techniques can contribute: One is the observation of healing mechanisms and successes during mechanical loading. This will be done in small lab-scale, large lab or in field tests. The other is to assess the condition of the structure, where self-healing is studied. This is important for tests at larger scale, while for smaller lab tests this is of minor interest since the composition and condition of the specimen is well controlled. In particular this is of interest also to offer real data about material properties for the numerical simulation.

**State of the Art**

The main aim of non-destructive methods is to enable reliable and suitable testing and monitoring techniques to assess characteristics like strength and Young's modulus but also to detect visible and invisible defects in structural elements. For concrete, the determination of the dimensions of elements, the assessment of the depth of cracks or the determination of the position of the reinforcement are currently developed non-destructive methods. Within the scope of this doctoral dissertation it is the aim to adapt already existing non-destructive methods and to combine them to characterize the effects of different

Figure 1:
Acoustic emission measurements during a crack width controlled three point bending experiment at TU Munich to test self-healing efficiency

self-healing mechanisms in small and full-size specimens and to enhance the variety of non-destructive testing (NDT) techniques since a combination of methods has to be used to get reliable results.

Developing healing techniques for cementitious materials the self-healing efficiency should be evaluated to observe the usually time and space dependent healing effect. Up to now, the self-healing efficiency has mostly been evaluated based on the amount of regain in mechanical properties / regain in liquid tightness after a certain period.

While some researchers evaluate the regain in compressive strength, most evaluate the regain in strength, stiffness and/or energy when performing a tensile or bending test. Regain in mechanical properties is then determined by reloading the previously loaded and thus damaged sample and by comparing the mechanical properties gained during reloading at a certain time, with the original properties. Non-destructive testing methods have – compared to this – obvious advantages. Granger et al. [1] derived the amount of regain in energy due to autogenous crack healing from acoustic emission measurements. The authors conducted several acoustic emission experiments to evaluate the crack healing efficiency. In the case of Van Tittelboom et al. [2] encapsulated healing agents were provided inside the matrix to obtain autonomous crack healing. With the used equipment it was not possible to prove crack healing by the released polyurethane-based healing agent, although capsule breakage was clearly noted from the captured acoustic events. Also resonance frequency measurements have been proposed to evaluate the healing efficiency [3]. This technique, however, has only been used when autogenous healing was the mechanism causing crack repair. Little information is available up to now about the regain of permeability properties related to cementitious materials working as a barrier against gases and fluids (air- and liquid-tightness). Nishiwaki et al. [4] reported the use of a funnel which was glued onto the cracked surface to measure the water permeability at low water pressure. In Van Tittelboom et al. [5] regain in water tightness is measured using a test setup based on the low pressure water permeability setup of Aldea et al. [6] and Wang et al. [7]. Measurements at high water

pressure were performed by Jonkers [8] to evaluate the efficiency of bacterial self-healing concrete. The air permeability of cracked concrete has been measured by Yang et al. [9].

**References**


[1] Granger, S.; Loukili, A.; Pijaudier-Cabot, G.; Chanvillard, G. (2007): Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra-high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis. Cement and Concrete Research 37 (4), pp 519-527.

[2] Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; Lehmann, F.; Grosse, C. U. (2012): Acoustic emission analysis for the quantification of autonomous crack healing in concrete. Construction and Building Materials 28 (1), pp 333-341.

[3] Yang; Y.; Lepech, M. D.; Yang, E.-H.; Li, V. C. (2009): Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. Cement and Concrete Research 39 (5), pp 382-390.

[4] Nishiwaki, T.; Leite, J. P. d. B.: Mihashi, H. (2004): Enhancement in durability of concrete structures with use of high-performance fibre reinforced cementitious composites. 4th International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment & Loading, pp 1524-1531.

[5] Van Tittelboom, K.; De Belie, N. (2010a): Self-healing concrete: suitability of different healing agents. International Journal of 3R's 1 (1), pp 12-21.

[6] Aldea, C.-M.; Ghandehari, M.; Shah, S. P.; Karr, A. (2000): Combined effect of cracking and water permeability of concrete. Paper presented at the 14th Engineering Mechanics Conference, Austin, Texas, 21-24 May 2000.

[7] Wang, K.; Jansen, D. C.; Shah, S. P.; Karr, A. F. (1997): Permeability study of cracked concrete. Cement and Concrete Research 27 (3), pp 381-393.

[8] Jonkers, H. M. (2011): Bacteria-based self-healing concrete. Heron 56 (1/2), pp 1-12.

[9] Yang, Z.; Hollar, J.; He, X.; Shi, X. (2011): A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules. Cement and Concrete Composites 33 (4), pp 506-512.

## 9.3. Beendete Dissertationen

### 9.3.1. Zur Verwertbarkeit von Potentialfeldmessungen für die Zustandserfassung und -prognose von Stahlbetonbauteilen - Validierung und Einsatz im Lebensdauermanagement


| | |
|---|---|
| Name: | Sylvia Keßler |
| E-Mail: | silvia.kessler@tum.de |
| Beginn: | 2010 |
| Ende: | 2015 |
| Vorsitzender: | Prof. Dr.-Ing. Christian Große (TU München) |
| Prüfer: | Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen (TU München) |
| | Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach (RWTH Aachen) |


Stahlbetonbauwerke sind ein wesentlicher Bestandteil unserer Infrastruktur. Doch aufgrund von Taumittelbeaufschlagung (Chloriden) weisen viele Stahlbetonbauwerke Korrosionserscheinungen der Bewehrung bereits während der geplanten Lebensdauer auf. Folgeschäden, wie Risse und Abplatzungen des Betons, akkumulieren sich über die Nutzungszeit und werden zum lebensdauerbestimmenden Faktor eines Stahlbetonbauwerkes. Der sichere Betrieb eines korrodierenden Bauwerkes erfordert daher Inspektionen und Instandhaltungen, deren primäres Ziel es ist, das Ausfallrisiko des Bauwerkes unter Kontrolle zu halten. Eine der Kernaufgaben des verantwortlichen Ingenieurs während einer Inspektion ist die zerstörungsfreie Detektion von korrodierenden Bereichen in Stahlbetonbauwerken. Für die frühzeitige Korrosionsdetektion, d.h. bevor korrosionsinduzierte Risse auftreten, bietet sich als zerstörungsfreies Prüfverfahren die Potentialfeldmessung an. Diese Messmethode spielt die entscheidende Rolle bei der Zustandsbewertung und Instandsetzungsplanung von Bauwerken unter Korrosionsbeanspruchung. Die Potentialfeldmessung ermöglicht die Unterteilung eines Stahlbetonbauwerkes in korrosionsgefährdete (kritische) und unkritische Bereiche. Neben der reinen Zustandsbewertung liefert die Potentialfeldmessung wichtige Informationen für die probabilistische Lebensdauerprognose von Stahlbetonbauwerken. Kein zerstörungsfreies Prüfverfahren ist perfekt – auch nicht die Potentialfeldmessung. Die bisherige Vernachlässigung der Unsicherheiten aus der Korrosionsinspektion kann zu fehlgeleiteten Entscheidungen führen, d.h. entweder zu unnötigen Instandsetzungen oder wenn Korrosion übersehen wurde, zu erhöhten Kosten in der Instandsetzung durch vergrößerten Schadensumfang.

Zentrales Ergebnis dieser Forschungsarbeit ist die quantitative Beschreibung der Prüfqualität der Potentialfeldmessung. Die Potentialfeldmessung ist ein rein qualitatives Messverfahren. Die resultierende Prüfaussage der Potentialfeldmessung lautet entweder „Korrosion“ oder „keine Korrosion“. Der zugehörige statistische Parameter zur Beschreibung der Prüfqualität qualitativer Messmethoden ist die Probability of Detection. Die Probability of Detection-Kurve drückt die Wahrscheinlichkeit der Detektion eines Defektes in Abhängigkeit der Defektgröße aus. Neben der Defektgröße sind POD-Kurven zusätzlich von allen Einflussfaktoren abhängig, die das zu untersuchende zerstörungsfreie Prüfverfahren beeinflussen. Die zur Potentialfeldmessung korrespondierende Defektgröße ist die Anodenfläche, d.h. die Fläche auf der Bewehrung, auf der der Teilprozess der Metallauflösung also der anodische Teilprozess der Korrosion abläuft.

Der erste wichtige Schritt zur Erreichung des Forschungszieles ist die Identifikation der dominanten Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung. Neben einer Literaturrecher-

che und experimentellen Modellmessungen an einem „Elektrolytischen Trog“ erfolgt dieser Schritt anhand von numerischen Parameterstudien. Abschließend werden die identifizierten Einflussfaktoren durch Messungen an realen Bauteilen verifiziert. Zur Aufstellung von Parametern zur Beschreibung der Prüfqualität der Potentialfeldmessung ist es notwendig, den wahren Zustand der Bewehrung im Bauteil mit den Potentialfeldmessdaten zu vergleichen. Um den wahren Zustand der Bewehrung untersuchen zu können, ist ein kosten- und zeitintensiver Abtrag der Betondeckung durchzuführen. Jedoch wird in der Praxis kein Bauherr bzw. Bauwerksbetreiber diesem massiven Eingriff in die Struktur zustimmen, um die Zuverlässigkeit einer Messmethode zu evaluieren. Zur Lösung dieses Problems wird in dieser Arbeit ein numerischer Ansatz zur Analyse der Zuverlässigkeit der Potentialfeldmessung verfolgt. Ein großer Vorteil der Numerik ist, dass die Anodenfläche als maßgebende Defektgröße immer exakt bekannt ist, da sie einen Eingabeparameter der Simulation darstellt. Auch weitere Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung, bspw. der Elektrolytwiderstand des Betons oder die Betondeckung, können einfach und schnell variiert werden. Aus den Ergebnissen der numerischen Parameterstudien wird erstmals die Prüfqualität eines elektrochemischen Prüfverfahrens aufgestellt. Die ausgewerteten Probability of Detection-Kurven werden in Abhängigkeit der dominanten Einflussparameter diskutiert. Ein wichtiges Ergebnis ist, dass die Durchführung der Potentialmessung (das Messraster) einen größeren Einfluss auf die Prüfqualität ausübt als die Materialeigenschaften (z.B. Elektrolytwiderstand) des untersuchten Objektes. Dies hat den positiven Effekt, dass nun auf Grundlage der POD-Kurven die gewünschte Prüfqualität der Potentialfeldmessung mit Wahl des Messrasters festgelegt werden kann.

Die POD-Kurven der Potentialfeldmessung schließen eine große Lücke in der probabilistischen Zustandsbewertung und -prognose von Stahlbetonbauwerken unter Korrosionsbeanspruchung. Schon seit langem kann die Dauer der Initiierungsphase für chloridinduzier-

Sylvia Keßler, Prof. Roland Pail (Dekan der Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt) am Tag der Fakultät, 27.06.2015 (Foto: Andreas Heddergott)

te Bewehrungskorrosion in Form einer Depassivierungswahrscheinlichkeit probabilistisch vorhergesagt werden. Jedoch ist die Vorhersage von Korrosionsinitiierung in Stahlbetonbauwerken bei steigender Lebensdauer mit großen Unsicherheiten behaftet. Aber mit Kenntnis der Prüfqualität der Potentialfeldmessung können die wertvollen Informationen aus der Potentialfeldmessung zum Korrosionszustand mit Hilfe der Bayes'schen Statistik in die probabilistische Lebensdauerprognose integriert und die Unsicherheiten aus der Prognose maßgeblich reduziert werden. Die Ergebnisse aus der Potentialfeldmessung können direkt in eine Depassivierungswahrscheinlichkeit überführt werden. Da die Potentialfeldmessung eine flächige Messung ist, können die aktualisierten Depassivierungswahrscheinlichkeiten gleich einer Position auf der Bauwerksfläche zugeordnet werden, siehe Abbildung 1. Dieses Vorgehen zum Aktualisieren der Lebensdauerprognose wird anhand eines Referenzbauwerkes aufgezeigt und validiert. Bauwerksbetreiber können nun erstmals bei Korrosionsgefahr ihrer Stahlbetonbauwerke eine risikobezogene Inspektion- und Instandsetzungsplanung realisieren.

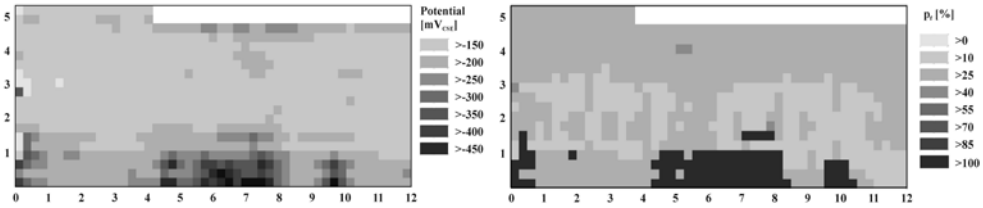



Abbildung 1: Potentialfeldmessung (links) und berechnete Depassivierungswahrscheinlichkeit (rechts).

### 9.3.2 Beeinflussung der Glaslösungsmechanismen und der puzzolanischen Aktivität von Flugaschen durch organische Additive


| | |
|---|---|
| Name: | Manuel Göbel |
| E-Mail: | manuel.goebel@opterra-crh.com |
| Beginn: | 2008 |
| Ende: | 2014 |
| Vorsitzender: | Prof. Dr.-Ing. Christian Große (TU München) |
| Prüfer: | Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz (TU München) |
| | Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Schmidt (i.R.) (Universität Kassel) |


Der Einsatz von Steinkohlenflugasche (SFA) im Beton wird u.a. durch die spät einsetzende puzzolanische Reaktion der SFA begrenzt. Flugaschereiche Betone werden fast ausschließlich für massige Bauteile verwendet, da hier eine geringe Hydratationswärmeentwicklung von Vorteil ist. Im Hochbau ist aufgrund von frühen Ausschalfristen eine hohe Frühfestigkeit entscheidend. Um die puzzolanische Reaktion von SFA in Bindemittelgemischen mit Portlandzement zu beschleunigen, gibt es mehrere Möglichkeiten. Eine Erhöhung der Kornfeinheit der SFA durch Sichten oder Mahlen führt zu einer Vergrößerung der reaktiven Oberfläche, wobei der zusätzliche Energieaufwand für die Aufbereitung von Nachteil ist. Die Zugabe von Alkalien führt zu einer schnelleren Lösung der SFA und daher zu einer beschleunigten puzzolanischen Reaktion. Um eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) zu vermeiden, ist eine Erhöhung der Alkalität nur begrenzt möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden organische Additive eingesetzt, um eine gesteigerte Glaslösung von SFA zu erreichen und die frühe puzzolanische Reaktion zu beschleunigen. Hierfür wurden SFA und synthetische Flugaschegläser verwendet. Im Gegensatz zu SFA waren in den verwendeten Gläsern keine kristallinen Bestandteile oder leicht lösliche

Oberflächenbeläge enthalten. So konnte die Reaktion der Glasphase getrennt betrachtet werden. Durch Untersuchungen zur Glaslösung und Kalkbindung von Flugaschegläsern im alkalischen Milieu sowie Versuche mit flugaschehaltigen Bindemitteln und Mörteln wurde die Reaktion der SFA untersucht. Um die frühe puzzolanische Reaktion zu beschleunigen, wurden organische Additive zugegeben, durch die eine beschleunigte Glaslösung erreicht werden kann. Einige der verwendeten Substanzen haben eine verzögernde Wirkung auf die Hydratation von Portlandzement zur Folge. Erfolgreicher ist hingegen die Verwendung von Alkanolaminen. Besonders Triethanolamin (TEA) führt zu einer erhöhten Lösung von Flugascheglas in alkalischen Lösungen ohne Portlandzement sowie zu höheren Hydratationswärmemengen und gesteigerten Frühfestigkeiten von Pasten und Mörteln mit Bindemittelgemischen aus SFA und Portlandzement. Grund für die gesteigerte Löslichkeit des Glases ist die Komplexbildung von Glasbestandteilen mit TEA, was eine beschleunigte Zerstörung des silicatischen Netzwerkes zur Folge hat. Die Anwesenheit von Aluminium-TEA-Komplexen konnte nachgewiesen werden. Verfärbungen deuteten auch auf Eisenkomplexe hin. Eine Erhöhung des pH-Wertes durch zusätzliche Alkalien führt zu keiner überproportionalen Zunahme der Glaslöslichkeit in Anwesenheit von TEA. Die Leistungssteigerung von TEA auf die Hydratationswärmeentwicklung flugaschehaltiger Pasten wird durch sulfathaltige Oberflächenbeläge der SFA verzögert. Auch eine zusätzliche Kaliumsulfatzugabe führt zu einer verzögerten Hydratationswärmeentwicklung. Als Ursache für die leistungssteigernde Wirkung von TEA auf flugaschehaltige Bindemittel wird eine katalytische Wirkung vermutet. In der Porenlösung von frischem, flugaschehaltigem Zementleim sind hohe Konzentrationen an Ionen enthalten, die Komplexe mit TEA eingehen können. Aus Porenlösungsanalysen geht hervor, dass TEA-Komplexe mit Aluminium oder Eisen weniger stabil sind als die sich bildenden Hydratphasen. Daher löst sich der Komplex auf, die komplexierten Ionen werden in Hydratphasen eingebunden und freigesetztes TEA kann erneut Komplexe bilden. Hierdurch wird die frühe puzzolanische Reaktion beschleunigt und es kommt zu einer Steigerung der Frühfestigkeit flugaschehaltiger Mörtel.

Manuel Göbel (links), Prof. Roland Pail (Dekan der Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt) am Tag der Fakultät, 27.06.2015 (Foto: Andreas Heddergott)

### 9.3.3. Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonbauteile


| | |
|---|---|
| Name: | Stefanie von Greve-Dierfeld |
| E-Mail: | stefanie.vongreve-dierfeld@tuev-sued.de |
| Beginn: | 2011 |
| Ende: | 2015 |
| Vorsitzender: | Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz (TU München) |
| Prüfer: | Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen (TU München) |
| | Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit (TU Kaiserslautern) |


Derzeit erfolgt die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken in den einschlägigen Regelwerken deskriptiv. Zukünftig ist ein leistungsbasiertes Bemessungskonzept geplant, vgl. Abb. 1. Gemäß Abbildung 1 werden Betone in Abhängigkeit ihrer Leistungsfähigkeit klassifiziert. Die Bemessung einer spezifischen Bauteilsituation erfolgt auf Basis klassifizierter Materialwiderstände mit Hilfe von Prognosemodellen und Übertragungsfaktoren. Beides in Analogie zur Tragwerksbemessung. Das Ziel dieser Arbeit war es, als Zwischenschritt, deskriptive Regeln leistungsbasiert abzuleiten. Dazu wurde im Rahmen eines Benchmarks die aktuelle Regelungspraxis der Expositionsklassen XC1 bis XC4 zusammengestellt, verglichen und die Zuverlässigkeit deskriptiv bemessener Bauteile untersucht. Zu diesem Zweck wurden bereits in Regelwerken etab-

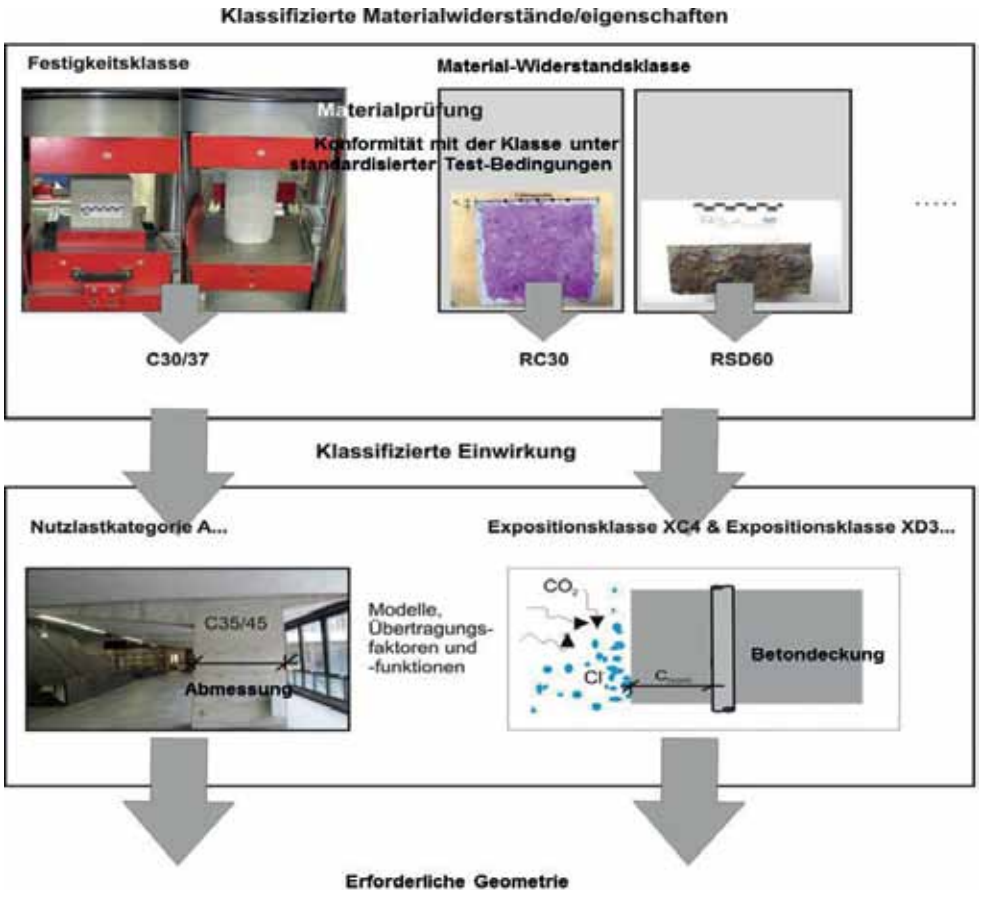



Abbildung 1:
Ablauf der leistungsbasierten Dauerhaftigkeitsbemessung in Analogie zur Tragwerksbemessung

lierte Prognosemodelle zusammengestellt und die Expositionsklassen über die relevanten klimatischen Bedingungen beschrieben. Verifiziert wurde die Zuverlässigkeitsberechnung über Bauwerkszuverlässigkeiten. Die berechneten Zuverlässigkeitsbereiche wurden mit den Zielzuverlässigkeiten heutiger Vorschriften verglichen.

Dem semiprobabilistischen Bemessungskonzept der Tragwerksbemessung in EN 1992-1-1 bzw. EN 1990 folgend wurden Betone in Abhängigkeit ihrer Leistungsfähigkeit in Widerstandsklassen klassifiziert. Es wurden Grenzwerte für die maßgebenden Parameter der Betonzusammensetzung abgeleitet, bei deren Einhaltung sichergestellt werden kann, dass die Anforderungen der spez. Widerstandsklassen erfüllt werden. Abschließend wurden expositionsabhängig mit Hilfe eines semiprobabilistischer Basis entwickelten Bemessungsnomogramms Kombinationen von Betondeckungsmaßen und Materialwiderstandsklassen vorgeschlagen.

Der Vorteil dieser modifizierten Regelungspraxis mit klassifizierten Materialwiderständen und Bemessungsnomogrammen ist:

- Durch die vorgenommene Klassifizierung von Beton in RC-Klassen lässt sich transparent und länderunabhängig (CEN) die Betongüte in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung ablesen. Nationale Regelungen können entfallen.
- Die Klassifizierung von Beton kann genauso nach Eigenschaften über Konformitätsnachweise erfolgen. Dabei besitzen die so erstellten Bemessungsnomogramme auf Basis von Widerstandsklassen genauso ihre Gültigkeit.
- Mit den Bemessungsnomogrammen kann für national identifizierte kritische Expositionsbedingungen in Abhängigkeit der Betongüte (RC-Klasse) die erforderliche Betondeckung abgelesen und so die geforderte Mindestzuverlässigkeit sichergestellt werden.
- Da die Betondeckungsmaße im Nomogramm in Abhängigkeit der Betongüte abgelesen werden können, kann die (deterministische / deskriptive) Bemessung zielgenauer erfolgen.

v.l.n.r.: Stefanie v. Greve-Dierfeld, Prof. Wolfgang Breit, Prof. Christoph Gehlen, Prof. Detlef Heinz, Rigorosum 09.09.2015 (Foto: Florian Hiemer)

# 10. Liste aller Veröffentlichungen

## Prof. Christoph Gehlen

**Gehlen, C.; Greve-Dierfeld, S. v.; Gulikers, J., Helland, S., Rahimi, A. et al.:**
Benchmarking of Deemed-to-Satisfy Provisions in Standards – Durability of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides – State-of-the-art report.
fib Bulletin 76, Fédération internationale du béton, 2015

**Gehlen, C.; Kapteina, G.; Schiessl-Pecka, A.; Mayer, T.F.:**
Life cycle management demonstrated on the example of a parking garage.
EMI 2015, June 16-19, 2015, Stanford University, USA

**Gehlen C.; Lowke D.; Durán, F.; Skarabis, J.:**
Lärmarmes Betonsteinpflaster unter Praxisbedingungen.
59. Betontage, 24.-26.02.2015, bau-verlag, Neu-Ulm

**Gehlen, C.; Rahimi, A.; Reschke, T.; Westendarp, A.:**
Chloride transport in repaired concrete structural elements.
EMI 2015, June 16-19, 2015, Stanford University, USA

**Gehlen, C.; Rahimi, A.; Reschke, Th.; Westendarp, A.:**
Bewertung der Leistungsfähigkeit von Instandsetzungsmaterialien und der Lebensdauer von instand gesetzten Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung – VI. In: BetonKalender 2015, S. 287-313, 23.01.2015, Bergmeister, E.H.K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.), WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim

**Gehlen, C.; Thiel, C.:**
Schnellkarbonatisierungsprüfung – Konzeption und Ergebnisse.
59. Betontage, 24.-26.02.2015, bau-verlag, Neu-Ulm

**Gehlen, C.; Thiel, C.:**
Schnellprüfverfahren zur Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes.
59. Betontage, 24.-26.02.2015, bau-verlag, Neu-Ulm

**Franke, W.; Thiel, C.; Durán, F.; Gehlen, C.:**
Effect of Calcium Nitrate on the freeze-thaw-resistance of concrete.
BFT International Vol. 81, 2015

**Hiemer F.; Keßler S.; Gehlen C.:**
Reinforcement corrosion behavior in bending cracks after short-time chloride exposure.
ICCRRR 2015, 4th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, 05.-07.10.2015, Leipzig, S. 99-106, CRC Press/Balkema

**Hiemer F.; Keßler S.; Gehlen C.:**
Korrosionsverhalten von Betonstahl im Bereich von Biegerissen nach kurzzeitiger Chloridbelastung.
4. Kolloquium, Erhaltung v. Bauwerken, 27.-28.01.2015, S. 447 – 455, TAE e.V., Ostfildern

**Kessler, S.; Angst, U. Zintel, M.; Gehlen, C.:**
Defects in epoxy coated reinforcement and its impact on service-life of concrete structures. Structural Concrete (Journal of the fib) Volume 16 (3), S. 398 – 405, Ernst & Sohn, Weinheim

**Kessler, S.; Gehlen, C.:**
Probability of Detection of corrosion detection in reinforced concrete structures.
International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 15.-17.09.2015, BAM, Berlin

**Kessler, S.; Gehlen, C.:**
Probability of Detection of Potential Mapping and its Impact on Service Life Prediction.
12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, July 12–15, 2015, CERRA International, Vancouver, Canada

**Kränkel, T.; Lowke, D.; Gehlen, C.:**
Prediction of the creep behaviour of bonded anchors until failure – A rheological approach.
Construction and Building Materials, Volume 75, 2015, pp 458 – 464, Elsevier

**Rahimi, A.; Gehlen, C.; Reschke, T.; Westendarp A.:**
Chloride Transport in Concrete Structural Elements after Repair.
fib Symposium 2015, May 18–19, 2015, Copenhagen, DK

**Rahimi, A.; Gehlen, C.; Reschke, T.; Westendarp, A.:**
Restnutzungsdauer von instand gesetzten Stahlbetonbauteilen unter Berücksichtigung der Chloridumverteilung. ibausil 2015, 16.–18.09.15, Bauhaus-Universität, Weimar

**Rahimi, A.; Gehlen, C.; Reschke, T.; Westendarp, A.:**
Impact of Chloride Redistribution on the Service Life of Repaired Concrete Structural Elements.
ICCRRR 2015, October 05 – 07, 2015, MFPA Leipzig

**Steffen, S.; Männel, M.; Lowke, D.; Duran, F.; Gehlen, C.; Braun, T.; Schmidt, M.:**
Lärmarmes Betonsteinpflaster – Neue Ergebnisse aus Forschung und Praxis.
Straße und Autobahn 66 (2), 2015, S. 100 – 107

## Prof. Christian Große

**Grosse, C. U.:**
Concepts for the integration of NDT courses into the academic curriculum of universities.
International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 15. – 17.09.2015, Berlin

**Andreisek, G.; Große, C. U.; Seeber, B. U.:**
Attribute zur Beschreibung akustischer Unterschiede von Fehlstellen an Rotorblättern von Windenergieanlagen.
Fortschritte der Akustik – DAGA '15, 2015, pp. 513 – 515

**Flohr, K.; Malm, F.; Große, C. U.:**
Schallemissionsanalyse zur Untersuchung der Effizienz von Selbstheilungsmechanismen in Beton.
20. Kolloquium Schallemission, Juni 2015, Garmisch-Partenkirchen

**Föhr, P.; Pflieger, I. N.; Stolberg-Stolberg, J.; Wittek, M.; von Deimling, C.; Große, C. U.; Burgkart, R.:**
Einfluss der Stempelporosität auf die viskoelastischen Eigenschaften von Knorpel und Knorpelregeneraten.
9. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomechanik (DGfB), 06. – 08.05.2015, Bonn/Deutschland

**Groschup, R.; Grosse, C. U.:**
Enhancing Air-Coupled Impact-Echo with Microphone Arrays.
International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 15. – 17.09.2015, Berlin

**Groschup, R.; Grosse, C. U.:**
MEMS Microphone Array Sensor for Air-Coupled Impact-Echo.
Sensors (2015), Volume 15, Issue 7, Pages 14932-14945

**Gruyaert, E.; Feiteira, J.; Malm, F.; Tziviloglou, E.; Schlangen, E.; Grosse, C. U.; De Belie, N.:**
Non-destructive testing techniques to evaluate the healing efficiency of self-healing concrete at lab-scale.
6th International Conference on Emerging Technologies in Nondestructive Testing, Brussels, Belgium

**Hornfeck, C.; Geiss, C.; Rücker, M.; Grosse, C. U.:**
Comparative Study of State of the Art Nondestructive Testing Methods with the Local Acoustic Resonance Spectroscopy to Detect Damages in GFRP.
Journal of Nondestructive Evaluation Volume 34 (Issue 2), 2015, pp 1–14

**Kiefel, D.; Stoessel, R.; Grosse, C. U.:**
Quantitative impact characterization of aeronautical CFRP materials with non-destructive testing methods.
In 41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation,2015, Volume 34 (Vol. 1650, pp. 591–598), AIP Publishing

**Kocur, G. K.; Saenger, E. H.; Grosse, C. U.; Vogel, T.:**
Time reverse modeling of acoustic emissions in a reinforced concrete beam.
Ultrasonics Volume 65, 2016, pp 96–104

**Lotz, S.; Jatzlau, P.; Grosse, C. U.:**
Wärmeflussthermographie an Radfahrerbekleidung.
DGZfP-Berichtsband BB 154, Thermographie-Kolloquium Oktober 2015, Leinfelden-Echterdingen

**Lotz, S.; Fiebiger, J.; Jatzlau, P.; Große, C. U.:**
Möglichkeiten und Grenzen der Lock-In-Thermografie zur Prüfung von Faserverbund-Integralholmen von Flugzeugtragflächen.
DGZfP-Berichtsband BB 154, Thermographie-Kolloquium Oktober 2015, Leinfelden-Echterdingen

**Malm, F.; Grosse, C. U.:**
Proof of efficiency: Examination of concrete beams with self-healing properties by non-destructive testing methods.
Fifth International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM2015), Durham, NC (U.S.A.), 2015

**Prade, F.; Chabior, M.; Malm, F.; Grosse, C. U.; Pfeiffer, F.:**
Observing the setting and hardening of cementitious materials by X-ray dark-field radiography.
Cement and Concrete Research (2015), Vol 74, pp 19–25

**Richter, R.; Juknat, M.; Dehn, F.; Große, C. U.:**
Überwachung der zeitabhängigen Entwicklung des Abplatzverhaltens von Beton unter Brandeinwirkung.
Beton- und Stahlbetonbau, Volume 110 (Issue 5), 2015, pp 349–354

**Richter, R.; Grosse, C. U.:**
Tunnel fires: preventing explosive spalling of concrete. concrete – volume 49, Issue 06, July 2015

## Prof. Detlef Heinz

**Heinz, D.; Urbonas, L.:**
Modifizierung zementgebundener Baustoffe durch gezielte Carbonatisierung.
ibausil 2015, 16. – 18.09.15, Bauhaus-Universität, Weimar S. 141–152

**Dressler, A.; Stangl, T. M.; Urbonas, L.; Heinz, D.:**
Belit-Calciumsulfoaluminatzement aus flugaschehaltigem Rohmehl – Einfluss von Alkalien auf den Hydratationsverlauf und den Phasenbestand.
ibausil 2015, 16.–18.09.15, Bauhaus-Universität, Weimar, S. 1-423 – 1-430

**Dressler, A.; Stangl, T. M.; Urbonas, L.; Heinz, D.:**
Fly Ash for Belite Calcium Sulfoaluminate Cement – Effect of Alkalis on Clinker Formation and Hydration.
14th International Congress of the Chemistry of Cement, 13.–16.10.2015, Peking, CN

**Fischer, K.; Urbonas, L.; Heinz, D.:**
Reaktionsverhalten granitischer Gesteinskörnungen in Beton unter AKR beschleunigenden Bedingungen in Laborprüfverfahren.
ibausil 2015, 16.–18.09.15, Bauhaus-Universität, Weimar, S. 1-1397 bis 1-1404

**Irbe, L.; Urbonas, L.; Heinz, D.:**
Aktivierung von Steinkohlenflugaschen.
ibausil 2015, 16.–18.09.15, Bauhaus-Universität, Weimar S. 947–954

**Müllauer, W.; Beddoe, R. E.; Heinz, D.:**
Leaching behaviour of major and trace elements from concrete: Effect of fly ash and GGBS.
Cement and Concrete Composites Vol. 58, 2015, S. 129–139, Elsevier

## AG 1 Bindemittel und Zusatzstoffe

**Dressler, A.; Stangl, T. M.; Urbonas, L.; Heinz, D.:**
Belit-Calciumsulfoaluminatzement aus flugaschehaltigem Rohmehl – Einfluss von Alkalien auf den Hydratationsverlauf und den Phasenbestand.
ibausil 2015, 16.–18.09.15, Bauhaus-Universität, Weimar, S. 1-423 – 1-430

**Dressler, A.; Stangl, T. M.; Urbonas, L.; Heinz, D.:**
Fly Ash for Belite Calcium Sulfoaluminate Cement – Effect of Alkalis on Clinker Formation and Hydration.
14th International Congress of the Chemistry of Cement, 13.–16.10.2015, Peking, CN

**Fischer, K.; Urbonas, L.; Heinz, D.:**
Reaktionsverhalten granitischer Gesteinskörnungen in Beton unter AKR beschleunigenden Bedingungen in Laborprüfverfahren.
ibausil 2015, 16.–18.09.15, Bauhaus-Universität, Weimar, S. 1-1397 bis 1-1404

**Heinz, D.; Urbonas, L.:**
Modifizierung zementgebundener Baustoffe durch gezielte Carbonatisierung.
ibausil 2015, 16.–18.09.15, Bauhaus-Universität, Weimar S. 141–152

**Irbe, L.; Urbonas, L.; Heinz, D.:**
Aktivierung von Steinkohlenflugaschen.
ibausil 2015, 16.–18.09.15, Bauhaus-Universität, Weimar S. 947–954

**Kybartiene, N., Valancius, Z., Leskeviciene, V., Urbonas L.:**
Influence of the composition of phosphate rock on the amount of water-insoluble phosphate impurities in semi-hydrate phosphogypsum.
Ceramics – Silikaty 59 (1), 2015

**Müllauer, W.; Beddoe, R. E.; Heinz, D.:**
Leaching behaviour of major and trace elements from concrete: Effect of fly ash and GGBS.
Cement and Concrete Composites Vol. 58, 2015, S. 129–139, Elsevier

**Siauciunas, R.; Gendvilas, R.; Mikaliunaite, J.; Urbonas L.:**
Heat flow and strength properties of perspective hydraulic binder material.
Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 121 (1), 2015, S. 57 – 65, Springer

## AG 2 Betontechnologie

**Beckenbauer T.; Skarabis J.:**
Lärmminderung – Optimierung verschiedener Varianten bei Betonbelägen.
Schweizer Fachtagung Betonstraßen, 05.05.2015, Betonsuisse, S. 94 – 101

**Franke, W.; Thiel, C.; Durán, F.; Gehlen, C.:**
Effect of Calcium Nitrate on the freeze-thaw-resistance of concrete.
BFT International Vol. 81, 2015

**Gehlen C.; Lowke D.; Durán, F.; Skarabis, J.:**
Lärmarmes Betonsteinpflaster unter Praxisbedingungen.
59. Betontage, 24.–26.02.2015, bau-verlag, Neu-Ulm

**Gehlen, C.; Thiel, C.:**
Schnellkarbonatisierungsprüfung – Konzeption und Ergebnisse.
59. Betontage, 24.–26.02.2015, bau-verlag, Neu-Ulm

**Gehlen, C.; Thiel, C.:**
Schnellprüfverfahren zur Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes.
59. Betontage, 24.–26.02.2015, bau-verlag, Neu-Ulm

**Kränkel, T.; Lowke, D.; Gehlen, C.:**
Prediction of the creep behaviour of bonded anchors until failure – A rheological approach.
Construction and Building Materials, Volume 75, 2015, pp 458 – 464, Elsevier

**Lowke, D.:**
Robustheit von SVB auf dem Niveau von Rüttelbeton.
59. Betontage, 24.–26.02.2015, bau-verlag, Neu-Ulm

**Steffen, S.; Männel, M.; Lowke, D.; Durán, F.; Gehlen, C.; Braun, T.; Schmidt, M.:**
Lärmarmes Betonsteinpflaster – Neue Ergebnisse aus Forschung und Praxis.
Straße und Autobahn 66 (2), 2015, S. 100–107

## AG 3 Stahl und Korrosion

**Gehlen, C.; Greve-Dierfeld, S. v.; Gulikers, J., Helland, S., Rahimi, A. et al.:**
Benchmarking of Deemed-to-Satisfy Provisions in Standards – Durability of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides – State-of-the-art report.
fib Bulletin 76, Fédération internationale du béton, 2015

**Gehlen, C.; Rahimi, A.; Reschke, T.; Westendarp, A.:**
Chloride transport in repaired concrete structural elements.
EMI 2015, June 16–19, 2015, Stanford University, USA

**Gehlen, C.; Rahimi, A.; Reschke, Th.; Westendarp, A.:**
Bewertung der Leistungsfähigkeit von Instandsetzungsmaterialien und der Lebensdauer von instand gesetzten Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung – VI.
In: BetonKalender 2015, S. 287–313, 23.01.2015, Bergmeister, E.H.K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.), WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim

**Hiemer F.; Keßler S.; Gehlen C.:**
Korrosionsverhalten von Betonstahl im Bereich von Biegerissen nach kurzzeitiger Chloridbelastung.
4. Kolloquium, Erhaltung v. Bauwerken, 27.–28.01.2015, S. 447 – 455, TAE e.V., Ostfildern

**Kessler, S.; Angst, U. Zintel, M.; Gehlen, C.:**
Defects in epoxy coated reinforcement and its impact on service-life of concrete structures.
Structural Concrete (Journal of the fib) Volume 16 (3), S. 398 – 405, Ernst & Sohn, Weinheim

**Kessler, S.; Gehlen, C.:**
Probability of Detection of corrosion detection in reinforced concrete structures.
International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 15.–17.09.2015, BAM, Berlin

**Kessler, S.; Gehlen, C.:**
Probability of Detection of Potential Mapping and its Impact on Service Life Prediction.
12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, July 12–15, 2015, CERRA International, Vancouver, Canada

**Rahimi, A.; Gehlen, C.; Reschke, T.; Westendarp A.:**
Chloride Transport in Concrete Structural Elements after Repair.
fib Symposium 2015, May 18–19, 2015, Copenhagen, DK

**Rahimi, A.; Gehlen, C.; Reschke, T.; Westendarp, A.:**
Restnutzungsdauer von instand gesetzten Stahlbetonbauteilen unter Berücksichtigung der Chloridumverteilung. ibausil 2015, 16.–18.09.15, Bauhaus-Universität, Weimar

**Rahimi, A.; Gehlen, C.; Reschke, T.; Westendarp, A.:**
Impact of Chloride Redistribution on the Service Life of Repaired Concrete Structural Elements.
ICCRRR 2015, October 05–07, 2015, MFPA Leipzig

**Westendarp, A.; Becker, H.; Bödefeld, J.; Fleischer, H.; Kunz, C.; Maisner, M.; Müller, H.; Rahimi, A.; Reschke, Th.; Spörel, F.:**
Erhaltung und Instandsetzung von massiven Verkehrswasserbauwerken – IV.
In: E.H. K. Bergmeister, F. Fingerloos and J.-D. Wörner (Hrsg.): BetonKalender 2015, S. 185–246, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2015

## AG 4 Chemie

**Gutberlet, T.; Hilbig, H.; Beddoe, R. E.:**
Acid attack on hydrated cement — Effect of mineral acids on the degradation process.
In: Cement and Concrete Research, 74 (2015), S. 35–43
doi: 10.1016/j.cemconres.2015.03.011

**Hilbig, H.; Löhr, E.; Gutberlet, T.; Beddoe, R. E.:**
Einfluss aluminiumhaltiger Zusatzstoffe auf die Struktur und Festigkeit der korrodierten Schicht von Beton beim Säureangriff.
ibausil 2015, 16.–18.09.15, Bauhaus-Universität, Weimar, 29-04

**Huber, M.; Hilbig, H.; Drewes, J. E.; Helmreich, B.:**
Einfluss von Auftausalzen auf die Remobilisierung von auf Filtermaterialien zur Behandlung von Verkehrsflächenabflüssen zurückgehaltenen Schwermetallen.
5. Aqua Urbanica, 07.–08. Okt. 2105, Stuttgart

## AG 5 Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine

**Wörner, T.:**
Ermittlung performance-relevanter Asphaltkennwerte – Zuverlässig Prüfen und Dimensionieren.
Straße und Autobahn (4), 2015, S. 256 – 261

## AG 6 Zerstörungsfreie Prüfung

**Flohr, K.; Malm, F.; Große, C. U.:**
Schallemissionsanalyse zur Untersuchung der Effizienz von Selbstheilungsmechanismen in Beton.
20. Kolloquium Schallemission, Juni 2015, Garmisch-Partenkirchen

**Groschup, R.; Grosse, C. U.:**
Enhancing Air-Coupled Impact-Echo with Microphone Arrays.
International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 15.–17.09.2015, Berlin

**Groschup, R.; Grosse, C. U.:**
MEMS Microphone Array Sensor for Air-Coupled Impact-Echo.
Sensors (2015), Volume 15, Issue 7, pp 14932–14945

**Gruyaert, E.; Feiteira, J.; Malm, F.; Tziviloglou, E.; Schlangen, E.; Grosse, C. U.; De Belie, N.:**
Non-destructive testing techniques to evaluate the healing efficiency of self-healing concrete at lab-scale.
6th International Conference on Emerging Technologies in Nondestructive Testing, 27.–29.05.15, Brussels, Belgium

**Lotz, S.; Jatzlau, P.; Große, C. U.:**
Wärmeflussthermographie an Radfahrerbekleidung.
DGZfP-Berichtsband BB 154, Thermographie-Kolloquium 2.10.2015, Leinfelden-Echterdingen

**Lotz, S.; Fiebiger, J.; Jatzlau, P.; Große, C. U.:**
Möglichkeiten und Grenzen der Lock-In-Thermografie zur Prüfung von Faserverbund-Integralholmen von Flugzeugtragflächen.
DGZfP-Berichtsband BB 154, Thermographie-Kolloquium 2.10.2015, Leinfelden-Echterdingen

**Malm, F.; Grosse, C. U.:**
Proof of efficiency: Examination of concrete beams with self-healing properties by non-destructive testing methods.
Fifth International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM2015), June 22–24,2015 Durham, NC (USA)

**Prade, F.; Chabior, M.; Malm, F.; Grosse, C. U.; Pfeiffer, F.:**
Observing the setting and hardening of cementitious materials by X-ray dark-field radiography.
Cement and Concrete Research (2015), Vol. 74, pp. 19–25

# 11. Ausgewählte Veröffentlichung

**Beitrag zur 19. Internationalen Baustofftagung „ibausil“, 16. – 18.09.2015, Bauhaus-Universität, Weimar**

## 11.1. Modifizierung zementgebundener Baustoffe durch gezielte Carbonatisierung

Detlef Heinz, Liudvikas Urbonas

### 1. Einleitung

Die Carbonatisierung des Betons durch das in der Luft vorhandene $CO_2$ ist in der Regel ein langsamer Prozess, der zur Absenkung des pH-Werts in der oberflächennahen Betonschicht führt und zur Korrosion einer Stahlbewehrung beitragen kann. Es ist aber auch bekannt, dass durch die Carbonatisierung die Festigkeiten von zementgebundenen Bauteilen unter bestimmten Bedingungen steigen können [1–5]. Shi et al. [2] haben festgestellt, dass die Carbonatisierung von Leichtbetonen im frühen Alter für das Erreichen höherer Frühfestigkeiten die Wärmebehandlung ersetzen kann [2]. Shao et al. [3] haben die Frühfestigkeiten von zementgebundenen Faserplatten durch die Behandlung in einem Abgas aus einem Drehrohrofen deutlich erhöht. Auch die Verwendung von $CO_2$-Gas während der Herstellung von zementgebundenen Holzfaserplatten führt zu einem positiven Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung [4, 5].

In den letzten Jahren wurde versucht, in Zusammenhang mit den Anstrengungen zu einer vermehrten stofflichen $CO_2$-Bindung auch neue effektive Bindemittelsysteme zu entwickeln. So wurden durch die mineralische $CO_2$-Sequestrierung Magnesia-Binder (Novacem) [6] entwickelt, die z.T. auch durch eine Carbonatisierung erhärten. De Silva et al. [7] haben gezeigt, dass eine künstliche Carbonatisierung von Proben aus Kalk-Magnesia-Binder bei 20 bar zu einer deutlichen Festigkeitserhöhung führt. Auch hydraulisch nicht aktive Calciumsilikate, wie $\gamma$-$Ca_2SiO_4$ und Wollastonit ($CaSiO_3$), können durch die Carbonatisierung aktiviert werden [8]. Neuere Veröffentlichungen [9, 10] berichten über die Entwicklung eines neuartigen Bindemittels mit hydraulisch inerten Calciumsilikaten - Rankinit ($3CaO{\cdot}2SiO_2$) und Wollastonit, bzw. Pseudowollastonit ($CaO{\cdot}SiO_2$). Die Erstarrung und die Erhärtung dieses Bindemittels erfolgt durch eine Carbonatisierung in $CO_2$-reichem Gas bei Atmosphärendruck und Temperaturen zwischen 20 und 60 °C. Dabei entstehen als festigkeitsbildende Phasen Calcit und amorphes $SiO_2$. Dieses Bindemittel ist für die Herstellung von Betonfertigteilen geeignet. Laut Autoren können die erhärteten Betone bis zu 70 MPa Druckfestigkeit und bis zu 8 MPa Biegezugfestigkeit erreichen.

In den 90er-Jahren wurden amerikanische Patente zur festigkeitssteigernden Behandlung zement- und kalkgebundener Materialien mit überkritischem $CO_2$ ($scCO_2$) veröffentlicht [11]. In späteren wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu der Wirkung von $scCO_2$ hat man sich hauptsächlich mit den Phasen- und Strukturveränderungen der behandelten Zementsteine befasst [12–15]. Es wurde festgestellt, dass eine $scCO_2$-Behandlung des Zementsteins zu einem vollständigen Abbau des Portlandits, der C-S-H-Phasen und des Ettringits unter Bildung von Calciumcarbonat führt. Bevorzugt entsteht von den drei $CaCO_3$ Modifikationen dabei der Calcit. Die Carbonatisierung der C-S-H-Phasen führt zur Bildung von hochpolymerisierten Silikagelen [13, 15, 16]. Dabei sinkt die Porosität des Zementsteins deutlich [12, 15, 16] und die Druckfestigkeit steigt erheblich [16]. Short et al. [15] haben festgestellt, dass die Vorlagerungsfeuchte von Zementsteinen den Behandlungsprozess mit $scCO_2$ beeinflusst. Die günstigste relative Vorlagerungsfeuchte für den maximalen Phasenumsatz während der $scCO_2$-Behandlung soll bei ca. 35 % liegen. Außerdem wurde über einen

positiven Einfluss einer $scCO_2$-Behandlung auf die Festigkeiten von zementgebundenen Glasfaser- [17], Holzfaserplatten [18] sowie durch einen Pressvorgang hergestellter Proben mit Zement-Kalk-Binder [19] berichtet.
In bisherigen Veröffentlichungen wurde der Einfluss der Zementzusammensetzung und der Feinheit auf den Carbonatisierungsverlauf zementgebundener Werkstoffe in $scCO_2$ und die Festigkeitsentwicklung nicht oder nur beschränkt betrachtet. Es ist zu erwarten, dass der Alkaligehalt des Zementes durch die Veränderung der Porenlösungszusammensetzung den Verlauf der Carbonatisierung beeinflussen kann. Ziel der hier vorgestellten Arbeiten war es, den Einfluss der Zementalkalität, der $C_3A$-, bzw. $C_4AF$-Gehalte des Zementes und der Zementfeinheit (Festigkeitsklasse) auf die Struktur- und Phasenveränderungen und die Festigkeiten des Zementsteines zu ermitteln.

## 2. Versuchsdurchführung

### 2.1. Untersuchungsmethoden und Ausgangsmaterialien

Die chemische Zusammensetzung der Zemente wurde nasschemisch nach Lithiummetaborat-Aufschluss durch Analyse mit ICP OES bestimmt. Die Bestimmung der kristallinen Mineralphasen erfolgte mittels Röntgendiffraktometrie (Theta-Theta Goniometer 3003 TT der Firma Agfa NDT Pantak Seifert). Die Zugabe von 10 % ZnO diente dabei als interner Standard für die quantitative Bestimmung des amorphen Anteils nach der Rietveld-Methode. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen erfolgten an Bruchstücken und Dünnschliffen der Zementsteinproben (REM Jeol JSM5900LV). Punktuelle quantitative Analysen wurden mit einem EDX-System (Firma Röntec) durchgeführt. Die Porosität und die Porengrößenverteilung von Zementsteinproben wurden mit einem Quecksilberdruckporosimeter (AutoPore III der Fa. Micromeritics) ermittelt. Die spezifische Oberfläche von Zementproben wurde nach DIN EN 196-6 ermittelt. Die Carbonatisierungstiefe wurde durch Besprühen von Probenbruchflächen mit ethanolischer Phenolphthaleinlösung gemessen. Die Festigkeit der Proben wurde nach EN 196-1 bestimmt.

In den Tabellen 1 und 2 sind die chemische und mineralogische Zusammensetzung bzw. spezifische Oberfläche nach Blaine der verwendeten Zemente dargestellt. Die alkalireichen Zemente C1, C1A und C1B sind aus Klinker desselben Zementwerks hergestellt und unterscheiden sich hauptsächlich in der Feinheit. Der Zement C2 ist ein alkaliarmer Zement. Die Zemente C3 und C4 unterscheiden sich hauptsächlich in den Gehalten an $C_3A$ und C4AF.

Tabelle 1:
Chemische Zusammensetzung der Zemente in M.-%

| Name | Zement | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $SO_3$ | $K_2O$ | $Na_2O$ | $Na_2O_{eq}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | M.-% | | | | | | | | |
| C1 | CEM I 32,5 R | 18,70 | 5,01 | 3,53 | 61,34 | 1,64 | 2,81 | 1,20 | 0,24 | 1,02 |
| C1A | CEM I 42,5 R | 18,56 | 5,86 | 3,52 | 63,74 | 1,76 | 3,17 | 1,24 | 0,25 | 1,06 |
| C1B | CEM I 52,5 R | 18,07 | 5,45 | 3,36 | 63,79 | 1,74 | 3,52 | 1,23 | 0,25 | 1,06 |
| C2 | CEM I 32,5 R | 22,09 | 4,95 | 2,80 | 62,55 | 0,99 | 2,70 | 0,46 | 0,26 | 0,56 |
| C3 | CEM I 32,5 R | 20,04 | 5,06 | 2,29 | 65,44 | 1,49 | 2,45 | 0,97 | 0,19 | 0,83 |
| C4 | CEM I 32,5 N SR | 20,00 | 3,71 | 5,60 | 63,67 | 1,88 | 2,35 | 0,84 | 0,12 | 0,67 |

| Zement | $C_3S$ | $C_2S$ | $C_3A$ | $C_4AF$ | Sp. Oberfläche |
|---|---|---|---|---|---|
| | M.-% | | | | cm²/g |
| C1 | 56,6 | 11,3 | 6,6 | 12,6 | 3200 |
| C1A | 57,5 | 13,7 | 8,8 | 11,8 | 4000 |
| C1B | 57,0 | 13,7 | 8,7 | 9,2 | 5000 |
| C2 | 45,7 | 23,7 | 8,7 | 8,7 | 3250 |
| C3 | 56,0 | 15,6 | 9,1 | 7,1 | 2650 |
| C4 | 48,3 | 22,1 | 1,3 | 18,7 | 3600 |

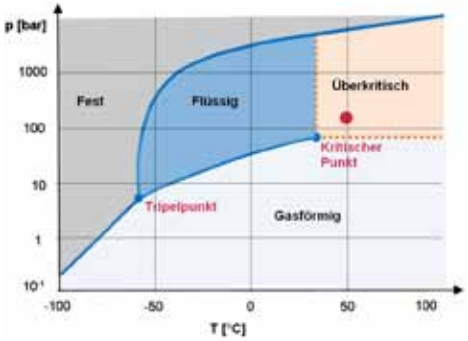
Tabelle 2: Mineralogische Zusammensetzung und spezifische Oberfläche nach Blaine der verwendeten Zemente

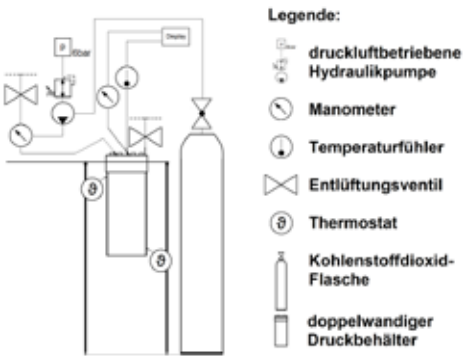
Aus den Zementen wurden Mörtelproben mit Abmessungen 4 x 4 x 16 cm³ nach DIN EN 196-1 mit w/z-Werten von 0,5 hergestellt. Für die Herstellung ausgewählter Proben diente Kalksteinbrechsand mit der Korngrößenverteilung des Normsandes als Gesteinskörnung. Um den Einfluss des $Na_2O$-Äqu. auf die Carbonatisierung näher zu untersuchen, wurde der Alkaligehalt des Portlandzements C2 mit 0,56 M.-% $Na_2O$-Äqu. mittels Zugabe von NaOH auf das $Na_2O$-Äquivalent von C1 (1,02 M.-%) bei der Probenherstellung angehoben.

Parallel zu den Mörtelproben wurden Pasten mit einem w/z-Wert von 0,5 hergestellt. Um eine Sedimentation der fließfähigen Bindemittelleime zu verhindern, wurden die Mischungen vor dem Einfüllen in die Schalungen (160 x 40 x 40 mm³) in Weithalsflaschen gefüllt und in Rotation gehalten, bis eine Konsistenz von 7±1 cm, mittels Mini-Slump-Test gemessen, erreicht wurde.

Nach 1 d Lagerung in Form bei 20 °C und > 95 % r.F. wurden die Mörtel-, bzw. Pastenprismen ausgeformt. Weiter wurden die Proben 1 d bei 20 °C und 65 % r.F und anschließend bei 20 °C und 35 % r.F. bis zur $CO_2$-Behandlung gelagert. Das Alter der Proben betrug 1, 7, bzw. 14 d bei der $CO_2$-Behandlung.

Der kritische Punkt im pT-Phasendiagramm des Kohlendioxids (Abbildung 1) liegt bei 72,8 bar und 31,2 °C. Die Proben wurden 4 bzw. 24 h in einem Reaktor (Abbildung 2) in $scCO_2$ mit einem Druck von 150 bar und bei einer durch Thermostat kontrollierten Temperatur von 50 °C behandelt (roter Punkt, Abb. 1). Der relativ hohe Druck von 150 bar wurde gewählt, um die Eindringung von $scCO_2$ in die Zementsteinmatrix möglichst zu beschleunigen. Der Aufbau des Drucks erfolgte innerhalb einer Stunde. Während des Druckaufbaus stieg durch die exotherme Carbonatisierungsreaktion die Temperatur im Druckreaktor bei Mörtelproben bis zu ca. 60 °C, bei Pastenproben bis zu ca. 75 °C. Der Abbau des Drucks erfolgte




links Abbildung 1: Phasendiagramm des Kohlenstoffdioxids [20]

rechts Abbildung 2: Anlage für die $scCO_2$-Behandlung

in der Regel innerhalb einer Stunde, wurde aber teilweise auf 3 Stunden verlängert, da die Mörtelproben mit Zementen höherer Festigkeitsklasse C1A und C1B bei einstündigem Druckabbau zerstört wurden. Zusätzlich wurde die 4 bzw. 24-stündige Carbonatisierung im gasförmigen $CO_2$ bei 20 °C und 50 bar durchgeführt. Nach der $scCO_2$-Behandlung wurden die Proben mit feuchten Tüchern abgedeckt, falls nötig auf 20 °C abgekühlt und auf ihre Carbonatisierungstiefe, Länge, Gewicht und Festigkeit hin untersucht. Parallel erfolgten die Untersuchungen an nicht carbonatisierten Referenzproben. Die Porosität, die Porengrößenverteilung und die Gefügeausbildung wurden an Bruchstücken der Proben untersucht. Für die Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung mittels XRD wurden die Proben bei 40 °C getrocknet und < 32 µm aufbereitet.

## 2.2. Ergebnisse und Diskussion

### 2.2.1. Carbonatisierungstiefe

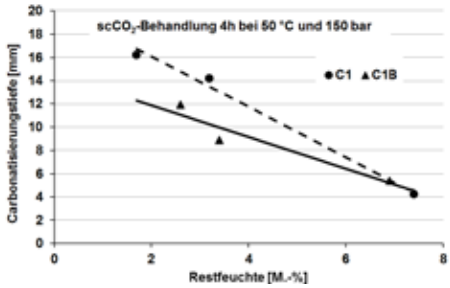



Abbildung 3: Carbonatisierungstiefe von Mörtelproben mit CEM 32,5 R (C1) und CEM 52,5 R (C1B) nach der $scCO_2$-Behandlung bei 50 °C und 150 bar in Abhängigkeit von der Feuchte der Proben vor der Carbonatisierung. Die Restfeuchte wurde durch die Trocknung der Proben bei 50 °C bis zum Gleichgewicht ermittelt.

Die Carbonatisierungsgeschwindigkeit von Zementstein- bzw. Mörtelproben ist in erster Linie von Porosität und Feuchte des Zementsteins abhängig [16]. Mit zunehmender Zementsteinfeuchte und abnehmender Porosität nimmt die Carbonatisierungsgeschwindigkeit deutlich ab. So zeigten die Mörtelprismen mit zunehmender Vorlagerungsdauer, d.h. mit abnehmender Feuchte, eine zunehmende Carbonatisierungstiefe nach $scCO_2$ Behandlung (Abb. 3). Eine höhere Zementfeinheit (höhere Festigkeitsklasse) führte zu einem höheren Hydratationsgrad des Zementes und damit zu einer geringeren Porosität des Zementsteines, was sich negativ auf die Carbonatisierungstiefe auswirkte.

Bei gleichbleibender Porosität spielte auch der Alkaligehalt des Zementsteins eine Rolle. Die Carbonatisierungstiefe der Mörtelproben mit C1 und C2 war von dem Alkaligehalt des Zements abhängig. Die Proben mit höherem Zementalkaligehalt C1 zeigten insgesamt geringere Carbonatisierungstiefen (Abb. 4). Der Zement C1 enthält mehr Alit und damit auch mehr Portlandit im Zementstein als der alkaliärmere Zement C2. Die Porositäten der Referenzproben mit C1 und C2 waren nahezu identisch. Um zu klären, ob hauptsächlich der Alkaligehalt oder auch der $C_3S$-Gehalt des Zementes einen Einfluss auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit ausübt, wurde — wie schon erwähnt — dem alkaliärmeren Zement NaOH bis zum Alkaligehalt des Zementes C1 zudosiert. Die Alkalizugabe führte zu einer geringeren Carbonatisierungstiefe, als die bei den Proben mit Zement C1 gemessene (Abb. 4), d.h. die Carbonatisierungsgeschwindigkeit nimmt mit dem Alkaligehalt des Zements ab. Eine fast vollständige Carbonatisierung zeigten die Mörtelproben mit $C_3A$-armen und alkaliarmen SR-Zement C4.

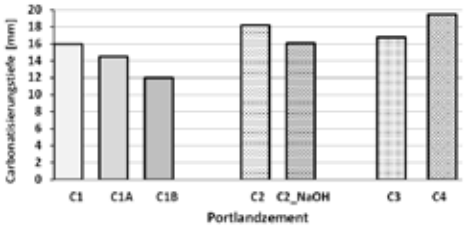



Abbildung 4: Carbonatisierungstiefe von Mörtelproben nach der Behandlung im $scCO_2$ bei 50 °C und 150 bar in Abhängigkeit von dem verwendeten Zement. C2_NaOH – bis zum $Na_2Oeq$ des Zementes von 1,02 M.-% alkalidotierte Probe.

### 2.2.2. Druck- und Biegezugfestigkeiten

Die $scCO_2$-Behandlung bei 150 bar führte zu deutlichen Druckfestigkeitszunahmen der Mörtelproben (Abb. 5). Nach 4 h Behandlung wurden in Abhängigkeit von der Carbonati-

sierungstiefe relative Festigkeiten (bezogen auf Festigkeiten der Referenzproben) von ca. 120 bis ca. 270 % gemessen (Abb. 5). Die absoluten Druckfestigkeiten der Proben mit Portlandzementen der Festigkeitsklasse 32,5 R (N) waren mit ca. 64 bis 68 MPa deutlich höher als die 28 d-Normfestigkeiten dieser Zemente (Abb. 6). Die höchste Druckfestigkeit von 71 MPa wurde an Mörtelproben mit Kalksteinbrechsand gemessen. Diese Proben hatten allerdings durch massenbezogenen Austausch des Normsandes einen höheren Volumenanteil an Leim. Die Verwendung von Portlandzementen höherer Festigkeitsklassen führte zu einem geringeren Festigkeitszuwachs. Die Druckfestigkeiten der Proben mit alkaliärmeren Zementen C2 und C4 lagen höher als die des alkalireichen Zementes C1.

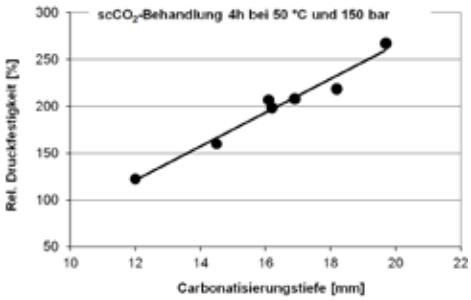
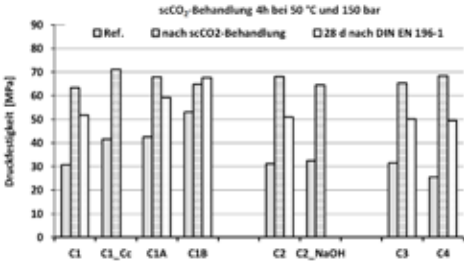
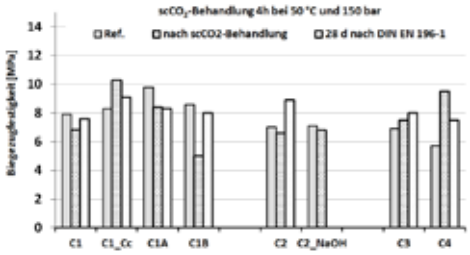



Abbildung 5:
Relative Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Carbonatisierungstiefe. Bezug — die Druckfestigkeit der Referenzproben (identische Vorlagerung) des gleichen Alters




links Abbildung 6:
Druckfestigkeiten der Mörtelproben mit verschiedenen Zementen. C1_Cc – Proben mit Kalkbrechsand, C2_NaOH – mit NaOH dotierte Proben

rechts Abbildung 7:
Biegezugfestigkeit der Mörtelproben mit verschiedenen Zementen. C1_Cc – Proben mit Kalkbrechsand, C2_NaOH – mit NaOH dotierte Proben

Die Carbonatisierung führte meistens zu keiner Erhöhung der Biegezugfestigkeiten der Mörtelproben (Abb. 7). In den meisten Fällen lag die Biegezugfestigkeit unter der der Referenzproben. Ausnahme waren die Proben mit Zement C4. Auch der Austausch des Quarzsandes durch Kalksteinbrechsand analoger granulometrischer Zusammensetzung verbesserte die Biegezugfestigkeiten nach der Carbonatisierung deutlich. Anscheinend diente die carbonatische Gesteinskörnung, im Gegensatz zum Quarzsand, als Kristallisationsfläche für die während der Carbonatisierung entstehenden Carbonatphasen, was zu einer besseren Verzahnung in der Kontaktzone zwischen Gesteinskörnern und Zementmatrix führte. Auch Farahi et al. [19] haben nach einer $scCO_2$-Behandlung den Anstieg der Biegezugfestigkeiten von Mörtelproben mit calcitischer Gesteinskörnung festgestellt.

In früheren eigenen Untersuchungen [21] wurde festgestellt, dass auch die 48 h Behandlung der Zementsteinproben mit w/z = 0,6 in $CO_2$ bei nur 3 bar und 20 °C zur Festigkeitserhöhung führen kann. Daher wurden die Mörtelproben mit C1 zusätzlich 4 h und 24 h bei 20 °C und 50 bar im gasförmigen $CO_2$ behandelt. Auch das Behandlungsregime mit überkritischem $CO_2$ wurde auf 24 h erweitert. Ein Teil der behandelten Proben wurde in Wasser bei 20 °C, bzw. in Klima 20 °C / 65 % r. F. weiter bis zum Alter von 28 d gelagert.

Erwartungsgemäß nahmen die Druckfestigkeiten mit zunehmendem Behandlungsdruck und -dauer zu (Abb. 8). Nach 4-stündiger Carbonatisierung bei 50 bar wurde ein deutlicher Festigkeitszuwachs festgestellt, allerdings lagen die Festigkeiten, auch nach weiterer Lagerung bis zum Alter von 28 d in Wasser, unter dem Niveau der Normfestigkeit. Die 24 h Behandlung im gasförmigen $CO_2$ brachte einen nahezu identischen Festigkeitszuwachs wie die 4 h Behandlung im überkritischen $CO_2$. Die weitere Lagerung der mit $CO_2$

behandelten Proben in Wasser bzw. im Klimaraum bei 20 °C und 65 % r.F. führte zu einem weiteren Anstieg der Druckfestigkeiten. Die höchsten 28 d Druckfestigkeiten wurden nach der anschließenden Lagerung bei 20 °C und 65 % r.F. erreicht und waren bei den 24 h im $scCO_2$ behandelten Proben mit 98 MPa fast doppelt so hoch wie die 28 d-Normfestigkeit. Auch die Biegezugfestigkeiten nahmen deutlich zu und übertrafen die, die an den nach DIN EN 196-1 28 d gelagerten Proben gemessen wurden. Nach der Carbonatisierung bleibt noch ein geringer Anteil an Klinkermineralien unreagiert. Nach dem Druckabbau reagieren die Calciumsilikate mit Wasser unter Bildung von C-S-H-Phasen und Portlandit. Während der weiteren Lagerung ist eine puzzolanische Reaktion zwischen Portlandit und des während der Carbonatisierung entstandenen Silikagels möglich. Die Bildung der C-S-H-Phasen führte zu einer weiteren Erhöhung der Druck- und Biegezugfestigkeiten.

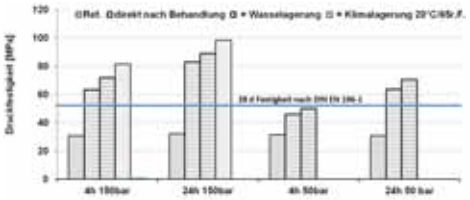



Abbildung 8: Druckfestigkeit der Mörtelproben mit Zement C1 nach verschiedenen Behandlungen

### 2.2.3. Volumenänderung

Unmittelbar nach der Carbonatisierung zeigten Mörtelproben, unabhängig von der Zementzusammensetzung, eine Längenzunahme bis ca. 0,33 mm/m. Mit zunehmender Behandlungsintensität (Druck und Dauer) nahm die Dehnung zu. Die Längenzunahme resultiert möglicherweise aus (a) der Zunahme der Volumen der festen Phasen durch Bildung von $CaCO_3$ aus Portlandit und (b) der Aufnahme von Reaktionswasser, welches sich in den Zwischenräumen des Silikagels bzw. der carbonatisierten C-S-H-Phasen anlagert und zum Quellen führt. Während der Carbonatisierung des Portlandits nimmt das Feststoffvolumen, je nach gebildeter $CaCO_3$-Modifikation, zwischen ca. 2 und 13 % zu. Andererseits ist bekannt, dass die Carbonatisierung der C-S-H-Phasen zu einem Schwindvorgang im Zementstein führt. Nach [22] bzw. [23] ist dieses Schwinden hauptsächlich auf die Bildung der hoch polymerisierten Silikagele und auf eine damit verbundene Volumenreduzierung zurückzuführen. Ob der Zementstein während der Carbonatisierung mit $scCO_2$ quillt oder schwindet, ist von der Porosität des Zementsteins abhängig. In früher durchgeführten Untersuchungen [24] wurde von den Autoren festgestellt, dass bei den Zementsteinproben mit einem höheren w/z-Wert von 0,6 der vorhandene Porenraum ausreicht, um ein zusätzliches Volumen des Feststoffes aufzunehmen, ohne den Aufbau einer Dehnung erzeugenden Spannung. Die Carbonatisierung von C-S-H-Phasen verursacht in diesem Fall die Kontraktion der Proben.

### 2.2.4. Porosität und Porengrößenverteilung

Die Referenzproben mit Zementen der Festigkeitsklasse 32,5 zeigten relativ hohe Porosität, die im Bereich von ca. 40 Vol.-% bei Zementsteinen und ca. 18 Vol.-% bei Mörteln lag. Die Zementzusammensetzung und die Alkalidotierung beeinflusste die Gesamtporosität der Referenzproben nur geringfügig. Mit zunehmender Festigkeitsklasse nahm die Porosität der Referenzproben erwartungsgemäß ab. Die Behand-

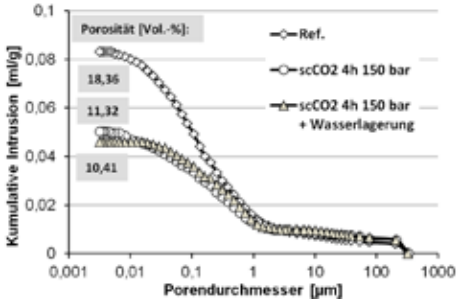



Abbildung 9: Porengrößenverteilung der Mörtelproben mit Zement C4 vor und nach der 4h-Behandlung in $scCO_2$ bei 50 °C und 150 bar Druck, bzw. nach einer weiteren Lagerung der behandelten Proben in Wasser bei 20 °C bis zum Alter von 28 d

lung mit überkritischem bzw. gasförmigem $CO_2$ führte zu einer deutlichen Reduzierung der Porosität und einer Zunahme des Anteils an Gelporen (< 20 nm). Die Lagerung der carbonatisierten Proben in Wasser führte zu einer weiteren Reduzierung der Porosität. Der Anteil an Gelporen nahm dabei ab. In der Abbildung 9 ist als Beispiel die Porengrößenverteilung der Mörtelproben mit Zement C4 dargestellt.

### 2.2.5. Mineralogische Untersuchungen

Die Carbonatisierung der Zementsteine führte zu einer wesentlichen Veränderung des Phasenbestands. In Referenzproben wurden mittels Röntgenbeugung die üblichen Hydratphasen des Portlandzementes Portlandit und Ettringit festgestellt (siehe Abb. 10). Als Hauptbestandteil lagen röntgenamorphe Verbindungen vor, die wohl hauptsächlich den C-S-H-Phasen zuzuordnen sind. Weiterhin wurden Calcit und die unhydratisierten Klinkermineralien Alit, Belit ($\beta$-$C_2S$), Brownmillerit ($C_4AF$) und geringe Mengen an $C_3A$ gefunden. Nach der $scCO_2$-Behandlung veränderte sich die Mineralphasenzusammensetzung des Zementsteins deutlich. Der Gehalt an C-S-H-Phasen (röntgenamorpher Anteil) nahm ab, die Hydratphase Ettringit wurde nicht identifiziert. Die Gehalte an unreagierten Calciumsilikaten $\beta$-$C_2S$ und $C_3S$ nahmen ebenfalls deutlich ab. Die geringen Mengen an Portlandit sind auf die – direkt nach dem Carbonatisierungsprozess erfolgte – Hydratation des nicht carbonatisierten Alites bzw. Belites zurückzuführen. Das Calciumcarbonat, zusammengesetzt aus den drei Modifikationen Calcit, Aragonit und Vaterit, war die dominierende Verbindung. Die Alkalität und der $C_3A$-Gehalt der Zemente zeigten keinen deutlichen Einfluss auf die mengenmäßige Verteilung der Carbonatmodifikationen. Die Gehalte an Carbonatphasen waren in allen in $scCO_2$ behandelten Proben wie folgt verteilt: Calcit > Vaterit > Aragonit. In den carbonatisierten Proben wurden mittels XRD keine Al- und sulfathaltigen Proben identifiziert.

In früheren eigenen Arbeiten [16] wurden die Veränderung der C-S-H-Phasen und der Al-haltigen Phasen mittels Festkörper-NMR-Untersuchungen an in $scCO^2$ behandelten Zementsteinproben durchgeführt. Die Untersuchungen mittels $^{29}Si$ NMR-Spektroskopie haben gezeigt, dass während der Carbonatisierung die den unhydratisierten Silikaten und C-S-H-Phasen zugehörigen Spezies $Q^0$, $Q^1$ und $Q^2$ deutlich abnehmen und zusätzlich die Spezies $Q^3$ und $Q^4$ entstehen, was auf einen sehr hohen Polymerisationsgrad hinweist. Die $^{27}Al$-NMR-Untersuchungen haben gezeigt, dass bei uncarbonatisierten Zementsteinproben verbrückende $Q^2$-Aluminiumtetraeder in den C-S-H-Phasen ($Q^2(2Si)$) und ein großer Anteil von Aluminium im Ettringit vorliegen. Während der überkritischen Carbonatisierung wird Ettringit zerstört und das Aluminium in die entstehende Silikagel-Struktur eingebaut ($Q^4(4Si)$).

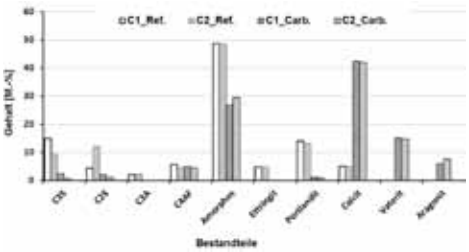



Abbildung 10:
Veränderung der mineralogischen Zusammensetzung von Zementsteinproben mit den Zementen C1 und C2 nach 4 h Carbonatisierung bei 50 °C und 150 bar Druck

Mittels Rasterelektronenmikroskopie waren im Gefüge des hydratisierten Zementsteins die unreagierten Klinkermineralien $C_3S$, $C_2S$ und $C_4AF$ sowie die Hydratphasen C-S-H und Portlandit zu beobachten (nicht im Bild). Die $scCO_2$-Carbonatisierung führte zu einer deutlichen Veränderung des Zementsteingefüges, wobei eine dichtere, hauptsächlich aus unregelmäßig geformten, kompakten Partikeln bestehende Struktur entstanden ist (Abb. 11). In den Rückstreubildern des Anschliffes der carbonatisierten Probe sind in der feinkörnigen, hauptsächlich carbonatischen Bindemittelmatrix hellere $C_4AF$-Partikel und dunklere Si-reiche Bereiche ($SiO_2 \cdot xH_2O$) identifizierbar. Die Calciumsilikate reagierten während der Car-

bonatisierung in großem Maße mit saurer Porenlösung unter der Bildung von bis zu ca. 30 µm großen Silikagelpartikeln. Diese sind anstelle der ursprünglichen Alit- oder Belit-Partikel zu finden. Das C/S-Verhältnis dieser Partikel, berechnet aus EDX-Analysen, war sehr niedrig und lag im Bereich zwischen 0,2 und 0,8. Unreagierte Calciumsilikate $C_3S$ und $C_2S$ sind nur vereinzelt festzustellen (nicht im Bild).

Bruchstück

Anschliff

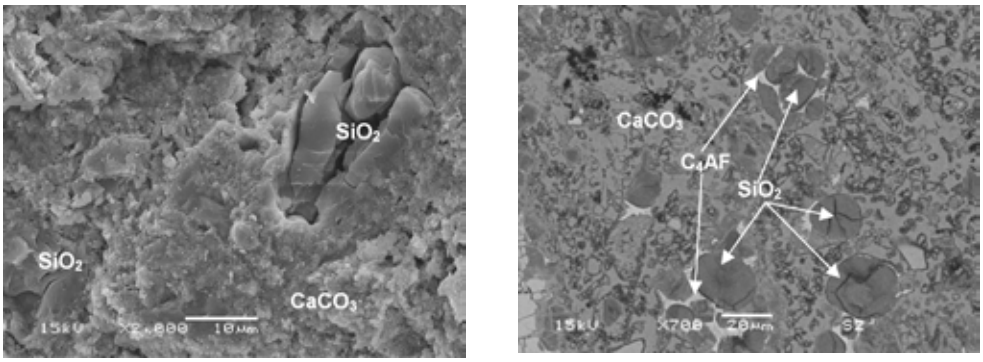



Abbildung 11: Rasterelektronenmikrokopische Aufnahmen des Zementsteins nach 4 h $scCO_2$-Behandlung. Sekundärelektronen- (links) und Rückstreuelektronenbild (rechts), Zementstein mit Zement C1

## 4. Zusammenfassung

Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass die gezielte Carbonatisierung bei erhöhten $CO_2$ Partialdrucken zu einer deutlichen Veränderung der Zementsteingefüge führt. Die Zersetzung von Hydratphasen und z.T. auch nicht hydratisierten Klinkermineralien unter Bildung von $CaCO_3$-Phasen, hauptsächlich Calcit, führt zu einem dichteren Gefüge und zu einer deutlichen Erhöhung der Druckfestigkeiten. Die Druckfestigkeiten nahmen mit zunehmendem $CO_2$-Behandlungsdruck und -dauer zu. Durch die Verwendung einer calcitischen Gesteinskörnung können auch die Biegezugfestigkeiten gesteigert werden. Während der Lagerung von carbonatisierten Proben in Wasser oder an der Luft bei 20 °C und 65 % r.F. nahmen die Druck- und Biegezugfestigkeiten aufgrund der Hydratation der Restklinkermineralien weiter zu. Die im $scCO_2$ behandelten und anschließend bei 20 °C und 65 % r.F. gelagerten Proben erreichten im Alter von 28 d eine fast doppelt so hohe Druckfestigkeit wie die 28 d-Normfestigkeit.

Die Porosität und die Feuchte vor der Carbonatisierung spielen eine entscheidende Rolle für die Carbonatisierungsgeschwindigkeit von Zementstein- bzw. Mörtelproben. Die Verwendung von Zementen einer höheren Festigkeitsklasse, bei hier gewählter Vorbehandlung, hatte aufgrund der geringeren Porosität vor der Behandlung einen negativen Einfluss auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit und damit auf die Festigkeitserhöhung. Auch die höhere Alkalität des Zementsteines führt zu einer langsameren Carbonatisierung. Die höchste Carbonatisierungstiefe und den höchsten Festigkeitszuwachs zeigten die Proben mit $C_3A$- und alkaliarmem Zement.

Die $CO_2$-Behandlung könnte eine Anwendung bei der Herstellung von z.B. zementgebundenen, porösen Leichtbauteilen (Leichtbauplatten, Holzbeton etc.) finden. Solche Baustoffe würden ein hohes Rohdichte-Festigkeits-Verhältnis aufweisen, kein Carbonatisierungsschwinden zeigen und resistent sein gegen Sulfatangriff und andere chemische Angriffe im basischen Bereich. Für die Bewehrung solcher Platten könnten kostengünstige, nichtalkaliresistente Glasfasern eingesetzt werden.

In Anbetracht der laufenden Diskussionen und Überlegungen zum Klimaschutz bietet die Carbonatisierung auch die Möglichkeit, einen Teil des während der Baustoffproduktion freigesetzten klimaschädlichen Gases langfristig einzubinden.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes.

## Literatur

[1] Chang, C. F.; Chen, J. W.: Strength and Elastic Modulus of Carbonated Concrete. ACI Materials Journal, Vol. 102, Nr. 5, 2005, pp. 315–321

[2] Shi, C.; He, F.; Wu, Y.: Effect of pre-conditioning on $CO_2$ curing of lightweight concrete blocks mixtures. Construction and Building Materials, Vol. 26, 2012, pp. 257–267

[3] Shao, Y.; Wang, S.; Bernardin, G.: $CO_2$ Uptake of Cement Exposed to As-Captured Flue Gas. Proceed. of 12th Int. Cong. on the Chem. of Cem., 8–13 Juli, Montreal, 2007

[4] Soroushian, P.; Won, J.-P.; Chowdhury, H.; Nossoni, A.: Development of accelerated processing techniques for cement-bonded wood particleboard. Cement and Concrete Composites, Vol. 25, 2007, 721–727

[5] Simatupang, M. H.; Habighorst, C.: Investigations on the Influence of the Addition of Carbon Dioxide on the Production and Properties of Rapidly Set Wood-Cement Composites, Cement and Concrete Composites, Vol. 17, 1995, pp. 187–197

[6] Achternbosch, M.; Kupsch, C.; Nieke, E.; Sardemann, G.: Sind „Green Cements“ die Zukunft? Teil 1: Novacem®. KIT Scientific Reports 7589, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011

[7] De Silva, P.; Bucea, L.; Sirivivatnanon, V.: Chemical, microstructural and strength development of calcium and magnesium carbonate binders. Cement and Concrete Research, Vol. 39, 2009, pp. 460–465

[8] Bukowski, J. M.; Berger, R. L.: Reactivity and strength development of $CO_2$ activated non-hydraulic calcium silicates. Cement and Concrete Research, Vol. 9, 1979, pp. 57–68

[9] DeCristofaro, N.; Sahu, S.: Exploring the Chemical Properties and Performance Results of sustainable Solidia Cement™ and Solidia Concrete™. Concrete, Vol. 17, 2015, pp. 82–88

[10] Atakan, V.; Sahu, S.; Quinn, S.; Hu, X.; DeCristofaro, N.: $CO_2$ matters – advances in a new class of cement, Zement Kalk Gips (ZKG), Nr. 3, 2014

[11] Cement treated with high-presure $CO_2$. US Patent Nr. 5,518,540; 1996

[12] García-González, C. A.; Hidalgo, A.; Andrade, C.; Alonso, M. C.; Fraile, J., López-Periago, A. M.; Domingo, C.: Modification of Composition and Microstructure of Portland Cement Pastes as a Result of Natural and Supercritical Carbonation Procedures; Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 45, 2006, pp. 4985–4992

[13] Hidalgo, A.; Domingo, C.; Garcia, C.; Petit, S.; Andrade, C.; Alonso, C.: Microstructural changes induced in Portland cement-based materials due to natural and supercritical carbonation. Journal of Materials Science; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, S. 3101–3111, 2008

[15] Short, N. R.; Brough A. R.; Seneviratne, A. M. G.; Purnell, P.; Page, C. L.: Preliminary investigations of the phase composition and fine pore structure of super-critically carbonated cement pastes. Journal of Materials Science, Vol. 39, 2004, pp. 5683–5687

[16] Urbonas, L.; Heinz, D.; Hilbig, H.; Reger, J.: The influence of supercritical carbon dioxide on the properties of hardened cement paste. Cement International, No. 4, 2010, pp. 73–81

[17] Purnell, P.; Short, N. R.; Page, C. L.: Super-critical carbonation of glass-fibre reinforced cement. Part 1: mechanical testing and chemical analysis. Composites: Part A: applied science and manufacturing, Vol. 32, 2001, pp. 1777–1787

[18] Hermawan, D.; Hata, T.; Umemura, K.; Kawai, S.; Nagadomi, W.; Kuroki, Y.: Rapid production of high-strength cement-bonded particleboard using gaseous or supercritical carbon dioxide. J. Wood Sci., Vol. 43, 2008, pp. 3101–3111

[19] Farahi, E.; Purnell, P.; Short, N. R.: Supercritical carbonation of calcareous composites: Influence of curing. Cement and Concrete Composites. Vol. 43, October 2013, pp. 48–53

[20] Phasendiagramm des Kohlenstoffdioxides. http://ofm.uni-duisburg.de/de/lehre/07-ss/ss2007_bioreaktor/2007-05-07-Phasendiag.pdf

[21] Urbonas, L.; Heinz, D.; Hilbig, H.; Reger, J.: Carbonatisierung durch überkritisches $CO_2$ – Weg zu neuen Werkstoffen? Beiträge zum 50. DAfStb-Forschungskolloquium am 8./9. Oktober 2009 an der TU München, S. 157 – 164

[22] Chen, J. J.; Thomas, J. J.; Jennings, H. M.: Decalcification shrinkage of cement paste. Cement and Concrete Research, Vol. 36, 2006, p. 801–806

[23] Swenson, E. G.; Sereda, P. J.: Mechanism of the carbonation shrinkage of lime and hydrated cement, J. Appl. Chem. Vol. 18, 1968, pp. 111–117

[24] Leno, V.; Urbonas, L.; Heinz, D.: Carbonatisierung von Zementstein mit $CO_2$ im überkritischen Zustand. 18. Internationale Baustofftagung, ibausil, Bauhaus Universität Weimar, 12. – 15. September 2012, S. 2-0427 – 2-0434

**In: Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2015, Future Visions, 17 - 20 August 2015, Amsterdam, NL**

## 11.2. Ultra High Strength Fibre-Reinforced Concrete for Thin-Walled Precast Elements

Sandy ILLGUTH*, Christoph GEHLEN, Dirk LOWKE

### Abstract

Concretes for thin-walled shell structures should possess both good flowability and high strength. This can be achieved by flowable Ultra High Strength Concretes (UHSC) reinforced with a high content of steel fibres. However, steel fibres can unfavourably affect the flow properties and thus the formwork filling ability of the fresh concrete. The present investigations show the effect of fibre content and aspect ratio on the rheological parameters yield stress and viscosity, formwork filling capacity and the flexural strength of UHSC. The yield stress and viscosity were measured with a rheometer. Formwork filling ability was determined using an L-box as a model for formwork with a small cross section. Depending on fibre aspect ratio, a maximum fibre content exists above which yield stress and viscosity increase sharply. This leads to a deterioration of formwork filling ability and flexural strength. It is shown how to maximize tensile strength by the addition of fibres while preserving good workability and formwork filling ability.

**Keywords:** Thin-walled elements, ultra high strength concrete, flowability, rheology, packing density, formwork filling ability, flexural strength

### 1. Introduction

The manufacture of thin-walled, load-bearing structures with concrete presents a challenge, especially in the case of structural components with one or more axes of curvature. The difficulties occur mainly in the production of cross sections below 50 mm. Such small cross sections necessitate tensile and compressive strengths which are sufficiently high to withstand the loads placed on the structure. If UHSC with compressive strengths of 120 MPa and higher is used, restrictions are not usually imposed on the design with regard to the slenderness of the structure. As opposed to conventional reinforced concrete with rebar, it is necessary to add micro steel fibres with diameters ≤ 0.2 mm to the mix in order to ensure sufficient tensile strength. Currently, the fibre content in steel fibre concretes ranges from about 1.0 to 2.5 vol.% [1], [2]. Tensile strengths of about 5 MPa are achieved with such fibre contents [3]. To prevent tensile strength remaining the limiting factor for the design of filigree structures, it is necessary to increase fibre content and thus tensional load bearing capacity. However, high fibre contents affect the flow properties of fresh concrete. Thus precise knowledge of the yield stress and viscosity of such high-fibre reinforced concretes is essential for the production of precast elements with this material, in particular, to guarantee complete filling of the formwork. It is conceivable that the fresh concrete requires high flowability (i.e. low yield stress and viscosity) to completely fill a formwork within a reasonable time. However, to prevent segregation of the steel fibres both rheological parameters should not fall below a critical value.

Many authors report an increase in yield stress and viscosity and therefore a deterioration of workability on the addition of fibres to fresh concrete [4–7]. This effect becomes more pronounced at high fibre contents and large fibre aspect ratios; ratio of fibre length to dia-

meter ($l_f/d_f$). Factors such as w/c ratio and aggregate content are also of major importance [6], [8]. Especially the combination of aggregate particles and fibres affects the packing density of the mix, which in turn affects flow properties [9]. Depending on the composition of the concrete matrix, a critical fibre content exists above which the concrete is no longer workable and fibre balls and clumps form [1], [9].
Martinie et al. [9] introduced the concept of the total relative packing fraction *rel Φ* as the sum of the relative packing densities of the fibres and sand, Equation (1).

$$Total\ relative\ packing\ fraction:\ rel\,\phi = \frac{\phi_f}{\phi_{fm}} + \frac{\phi_s}{\phi_{sm}} \qquad (1)$$

Here, $\Phi_f$ and $\Phi_{fm}$ are the actual volumetric fibre content and dense packing fraction of the fibres, respectively. Correspondingly, $\Phi_s$ and $\Phi_{sm}$ are the volume fraction and dense packing fraction of the sand, respectively. The authors showed that the relative yield stress (ratio of yield stress of the concrete with to without fibres) depends directly on the total relative packing fraction *rel Φ* (Figure 1).

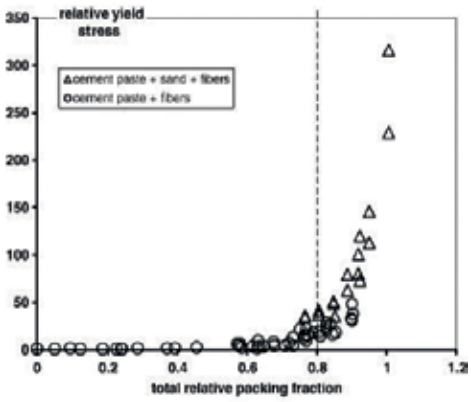



Figure 1.
Relative yield stress of fresh steel fibre mortar as a function of total relative packing fraction [9]

Thus for a given sand grading, fibre content $\Phi_f$, fibre geometry, the volume fraction of the sand $\Phi_s$ determine yield stress and workability. To obtain a yield stress of fibre concrete similar to that of the concrete without fibres and therefore good flowability, *rel Φ* should be ≤ 0.8, Figure 1. If *rel Φ* is above 0.8, the yield stress increase rapidly until, according to [9], at values close to 1.0 or above the fibres tend to form clumps and balls. The present investigations focus on the effect of fibre content and fibre aspect ratio, in combination with different compositions of UHSC, on the rheological parameters yield stress and viscosity as well as the formwork filling ability and flexural strength of the fibre concretes. The total relative packing fraction is used to determine whether a critical fibre content exists above which formwork filling ability is impaired. This enables specification of the maximum achievable flexural strength while ensuring complete filling of the formwork.

## 2. Investigations

The investigations were carried out with two very different UHSC compositions (Table 1).

Table 1.
Compositions of the UHSC without fibres

| Materials | | UHSC A | UHSC B |
|---|---|---|---|
| Portland cement | | 220 | 667 |
| Ground granulated blast-furnace slag | | 350 | – |
| Silica fume | | 100 | 135 |
| Limestone flour | kg/m³ | 485 | – |
| Quartz flour | | – | 353 |
| Quartz sand ($d_{max}$=0.5mm), $\Phi_{sm}$ = 63.9% | | 936 | 972 |
| Water | | 177 | 176 |
| PCE superplastizer | | 30 | 21 |

| Materials | | UHSC A | UHSC B |
|---|---|---|---|
| *w/b** ratio | – | 0.29 | 0.24 |
| Compressive strength (50 d) | MPa | 130 | 160 |
| Cement strength class | | 42.5 R | 42.5 N |

* b = OPC+GGBS+SF

Table 1. 2nd part
Compositions of the UHSC without fibres

Superplasticizer was added to adjust the slump flow of the fibre-free concrete to 270±5 mm using the Hägermann cone. The effect of steel fibres in both concretes was investigated using fibre 1 (Table 2) at contents of 3 to 10 vol.%. The compositions in Table 1 were volumetrically adjusted for the fibre concretes keeping the relative proportions of the mineral constituents, water and superplasticizer constant. In addition, mix UHSC B was used to investigate the effect of fibre aspect ratio by varying the fibre diameter at constant length. Table 2 lists the dimensions and aspect ratios $l_f/d_f$ of the micro steel fibres.

| Fibre | Length [mm] | Diameter [mm] | $l_f/d_f$ [-] | $\Phi_{fm}$ [%] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 6 | 0.19 | 32 | 26.9 |
| 2 | 6 | 0.14 | 43 | 16.6 |

Table 2.
Dimensions of the micro steel fibres

The packing density of the sand and the fibres was determined following de Larrard [10] by filling a hollow cylinder (inner Ø×h = 160×320 mm) with 5 kg material. At first, either sand or fibres were placed loosely in the cylinder. A cylindrical steel die fitting the cylinder and 120 mm high was used to load the material. Subsequently, the cylinder was vibrated for 60 s at a frequency of 60 Hz and the height of the fibres or sand in the cylinder measured. This procedure was repeated until the volume of the material no longer decreased and therefore maximum compaction was reached. The packing density was calculated from the mass, volume and particle density of the material and is listed in Table 1 for the sand and in Table 2 for each fibre type.

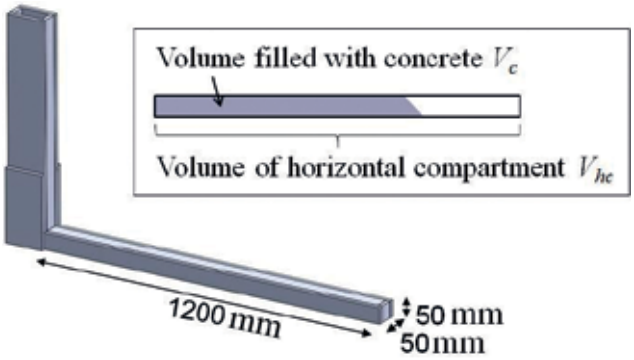
The concrete was prepared in a high shear mixer to achieve a high degree of homogenization. Firstly, the dry constituents were homogenized with the steel fibres. Then water was added with 40% of the superplasticizer and mixed at a slow tool speed. The remaining superplasticizer was added after a mixing time of 1.5 minutes. The total mixing time was 3.5 min after adding the water.

A 4C rheometer [11] was used to measure yield stress and plastic viscosity. After mixing, the fresh concrete was poured into a cone (volume 5.5 L) standing on a sandblasted glass plate. Immediately after filling (6 min after adding water) the cone was raised automatically at a rate of 0.07 m/s. The evolution of slump flow was recorded with a video camera (Figure 2). The flow curves recorded were compared with numerically simulated flow curves in order to determine yield stress and plastic viscosity [11].

The formwork filling ability of the concretes was investigated in an L-box model formwork (Figure 3) simulating the cross-sectional height of a thin-walled formwork.

Figure 2 (left).
Rheometer

Figure 3 (right).
Determination of form filling ability in L-box model formwork

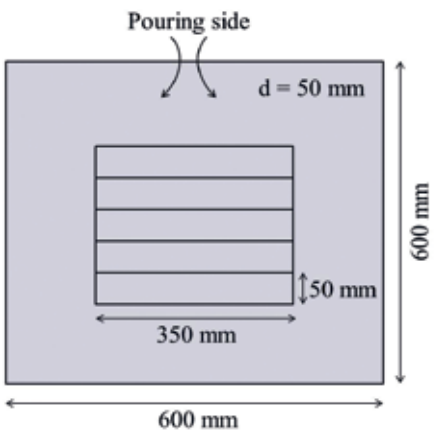



A volume of 3.6 litres of fresh concrete was poured into the vertical compartment of the formwork. Immediately after filling, the door to the horizontal compartment with transparent sides was slid open at a speed of 0.2 m/s. When the concrete ceased to flow, the fresh concrete in the horizontal compartment was recorded photographically. The degree of filling of the horizontal compartment of the L-box was defined as the ratio of the concrete volume in the compartment to the volume of the horizontal compartment (Figure 3, top right), $D_{FF} = V_c/V_{hc}$.

To measure the flexural strength, the concrete was then poured into moulds with dimensions w×h×d = 600×600×50 mm. During pouring the concrete was compacted lightly by tapping the moulds with a hammer. This procedure enabled the production of fibre reinforced concrete with high fibre contents which were free of air voids. The moulds were covered with a damp hessian cloth, the concrete plates demoulded after 24 hours and stored in a climatic chamber at 20 °C and 65 % RH. Five bars with dimensions of 350×50×50 mm were sawn out of the centre of each plate to test the flexural strength at an age of 50 days, Figure 4. This excluded strength changes due to the alignment of steel fibres at the mould walls. The bars were mounted in the testing machine with one sawn side on the support and the opposite sawn side placed under load in four-point bending geometry, Figure 5. The load was applied at a controlled deflection rate of 0.1 mm/min until a deflection of 3.5 mm was reached.

Figure 4 (left).
Cutting regime of the bars for flexural strength measurements

Figure 5 (right).
Four-point bending test



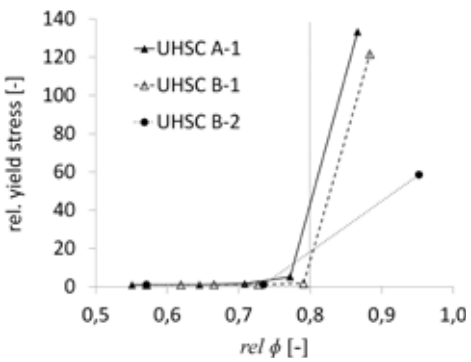
The flexural strength was calculated from the maximum possible load and the geometry of the test setup, $\sigma_t = M/W$.

## 3. Results and Discussion

The initial slump flow of the concretes without fibres was adjusted to 270 ± 5 mm using the Hägermann cone. In both cases a slump flow of 800 ± 10 mm was recorded in the test with the 5.5 L cone. A yield stress of 10 Pa was therefore determined for both concretes with the 4C rheometer. In contrast, the viscosity of the concretes differed markedly owing to their different compositions, Table 1. While the viscosity of UHSC A was at 35 Pa·s somewhat low, the viscosity of UHSC B was 122 Pa·s. The yield stress and the viscosity of both concretes with fibre 1 remained almost constant for fibre contents up to 5 vol.%. Higher fibre contents resulted in an increase in yield stress and viscosity. The yield stress of UHSC A-1 (i.e. UHSC A with fibre 1) increased from 10 to 1333 Pa for the maximum tested fibre content of 10 vol.% while the viscosity increased from 35 to 474 Pa·s. In the case of UHSC B-1, a yield stress of 1216 Pa was measured for a fibre content of 10 vol.% which was, like UHSC A-1, more than 100 times the value delivered by the mix without fibres. The viscosity of mix UHSC B-1 reinforced with 10 vol.% fibres was 4566 Pa·s.

In Figure 6 and Figure 7, the relative yield stress and relative viscosity (i.e. the ratio of the yield stress or viscosity of the concrete with fibres to that without fibres) of the concretes are plotted as a function of the total relative packing fraction *rel Φ* calculated using Equation 1. In the present case, an increase in *rel Φ* means an increase in fibre content. The dense packing fraction of the sand $\Phi_{sm}$ was determined to be 63.9%. Correspondingly, *rel Φ* was 0.55 and 0.57 for UHSC A and UHSC B without fibres, respectively. The dense packing fraction $\Phi_{fm}$ of fibre 1 was 26.9%.

It is apparent in Figures 6 and 7 that both the yield stress and the viscosity do not appreciably change for values of *rel Φ* up to approximately 0.7 (i.e. 5 vol.%), after which both values increase significantly. The increase in yield stress occurs at *rel Φ* values near 0.77 and 0.79 for UHSC A-1 and UHSC B-1, respectively, which both correspond to a fibre content of 7 vol.%. The relative viscosity of UHSC A-1 and UHSC B-1 begin to increase at *rel Φ* values of 0.71 (5 vol.%) and 0.79 (7 vol.%), respectively.



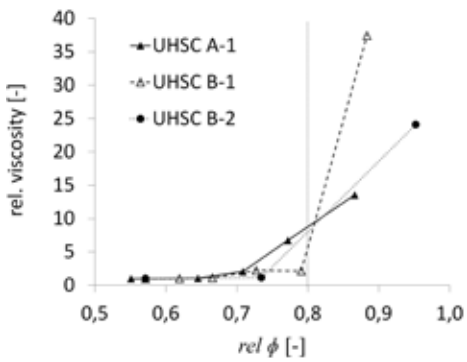




Figure 6 (left).
Relative yield stress in dependence of *rel Φ*

Figure 7 (right).
Relative viscosity in dependence of *rel Φ*

The dependence of yield stress on *rel Φ* is in good agreement with the packing density model (i.e. Equation 1) of Martinie et al. [9] who observed an increase in yield stress at *rel Φ* > 0.8 for their ultra high strength fibre concretes.

The data in Figure 7 shows that the model also describes the effect of *rel Φ* on viscosity. The rapid increase in viscosity for *rel Φ* above 0.8 results in a large deterioration of workability. Data are also included in Figures 6 and 7 for UHSC B in combination with fibre 2. The

dense packing fraction $\Phi_{fm}$ of fibre 2 was 16.6 % which is much lower than that of fibre 1. Thus the flow behaviour of concrete with fibre 2 was significantly poorer. Yield stress and viscosity increased with the addition of just 3 vol.% (i.e. *rel* $\Phi$ = 0.73) of the finer fibre 2. Concrete UHSC B-2 reinforced with 7 vol.% fibres possessed a yield stress of 585 Pa and a viscosity of 2939 Pa·s. The relative packing density model is able to describe the negative effect of the finer fibre 2 on the rheological properties well. The critical fibre content at *rel* $\Phi$ = 0.8 was only 4.2 vol.% which is only about half the maximum possible fibre content for fibre 1.

As described above, the formwork filling ability of the horizontal compartment of the L-box model formwork is defined by the ratio of the concrete volume in the horizontal compartment to the entire volume of the compartment, $D_{FF} = V_c/V_{hc}$. Complete filling of the compartment means that the concrete flowed to the end of the compartment (1200 mm) and levelled off, i.e. $D_{FF}$ is in this case 1.0. Values of $D_{FF}$ below 1.0 mean that the horizontal compartment could not be completely filled by the concrete.

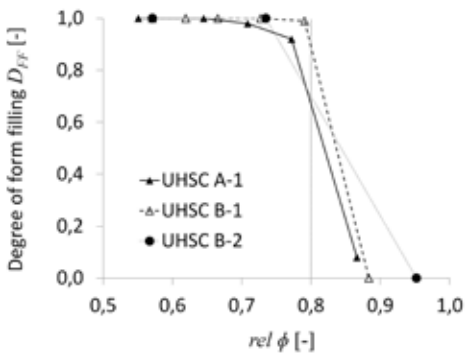



Figure 8.
Dependence of formwork filling degree $D_{ff}$ on *rel Ø*

Figure 8 compares the degree of formwork filling $D_{FF}$ measured using the L-box model formwork with the appropriate *rel* $\Phi$ for the different concrete mixes.

UHSC A-1 and UHSC B-1 completely filled the horizontal compartment for fibre 1 contents up to 3 vol.% (*rel* $\Phi$ = 0.65) and 5 vol.% (*rel* $\Phi$ = 0.73), respectively. Concrete UHSC B-2 produced with fibre 2 contents up to 3 vol.% (*rel* $\Phi$ = 0.73) also completely filled the compartment. For values of *rel* $\Phi$ between 0.7 and 0.8, $D_{FF}$ drops to a minimum of 0.7. This is due to insufficient self-levelling after the concrete reached the end of the compartment. Only a slight adjustment of the concrete composition (e.g. superplasticizer dosage) would have been necessary to improve the flow properties and therefore fill the entire compartment. For *rel* $\Phi$ > 0.8 the concrete did not reach the end of the compartment and $D_{FF}$ for concrete made with fibre 1 sank to 0 at a fibre content of 10 vol.%. In the case of UHSC B-2, concretes with just 7 vol.% blocked at the door between the vertical and horizontal compartments.

The relative packing density model can therefore be applied to specify the maximum fibre content with regard to formwork filling ability. A limiting value of *rel* $\Phi$ to 0.8 also appears to be reasonable.

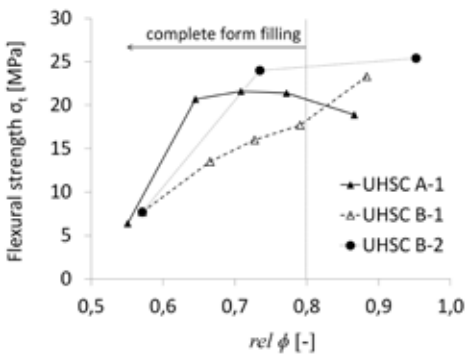



Figure 9.
Flexural strength in dependence of *rel Ø*

The effect of fibre content on flexural strength of the concretes was also investigated. In Figure 9 the results are compared with the corresponding *rel* $\Phi$.

The flexural strengths of the fibre-free concretes UHSC A and UHSC B were 6.4 and 7.7 MPa, respectively. Equivalent tensile strengths of 2.1 and 2.6 MPa were calculated. The addition of 3 vol.% of fibre 1 to UHSC A (*rel* $\Phi$ = 0.65) raised the flexural

strength to 20.7 MPa. Increasing the fibre content more did not result in higher flexural strengths, until, as can be seen in Figure 9, at a fibre content of 10 vol.% (*rel Φ* = 0.87) loss of strength occurred. This loss of strength is attributed to fibre clumping and the associated deterioration of workability. In contrast, the flexural strength of the UHSC B-1 increased continuously with fibre content reaching 23.3 MPa for 10 vol.% fibres. As opposed to UHSC A, fibre clumping was not observed at this high fibre content. Concrete UHSC B made with the finer fibre 2 exhibited the highest flexural strength, namely 25.4 MPa (i.e. tensile strength of 9.1 MPa) at a fibre content of 7 vol.% (*rel Φ* = 0.95).

Complete and void-free filling of the formwork is necessary to obtain such high strengths in structural elements. Values of $D_{FF}$ near 1.0 are only possible if *rel Φ* is at most 0.8. Consequently, flexural strengths measured above *rel Φ* of 0.8 have no relevance to formwork filling ability.

The present results show that an increase in fibre content alone does not necessarily lead to higher flexural and tensile strengths. Concrete UHSC A-1 achieved a flexural strength of 20.7 MPa with just 3 vol.% fibres whereas approximately 8.6 vol.% fibres would be required by UHSC B-1 to achieve the same strength.

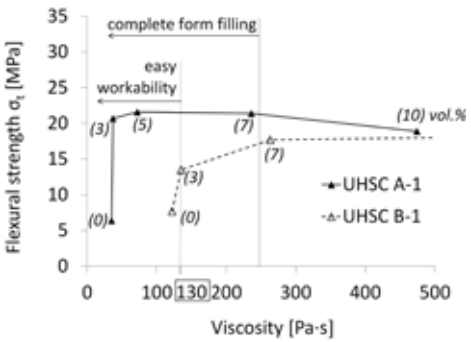



Figure 10.
Flexural strength in dependence of viscosity for concretes UHSC A-1 and UHSC B-1 (italic number in brackets is the fibre content in vol.%)

It is also important that fresh concrete has good workability and fills the formwork within a short period of time. This means that the viscosity should not exceed a certain value. Based on the present results, a maximum viscosity of 130 Pa·s was estimated. Concretes with higher viscosities were very difficult to process. Figure 10 compares flexural strength with viscosity for the two concretes UHSC A-1 and UHSC B-1.

It is obvious in Figure 10 that a high flexural strength (maximum 21.6 MPa) can be achieved by UHSC A-1 through fibre addition before the limiting viscosity is reached and workability deteriorates. The maximum flexural strength of UHSC B-1 achievable with good workability was, at 13.5 MPa, significantly lower.

As well as good workability and high flexural strength, potential environmental effects and expenditure for concrete manufacture should also be taken into account. Micro steel fibres and cement contribute decisively to the environmental impact of UHSC and its production costs [12]. In view of this, only UHSC A-1 provides good workability and high flexural strength with the advantages of a much lower cement content and a large reduction in the amount of fibres compared with UHSC B-1.

The slightly higher strength of fibre concretes UHSC B-2 (Figure 9) must be considered in the light of their higher environmental impact. As well as a higher cement content compared with UHSC A-1, more intensive wet drawing is necessary to reduce the wire diameter for the thinner fibres. The thinner fibres cost approximately 20 % more.

## 4. Summary

Results are presented for the effect of the micro steel fibre content and aspect ratio on the rheological properties yield stress and viscosity as well as the formwork filling ability and flexural strength of ultra high strength concrete. As expected, both yield stress and viscosity increase with fibre content and aspect ratio. At the same time, the formwork filling ability (in an L-box model formwork) decreases. Flexural strength increases with the fibre content of the concrete.

Changes in the rheological properties, formwork filling ability and flexural strength due to fibre addition are related to the total relative packing density *rel Φ* of the sand mixed with fibres. The maximum tensile strength is achieved at a value of *rel Φ* = 0.8 while preserving good workability and formwork filling ability.
It is possible to manufacture ultra high strength steel fibre concrete with relatively low contents of cement and micro steel fibres which nevertheless possesses a high flexural strength and good workability. Such compositions are also favourable with regard to environmental impact and cost of concrete manufacture.

## Acknowledgement

The investigations were performed in the DFG priority program 1542 Light Construction with Concrete.

## References


[1] Grünewald, S.: Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete, PhD-Thesis, TU Delft, 2004.

[2] Altun, F.; Haktanir, T.; Ari, K.: Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams, Cons. Build. Mat., Vol. 21, No. 3, 2007, pp. 654–661.

[3] Kützing, L.: Tragfähigkeitsermittlung stahlfaserverstärkter Betone, PhD-Thesis, University of Leipzig, 2000.

[4] Grünewald, S.; Walraven, J. C.: Rheological Characterisation of the Effect of Steel Fibres in Self-Compacting Concrete, 8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete, Joaquim Barros et al. eds., Guimarães, Portugal, 2012.

[5] Grünewald, S.; Walraven, J. C.: Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete, Cem. Concr. Res., Vol. 31, No. 12, 2001, pp. 1793–1798.

[6] Swamy, R. N.; Mangat, P. S.: Influence of fibre-aggregate interaction on some properties of steel fibre reinforced concrete, Mater. Struct., Vol. 7, No. 5, 1974, pp.307–314.

[7] Tattersall G. H.: Workability and Quality Control of Concrete, London Spon, 1991.

[8] Kuder, K. G.; Ozyurt, N.; Mu, E. B.; Shah, S. P.: Rheology of fiber-reinforced cementitious materials, Cem. Concr. Res., Vol. 37, No. 2, 2007, pp. 191–199.

[9] Martinie, L.; Rossi, P.; Roussel, N.: Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction, Cem. Concr. Res., Vol. 40, No. 2, 2010, pp. 226–234.

[10] de Larrard, F.: Concrete Mixture Proportioning, A scientific approach, in: Mindess, S., Bentur, A. eds., Modern Concrete Technology Series, Spon, London, 1999.

[11] Thrane, L. N.; Pade, C.; Nielsen, C. V.: Determination of Rheology of Self-Consolidating Concrete Using the 4C-Rheometer and How to Make Use of the Results, Journal of ASTM International, Vol. 7, No. 1, 2010.

[12] Stengel, T.; Schießl, P.: Sustainable with UHSC – from Life Cycle Inventory Data Collection to Environmental Impact Assessment, Proceedings 2nd Int. Symposium on UHSC, Kassel, 2008, pp. 461–468.

**In: Proceedings of ICCRRR - International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting Leipzig, 05 - 07 October 2015, IV – Dehn et al. (Eds) © 2016 Taylor & Francis Group, London**

## 11.3. Reinforcement corrosion behavior in bending cracks after short-time chloride exposure

F. Hiemer, S. Keßler, C. Gehlen

### ABSTRACT

Even if properly designed, crack formation in reinforced concrete structures is inevitable. Cracks in the concrete cover considerably reduce the barrier property against corrosion-initiating substances. Aggressive agents (e.g. chlorides) depassivate the reinforcement locally in the cracked area, which can lead to macro-cell corrosion. To protect direct driven concrete surfaces against chloride ingress such as in multi-storey car parks, German Standards recommend the application of surface coatings. In the course of a research project, the reinforcements' corrosion behavior in cracked concrete and the influence of an applied surface protection system on the corrosion process is investigated. Therefore, basic electrochemical parameters of corrosion and its boundary conditions are recorded. The paper presents results of the short-time chloride exposure as well as first findings concerning the influence of an applied sealing on corrosion activity. Chloride contamination led to active corrosion whereas the coating not always decreased macro-cell corrosion.

### 1. Motivation

When it comes to the durability of reinforced concrete structures, the corrosion of reinforcement constitutes one of the main issues concerning their deterioration. Besides many factors, chloride contamination stands out as one of the most important causes for reinforcement corrosion, especially in traffic structures such as bridges or car parks, which are highly exposed to de-icing salts.

Since the design principle of reinforced concrete structures is based on crack formation for activating the reinforcements' tensile capacity, cracking is an inherent characteristic of these structures. Although cracking impairs the local transport properties of the concrete cover (Šavija & Schlangen 2010), it is not yet completely understood whether cracks accelerate only the corrosion initiation process or the overall corrosion process (Yu et al. 2014) Cracks allow a locally limited but rapid ingress of aggressive agents to the steel surface. In the case of a chloride attack this can lead to an accumulation of chlorides in the crack area. When exceeding a critical chloride content, the protecting passive layer on the steel is destroyed and therefore the reinforcement is locally depassivated. This discrete depassivation promotes the formation of macro-cell corrosion. Figure 1 schematically shows a chloride induced macro-cell corrosion in which the anodic and cathodic sub-processes are spatially separated.

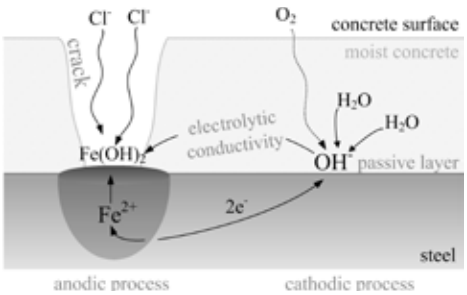



Figure 1.
Schematic illustration of corrosion mechanisms in cracked reinforced concrete

The drop of electrochemical potential on the depassivated steel surface (anode) results in a potential difference to surrounding cathodic areas. Free electrons e- pass through the steel to the cathode where they react with water $H_2O$ and oxygen $O_2$ to form hydroxide ions $OH^-$. The electrochemical cell is short-circuited by the electrolytic conductivity of the concretes' pore system. The electrochemical processes can be expressed by an equivalent circuit diagram in which the sub-processes are transferred into resistances and a driving potential $\Delta E$ resulting from the potential difference, Figure 2 and Equation 1 (Raupach 1992).

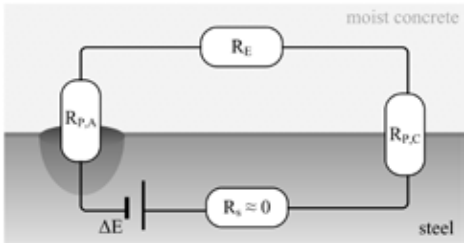



Figure 2.
Equivalent circuit diagram for corrosion of steel in concrete

$$I_{corr} = I_{macro} + I_{micro} = \frac{\Delta E}{R_{P,A} + R_{P,C} + R_e} + I_{micro} \qquad (1)$$

The quotient of the driving voltage and the sum of all system resistances describes the macro-cell corrosion current $I_{macro}$. Another important part of the total corrosion $I_{corr}$ is the microcell corrosion $I_{micro}$. In this corrosion type the cathodic reaction takes place in immediate vicinity of the macro-cell anode, therefore contributing inseparable to the corrosion process.

Anodic polarisation resistance $R_{P,A}$ and cathodic polarisation resistance $R_{P,C}$ can be described as the interference of each sub-process, e.g. due to the charge transfer resistance in the phase boundary steel/electrolyte or an obstruction of materials supply to the respective electrode.

The electrolytic resistivity of concrete $R_E$ is a major factor influencing active corrosion (Hunkeler 1995, Warkus & Raupach 2008). It is depending on a variety of factors originating from concrete parameters as wells as environmental influences. Besides the temperature, pore structure and the ionic composition of the pore water, the resistance is very dependent on the moisture content of the concrete (Catharin & Federspiel 1972, Schulte et al. 1978). On the one hand the desiccation of concrete diminishes the charge transport in the pore system which increases the specific electrolytic resistance of the hardened concrete. Furthermore, the size of the cathodic contributing steel surfaces is significantly reduced when the concrete is drying out (Noeggerath 1990, Warkus 2012).

These interrelations are used to protect reinforced concrete structures which are directly driven upon. The German national annex to Eurocode 2 (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) demands the application of a crack-bridging coating or alternative concepts to avert an ongoing ingress of corrosion promoting agents.

On the one hand, the accumulation of depassivating substances such as chlorides is reduced, minimizing the risk of reinforcement depassivation. At the same time, the water intake through the concrete surface is hindered, leading to a reduction and homogenisation of the moisture content in the concrete component. Hence, the electrolytic conductivity decreases, reducing the overall corrosion rate, see Equation 1.

The planning principles for the coating of concrete structures, such as multi-storey or underground car parks, are provided in a German bulletin (DBV 2010). Therein it is recommended to coat the concrete surface after crack formation is finished, even if a short-time chloride exposure cannot be ruled out. A potentially initiated corrosion process is not expected to endanger the load bearing capacity of the structure. However, the corrosion behavior of reinforcement steel in cracked concrete is not yet clarified, nor has there been a scientifically investigation of its development after the cracked concrete surface is sealed. In addition, especially in the vicinity of a crack, the influencing factors of reinforcement corrosion, e.g. the moisture content as well as the chloride concentration, are subject to wide fluctuations. Thus, a research project was initiated, in which reinforced concrete specimens are used to investigate the corrosion process in cracked concrete after a short-time chloride exposure. Subsequently the effect of an applied surface protection system on the corrosion situation can be determined.

In the following chapter the experimental program is presented, whereas in chapter 3 a first insight into the results of the exposure as well as on the influence of an applied coating is given.

## 2. Experimental

### 2.1. Specimens

Specimens had to be designed allowing the initiation of a defined bending crack orthogonal to a steel bar representing the depassivated anode. Besides other boundary conditions, the positioning of reinforcement elements had to ensure the electrical isolation of anodic and cathodic sub-processes in order to create a measurable macro-cell corrosion current. 19 concrete prisms with dimensions of 150 × 150 × 700 mm³ were produced.

Figure 3 shows the geometry and reinforcement setup of the produced macro element specimen. The crack crossing “anode bar” is made of a reinforcement steel bar (Ø = 10 mm) and a total length of 250 mm. To define the size of the anodic area, the exposed steel surface was limited to 50 mm in the vicinity of the crack.

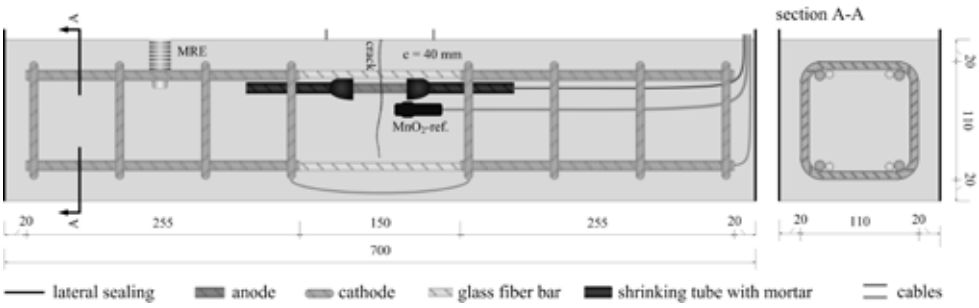



Figure 3.
Geometry and reinforcement setup of the specimens, all dimensions in [mm]

The steel bar sealing was made of a shrinking tube in order to reduce oxygen diffusion to non-depassivated steel surfaces outside of the crack area. Hence, cathodic reactions on the anode bar can be reduced to a minimum. To prevent crevice corrosion, the transition area between the shrinking tube and the steel bar is filled with a highly alkaline mortar. According to the general rules and rules for buildings (DIN EN 1992-1-1 2011) and the corresponding exposure situation of cyclic wetting and drying in combination with chloride attack (XD3), the anode bar was fixed in the formwork with a cover depth of 40 mm.

To provide sufficient cathodic area for the corrosions process, two reinforcement cages, each consisting of four stirrups (Ø = 8 mm) and four main bars (Ø = 10 mm), were installed. The “cathode cages” were positioned outside the crack area to exclude their depassivation during the chloride exposure. In order to ensure a sufficient tensile capacity of the specimens during crack initiation, corrosion resistant glass fiber bars were integrated. Additionally, this improved the control of the crack initiation.

As anode bar and cathode cages are electrically isolated, all electrochemical measurements can be conducted on each half cell separately. For half-cell potential measurements a reference electrode ($MnO_2$, $E_{ref}$ ≈180 $mV_{SCE}$) was fixed close to the anode area. Hence a nearly IR-drop free potential measurement of the anode is possible. Additionally, a multi ring electrode (MRE) was installed on the concrete surface to determine the changes of concrete moisture due to the exposure cycles and the later coating.

In order to reproduce a realistic structural situation, the concrete composition was designed in accordance with DIN 1045-2 (2008) and the requirements resulting for a concrete component in a corresponding exposure class (XD3). A Portland cement (CEM I 32.5 R) with a content of 320 kg/m³ was used for 19 specimens. Sand and gravel with a maximum aggregate size of 16 mm was chosen. The w/c ratio was set to 0.45 and plasticizer was used to adjust a plastic consistency of the fresh concrete. The mean value of the cube strength at an age of 28 days was about 45 N/mm².

For curing, the specimens were stored for 7 days under moist jute cloths at a temperature of 20 ± 2°C. Afterwards they were stored in a climate of 20°C / 85% RH until the age of 28 days after which the cracks were produced by three-point-bending. The crack width was adjusted to 0.3 mm which results from the permitted crack width for certain exposure conditions given in DIN EN 1992-1-1 (2011). The crack width was fixed with metal foils of 0.3 mm thickness which were inserted into the crack before the load was reduced again, Figure 4. Hence, the crack width on the concrete surface could be set precisely to 0.3 mm.

To simulate a slab structure and its one-dimensional exposition of the concrete surface, the lateral areas had to be sealed with a non-diffusive and waterproof aluminium-butyl rubber band after the crack was initiated.

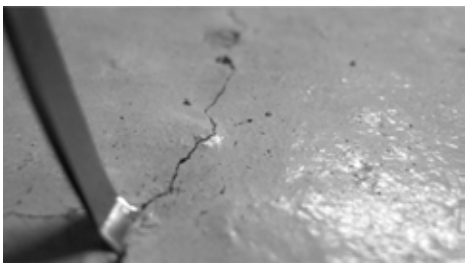


Figure 4.
Metal foil keeping the crack open

## 2.2. Exposure

During the exposure only the anodes should be charged with chloride solution. Therefore, the area loaded with chloride solution was limited to the central 10 cm of the specimen. To ensure an evenly and therefore practical watering of the concrete, the outer areas were loaded only with tap water, whereas a 1.5 m.-% sodium chloride solution was used in the crack area. Figure 5 shows the finally prepared specimens.

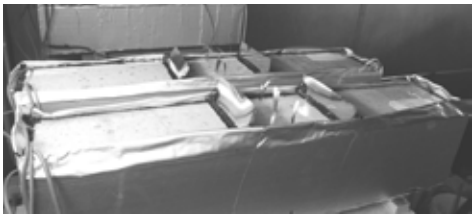


Figure 5.
Specimens exposure

Beginning with the first exposure all specimens are stored in a climate of 20°C/85% RH. The concrete surface was completely wetted with chloride solution and the tap water once a week for the duration of 12 weeks. By this period of exposure, the intensity of a chloride attack by de-icing salts in the course of one winter period was simulated.

Afterwards the surface of the specimens is sealed with a two component polyurethane coating. This sealing meets the requirements of a surface protection system with high crack-bridging abilities for surfaces which are directly driven upon (OS 11 according to DAfStb 2001). After the application of the coating the specimens stay stored in its climate.

### 2.3. Electrical measuring setup

Once the lateral surfaces were sealed with butyl-rubber band the electrochemical parameters were recorded periodically. Before the chloride exposure, first measurements were carried out in order to obtain values about the initial state of the specimens. The electrochemical parameters are recorded throughout the chloride exposure as well as after the coating of the specimens. Hence, the complete development of the corrosion process can be traced.

The macro-cell corrosion current Imacro is logged regularly every 3 hours. Cathode cages and the anode bar are short circuited through a low-resistance, high resolution ampere meter with automatic data recording. The macro corrosion current allows a time dependent assessment of the mass transfer resulting from corrosion activity.

In a weekly rhythm the short circuit is suspended leading to a depolarization of the electrodes. Subsequently the free corrosion potentials of anode and cathode can be determined. The driving voltage $\Delta E$ of the corrosion cell is derived from the difference of these potentials, giving another relevant parameter to assess the reinforcements' corrosion state. Thus, differences in corrosion activity before and after the coating application can be determined.

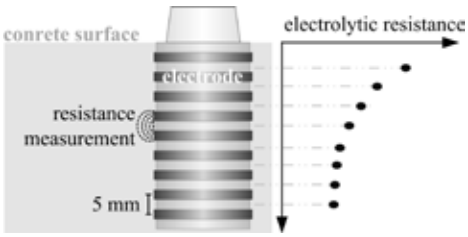



Figure 6.
Scheme of a multi ring electrode

Additionally, multi ring electrodes, as shown in Figure 6, were installed in some of the specimens.

Starting from the exposed concrete surface a depth dependent resistivity profile is determined regularly. The continuous detection allows a qualitative evaluation of the moisture development in the surface area throughout the exposure as well as after applying the coating. Hence, the interrelation between changes in moisture distribution, and therefore in electrolytic resistance, and an eventual variation of the corrosion process can be detected.

## 3. First results

In the following first results of the short-time chloride exposure are presented. Furthermore an insight on the influence of an applied coating is given.

### 3.1. Corrosion behavior during short-time chloride exposure

Amongst all 19 corrosion specimens eleven showed active corrosion during the twelve weeks of cyclic wetting with a 1.5 m.-% sodium chloride solution.
To evaluate the corrosion state of the crack crossing anode in those specimens, the data of the corrosion current $I_{macro}$ as well as the free corrosion potentials of their anodes are regarded. Figure 7 contains these parameters from three characteristic specimens (PC-5, PC-12 and PC-20) representing the different situations which occurred in the case of active corrosion.

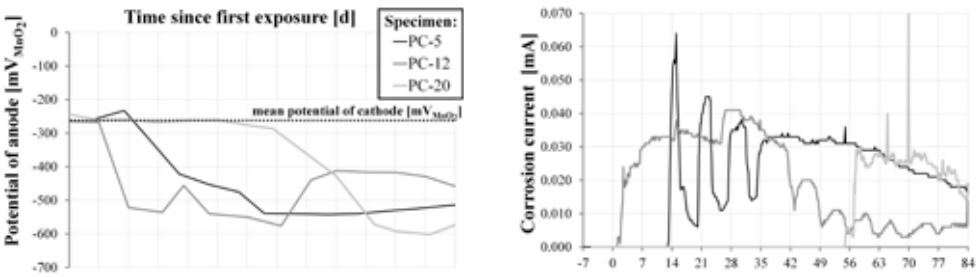



Figure 7.
Macro-cell corrosion current (top) and corresponding free corrosion potentials of the anodes (bottom) of three exemplary specimens during the short-time chloride exposure

After crack initiation and before the beginning of exposure all anodic potentials were in the same magnitude at around -260 to -280 $mV_{MnO2}$, which indicates the passivity of the steel surface. The mean potentials of the cathodic cages, portrayed as a dotted line in the bottom diagram, range in the same order of potential and thus ensure the assumption of passivity. All cathodes showed a quite steady potential in the course of the exposure, mostly ranging at around -260 $mV_{MnO2}$.

The first situation of corrosion behavior is reflected via specimen PC-12. Only a few days after the first moistening a significant decrease of the anodic potential ($\Delta U \approx 250$ mV) indicates an immediate depassivation. This potential drop was accompanied with an instant increase of the macro-cell corrosion current. With the continuing chloride loading the potential kept dropping to a minimum of -580 $mV_{MnO2}$ after around 42 days, creating a driving voltage $\Delta E$ between anode and cathode of about 320 mV. The corrosion current reached its maximum of 0.042 mA after 28 days when it started to decline during the ongoing cyclic loading. The descent in corrosion current is accompanied with a positive development of the anodic potential, lowering the overall driving voltage $\Delta E$ of the corrosion cell.

The second kind of corrosion behavior is represented by specimens PC-5 and PC-20. For the first-mentioned after two weeks the continuous loading with chloride solution resulted in a steadily diminishing anodic potential. Surpassing a certain potential difference $\Delta E$ between anode and cathode, a macro corrosion current was initiated which nearly came to a complete halt between every moistening. Only after five weeks of loading the corrosion current was settling on a constant level which slightly decreased until the end of exposure, whereas the anodic potential stayed constantly low at values around -520 $mV_{MnO2}$ causing a driving voltage $\Delta E$ of around 260 mV.

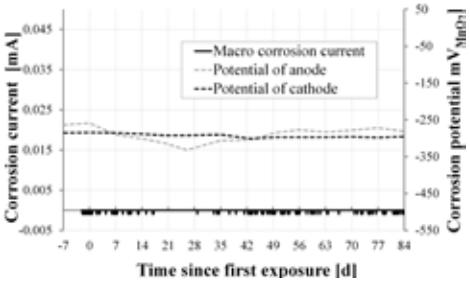



Figure 8. Macro-cell corrosion current and free corrosion potential of specimen PC-6

Likewise, specimen PC-20 showed a delayed reaction. A decrease in potential occurred after 42 days, leading to active corrosion in form of a measurable corrosion current after two more weeks. Both, potential of the anode as well as the macro-cell corrosion current receded only a little until the end of exposure after twelve weeks.

On eight of the 19 specimens no corrosion activity could be determined, as Figure 8 exemplarily shows on specimen PC-6.

With the first chloride exposure, the anode potential tends to decrease, but the steel surface could not be depassivated. The electrodes are not polarized and no corrosion current is measured.

### 3.2. Short-time influence of a concrete surface coating on chloride induced corrosion

Of the eleven specimens that showed active corrosion during the exposure, seven corrosion processes halted before the concrete surface coating could be applied. Either this standstill occurred already during the time of exposure or the corrosion process stopped rather quickly after the exposure was ended. In this time the specimens remained in their usual climate at of 20°C/85% RH. Of the remaining four, the electrochemical parameters obtained from three specimens (PC-3, PC-5 and PC-7) in the first twelve weeks after the coating are shown in Figure 9.

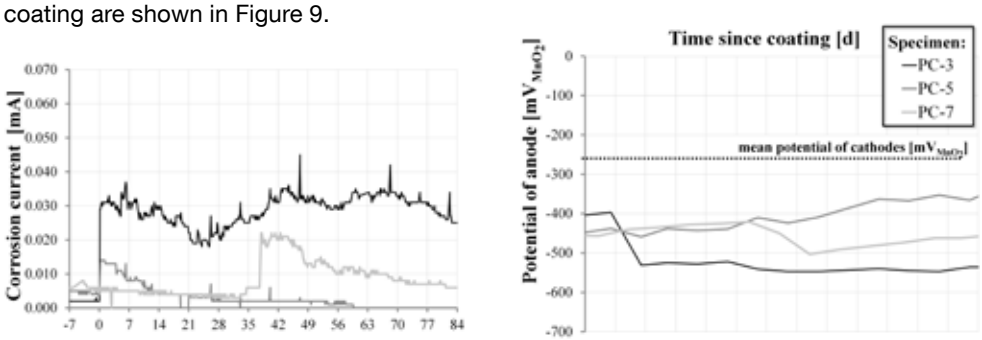



Figure 9:
Macro-cell corrosion current (top) and corresponding free corrosion potentials of the anodes (bottom) of three exemplary specimens after the application of the coating

On the one hand, the anodic potentials of all three specimens remained quite low at around -400 to -450 mV$_{MnO2}$. On the other hand the corrosion currents had already decreased to minimum currents of 0.002 to 0.006 mA.

In the beginning, the coating of specimen PC-5 resulted in a noticeable increase of corrosion current ($\Delta I \approx 0.010$ mA), but had no noteworthy influence on its anodic potential. Only when considering the whole period of 12 weeks after the coating, a constant but slow increase of the potential is detectable. After nine weeks this lead to an undetectable corrosion current, indicating a standstill of corrosion activity.

Both, specimens PC-3 and PC-7 showed a comparable behavior considering the sharp increase of the macro-cell corrosion current after the coating was applied. In specimen PC-3 the application caused an immediate reaction of the anodic potential which enlarged the driving potential by nearly 150 mV. The generated corrosion current abruptly exceeded

0.030 mA and did not decrease until the end of the investigated period. The macro-cell corrosions current of specimen PC-7 showed a delayed reaction to the application of the coating. The potential drop occurred after five weeks under sealed conditions and resulted in a current rise of about 0.020 mA. The current afterwards slowly declined but did not come to a complete halt in the period considered.

### 3.3. Moisture development during exposure and after surface coating

The depth dependent resistances of the concrete specimens were obtained with multi ring electrodes in the uncracked concrete surface. Throughout the chloride exposure, usually a distribution like shown in Figure 10 was determined.

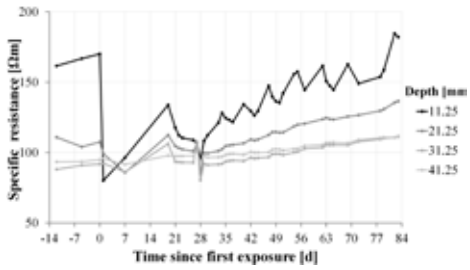



Figure 10.
Depth dependent resistance profile in the uncracked concrete surface of specimen PC-1 during chloride exposure

The area close to the surface until a depth of ca. 20 mm is heavily influenced through the weekly moistening. Since the exposure was held in a constant climate of 20°C/85% RH, a climatic variation of the resistance can be excluded. However, in deeper regions no significant influence of the resistivity and therefore the moisture balance could be found. Out of these results it can be assumed, that the concrete moisture remains sufficiently during the weekly exposure, to provide a specific resistance to enable macro-cell corrosion activity (Hornbostel 2013).

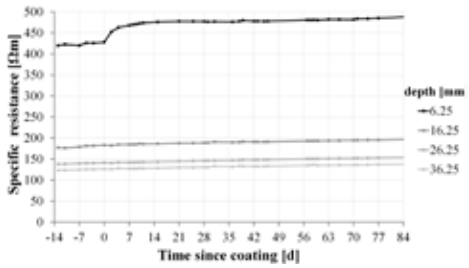



Figure 11.
Depth dependent resistance profile in the uncracked concrete surface of specimen PC-1 after coating

Figure 11 provides the resistance profile of the same multi ring electrode after the concrete surface was sealed with the coating.

The overall trend is slightly going upwards, resulting from the continuing hydration of the cement paste. Only in the top layer a significant influence of the concrete resistance due to the coating is detectable. In the deeper areas there is no indication, that the moisture balance is influenced in any way.

## 4. Discussion, Conclusion and outlook

The first results on the corrosion behavior in cracked concrete after a short-time chloride exposure show that a depassivation of the crack crossing reinforcement is very likely to occur. Even only after 12 weeks of exposure to a 1.5 m.-% sodium chloride solution the anodic potentials dropped significantly leading to potential differences $\Delta E$ between anode bar and cathode cages of approximately 250 – 300 mV. These drops were accompanied by increasing macro-cell corrosion currents, which afterwards mostly showed a degressive progress. On the one hand this could be lead back to an increasing electrolytic resistance resulting from the continuously hydrating cement paste. On the other hand during the corrosion process oxidation products are formed that can shield the area of active corrosion. This can lead to a shortage of corrosion promoting agents, reducing their overall concentration and therefore increasing the anodic polarization resistance in the corrosion system.

Although the corrosion currents tended to decrease throughout the exposure, not all corrosion processes came to a complete halt, even not in the time after the exposure was ended. Additionally, the application of a crack-bridging surface protection system on the concrete specimens had different effects on their corrosion behavior. In some actively corroding specimens the process was halted after the coating was applied. Other specimens responded with a spontaneous sharp increase of macro-cell current, which in some of those specimens decreased afterwards. In others it remained constant over the observed period of twelve weeks after the coating. This sharp rise could be due to time dependent diffusion effects, which have led to a repeated accumulation of chlorides on the steel surface. These provoked further depassivation of the reinforcement which occurred coincidently at the same time when the coating was applied.

In order to clarify these questions as well as to completely investigate the corrosion behavior in the coated specimens further measurements have to be carried out.

Furthermore the effects of microcell corrosion have to be investigated. The previously mentioned shielding of the corroding area can affect the development of microcell corrosion (Beck 2010). In addition, there is a risk, that the sealing of the crack area can conserve a micro climate in the crack, which could endanger the load bearing capacity of a structure by maintaining microcell corrosion.

Hence, beginning with the end of the exposure some of the specimens are taken for destructive investigations. Every three months anode bars from three specimens are dismounted and the corrosion products are removed from their surface. Thus, the gravimetric mass loss can be calculated. The difference between gravimetric and coulometric mass loss, which can be calculated from of the accumulated corrosion current, enables the quantification of the microcell corrosion. Because of the ongoing destructive investigations, the time dependent development of the microcell corrosion can be assessed.

Therefore further quantification, monitoring and destructive investigation of the specimens is needed to clarify the development of the macro-cell corrosion process and to determine the effects of the microcell corrosion after the coating is applied.

## 5. Acknowledgements

The authors wish to thank the German Research Foundation (DFG) for supporting this project. Furthermore we would like to sincerely thank Schöck Bauteile GmbH, Badische Stahlwerke GmbH and SCHWENK Zement KG, who provided some of the materials used in this project.

## References

[1] Beck, M. F. 2010. Zur Entwicklung der Eigenkorrosion von Stahl in Beton. Dissertation, RWTH Aachen, Germany.

[2] Catharin, P. & Federspiel, H. 1972. Der elektrische Widerstand des Betons. Elektrotechnik und Maschinenbau, Vol. 89, No. 10, pp. 399 – 407.

[3] DAfStb Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V, 2001. DAfStb Richtlinie – Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungsrichtlinie), Part 1-4. Berlin: Beuth Verlag.

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

[5] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2008. DIN 1045-2, Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 2: Concrete – Specification, properties, production and conformity – Application rules for DIN EN 206-1, Berlin: Beuth Verlag.

[6] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2011. DIN EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings; German version EN 1992-1-1:2004 + AC:2010. Berlin: Beuth Verlag.

[7] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2013. DIN EN 1992-1-1/NA, National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Berlin: Beuth Verlag.

[8] Hornbostel, K., Larsen, C. K. & Geiker M. R. 2013. Relationship between concrete resistivity and corrosion – A literature review. Cement & Concrete Composites, Vol. 39, pp. 60-72.

[9] Hunkeler, F. 1995. The resistivity of pore water solution – a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. Construction and building materials, Vol. 10, No. 5, pp.381-389, 1996.

[10] Noeggerath, J. 1990. Zur Makroelementkorrosion von Stahl in Beton: Potential- und Stromverteilung in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen. Dissertation, ETH Zürich, Swizerland.

[11] Raupach, M. 1992. Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Issue 433, Berlin: Beuth-Verlag.

[12] Šavija, B. & Schlangen, E. 2012. Chloride ingress in cracked concrete- a literature review. In C. Andrade and J. Gulikers (eds.), Advances in Modeling Concrete Service life: Proceedings of 4th International RILEM PhD Workshop held in Madrid, Spain, 19 November 2010.

[13] Schulte, C., Mader, H. & Wittmann, F.H. 1978. Elektrische Leitfähigkeit des Zementsteins bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt. Cement and Concrete Research, Vol. 8, No. 3, pp. 359–367.

[14] Warkus, J. 2012. Einfluss der Bauteilgeometrie auf die Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl in Beton bei Makroelementbildung. Dissertation, RWTH Aachen, Germany.

[15] Warkus, J. & Raupach, M. 2008. Numerical modelling of macrocells occurring during corrosion of steel in concrete. Materials and corrosion, 59, No. 2, pp. 122–130.

[16] Yu, L., François, R., Hiep Dang, V., L'Hostis, V. & Gagné, R. 2015. Development of chloride-induced corrosion in pre-cracked RC beams under sustained loading: Effect of load-induced cracks, concrete cover and exposure conditions. Cement and Concrete Research, Vol. 67, pp. 246–258.

**Beitrag zur 19. Internationalen Baustofftagung „ibausil“, 16. – 18.09.2015, Bauhaus-Universität, Weimar**

## 11.4. Einfluss aluminiumhaltiger Zusatzstoffe auf die Struktur und Festigkeit der korrodierten Schicht von Beton beim Säureangriff

Hilbig, H., Löhr, E., Gutberlet, T., Beddoe, R. E.

### 1. Einleitung

Die Lebensdauer von Betonbauteilen in Industrie und Landwirtschaft kann durch den lösenden Angriff von aggressiven Medien erheblich reduziert werden. Betonflächen in Kontakt mit Gülle, Silage, Biomasse für die Methanproduktion oder Enteisungsmittelbehältern an Flughäfen können einer Vielzahl von organischen Säuren ausgesetzt werden. Unbeschichtete Kühlturmoberflächen, die sogar einer Exposition über XA3 ausgesetzt werden, Abwasserleitungen, Strukturen für die geothermische Energiegewinnung, Betonpflaster und Industrieanlagen können durch aggressive anorganische Säuren angegriffen werden [1]. Neben hohen Kosten für die Erneuerung oder Instandsetzung ist eine Verkürzung der Lebensdauer mit Hinblick auf die Erhaltung von Ressourcen und die Reduzierung von $CO_2$-Emissionen ökologisch nachteilig.

Mit dem Ziel eines erhöhten Säurewiderstands werden zunehmend Betone mit weniger Portlandzementklinker und aluminiumhaltigen Zusatzstoffen wie Hüttensand, Steinkohlenflugasche oder Metakaolin hergestellt. Der Einfluss der Stoffe auf den Säurewiderstand ist nicht allein durch herkömmliche betontechnologische Kriterien zu verstehen, weil die Eigenschaften der korrodierten Schicht auf der Betonoberfläche – als Schutz vor der angreifenden Säure – maßgebend sind [2, 3].

Folglich ist der Einfluss aluminiumhaltiger Zusatzstoffe auf die mechanische Festigkeit der korrodierten Schicht und ihre Struktur ein wichtiger Faktor hinsichtlich des Säurewiderstands von Betonbauteilen. Um die Zusammenhänge zu verstehen, wurden Proben aus erhärteten Portlandzement/Metakaolin-Bindemittelmischungen in Salzsäure bei verschiedenen pH-Werten gelagert. Die korrodierten Proben wurden mit Kernspinresonanz ($^{29}$Si- und $^{27}$Al-NMR) untersucht, um Aussagen zur Struktur der CSH-Phasen (Vernetzung, Polymerisation, Si-, Al-Einbau) zu ermöglichen. Die Festigkeiten wurden über Vickers-Härtebestimmungen mit einem Mikroindenter untersucht, die Elementverteilungen innerhalb der Proben mit LA-ICP-MS und die Phasenzusammensetzung mit Röntgenpulverdiffraktometrie.

### 2. Versuchsdurchführung

#### 2.1. Ausgangsmaterial

Zwei verschiedene Pasten wurden bei Wasser-Bindemittel-Werten von 0,4 hergestellt. Die Bindemittel bestanden aus a) reinem Portlandzement CEM I 42,5 R (CEM), b) CEM I 42,5 R mit 10 M.% Metakaolin (10MK). Die Details zur Herstellung der Probekörper (Scheiben, Durchmesser 30 mm, Dicke 3 mm) und deren Behandlung (28 d) mit Salzsäure in einem Autotitrator werden in [4] beschrieben.

#### 2.2. LA-ICP-MS

Nach der Säurebehandlung wurde für jede Mischung jeweils ein Scheibenbruchstück pro pH-Wert und zusätzlich eine nicht säuregelagerte Referenz zusammen in Epoxidharz

eingegossen. Nach Aushärten des Harzes wurden diese zur Freilegung des Querschnitts senkrecht zur Scheibenoberfläche gesägt und in den Probenhalter des Messgerätes eingebaut. Das Messgerät besteht aus zwei Hauptkomponenten: In der Laserablationseinheit, hier ein New Wave NWR 213, wird mit einem energiereichen Laserstrahl (Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser mit 213 nm Wellenlänge) Material von der Probenoberfläche ablatiert. Dieses Material wird mit He als Trägergas in die gekoppelte ICP-MS, hier ein Quadrupol-ICP-MS NexION 300D von Perkin Elmer, transportiert, dort in der ICP-Flamme ionisiert und anschließend in der MS-Einheit analysiert. Weitere Details sind in [5] zu finden.

### 2.3. µ-Indenter

Für die Härtebestimmungen an den Oberflächen der Probekörper wurden Bruchstücke der Scheiben flach auf einen Zementsteinsockel mit Epoxidharz aufgeklebt (Abb. 1, links) und jeweils mindestens 13-mal die Vickershärte gemessen. Zusätzlich wurden die für die LA-ICP-MS hergestellten Probekörper auf Zementsteinsockel aufgeklebt und die Änderungen der Härten über die Scheibenquerschnitte untersucht (Abb. 1, Mitte). Die genauen Messangaben für den Indentationsvorgang sind in Tabelle 1 wiedergegeben. Für die Indentation der Querschnitte wurde das in Abb. 1, rechts, wiedergegebene Schema verwendet. Bei der Auswertung wurde zwischen dem Innen- und Außenbereich unterschieden.

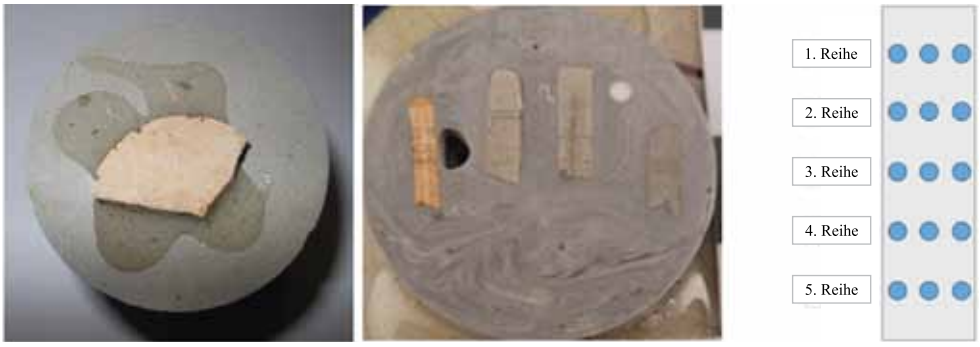



Abbildung 1:
Beispielprobekörper für die µ-Indentation,
links: Oberflächenmessung;
mittig: Querschnittmessungen;
rechts: Indentationsschema

| Bezeichnung | Wert | Kommentar |
|---|---|---|
| Prüfkraft | 3 N | maximale Indentationskraft |
| Belastungsrate | 6 N/min | Belastungsbetrag bis die Maximalkraft erreicht ist |
| Entlastungsrate | 6 N/min | Entlastungsbetrag bis die Maximalkraft wieder Null ist |
| Anfahrgeschwindigkeit | 15 µm/min | Geschwindigkeit bis die Indenterspitze die Probenoberfläche erreicht hat |
| Kontaktkraft | 10 mN | Ansetzkraft; ab dieser Kraft beginnt die Aufzeichnung des Kraft/Eindringtiefe-Diagramms |

Tabelle 1:
Einstellungen des Mikroindenters für die Messung der Vickershärten

### 2.4. Festkörper-NMR-Spektroskopie

Für die NMR-Spektroskopie wurden jeweils eine Scheibe pro Lagerung sowie eine Referenzprobe in Isopropanol fein gemahlen. Die Festkörper-NMR-Untersuchungen wurden an einem Spektrometer der Firma Bruker vom Typ Avance 300 (Magnetfeldstärke 7,0455 T)

durchgeführt. Die $^{29}$Si-NMR-Messungen erfolgten in 7mm-Rotoren bei einer Resonanzfrequenz von 59,63 MHz. Die NMR-Spektren wurden mit Single-Pulse (SP)-Technik bei Rotation mit 5 kHz um den Magischen Winkel (MAS) aufgezeichnet. Es wurde mit Pulswiederholzeiten von 5 s und einer Pulszahl von 10000 bis 20000 gearbeitet. Die chemischen Verschiebungen der $^{29}$Si-NMR-Signale wurden relativ zu externem Tetramethylsilan gemessen. Die $^{27}$Al-NMR-Messungen erfolgten in 4mm-Rotoren bei einer Resonanzfrequenz von 78,21 MHz. Die NMR-Spektren wurden mit Single-Pulse (SP)-Technik bei Rotation mit 14 kHz um den Magischen Winkel (MAS) aufgezeichnet. Es wurde mit Pulswiederholzeiten von 0,5 s und einer Pulszahl von 2000 gearbeitet. Die chemischen Verschiebungen der $^{27}$Al-NMR-Signale wurden relativ zu externem $[Al(H_2O)_6]^{3+}$ gemessen. Die Zuordnung der Signale für die Baugruppen erfolgte nach der $Q^n$-Nomenklatur [3, 4]. Zur Vermeidung von Verwechslungen wird bei der Interpretation von $^{27}$Al-NMR-Spektren die Kleinschreibung ($q^n$) verwendet. Die quantitative Auswertung der $^{29}$Si-NMR-Spektren wurde mit der Bruker WinNMR-Software durchgeführt.

## 3. Ergebnisse und Diskussion

In Abb. 2 sind die Säureverbräuche der verschiedenen Versuchsreihen zusammengestellt. Erwartungsgemäß wurde bei den 10MK-Proben durch den geringeren Zementgehalt weniger Säure verbraucht. Die abgeflachten Kurven der pH 2 Lagerungen zeigen an, das hier jeweils die Korrosionsreaktionen abgeschlossen waren, während bei den niedrigeren pH-Werten dies noch nicht der Fall war.

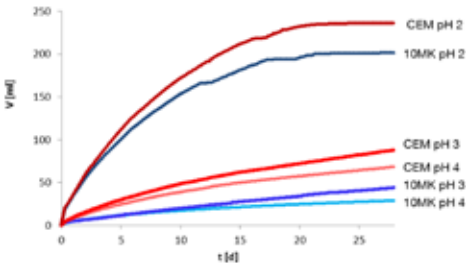



Abbildung 2:
Verbrauch an 1 M HCl während der Lagerung von jeweils 3 Scheiben, um den entsprechenden pH-Wert konstant zu halten

In Abb. 3 sind die Mikroskopieaufnahmen der Probenquerschnitte nach der Säurelagerung neben den Referenzproben dargestellt. Nach der Lagerung bei pH 4 sind nach 28 d keine sichtbaren Anzeichen von Korrosion vorhanden, während beide Proben bei pH 3 eine korrodierte Schicht aufweisen. Bei pH 2 dagegen sind in Übereinstimmung mit dem Säureverbrauch beide Proben durchkorrodiert. Die Abnahme der Querschnitte der ursprünglich 3 mm dicken Scheiben (vgl. Tab. 2) vermittelt den Eindruck, dass die CEM-Proben einen höheren Säurewiderstand besitzen. Bestätigt wird dieser Eindruck durch die in der Mikroskopieaufnahme deutlich erkennbare korrodierte Schicht bei 10MK bei pH 3.

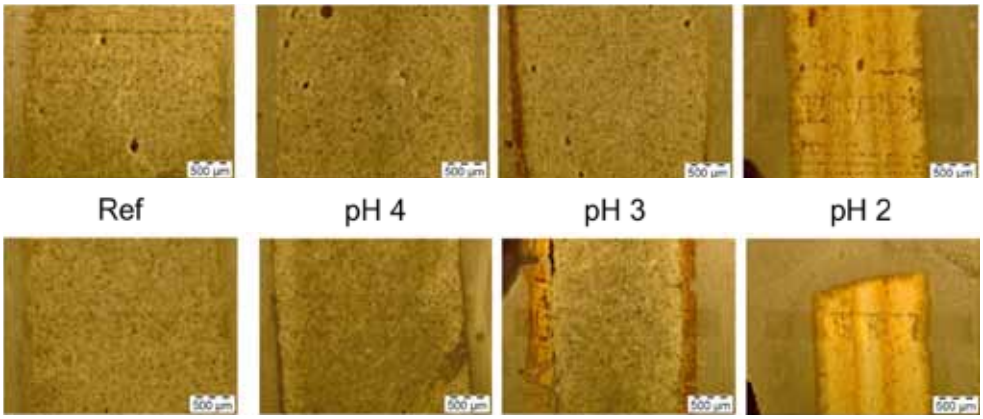



Abbildung 3:
Mikroskopieaufnahmen der Scheibenquerschnitte nach der Säurelagerung (HCl, 28d):
oben CEM;
unten: 10MK

| | | Ref. | pH 4 | pH 3 | pH 2 |
|---|---|---|---|---|---|
| CEM | [mm] | 3,0 | 3,0 | 2,9 | 1,8 |
| 10MK | [mm] | 3,0 | 2,9 | 2,6 | 1,6 |

Tabelle 2:
Scheibenquerschnitte nach der HCl-Lagerung

In Abb. 4 und 5 sind die Ergebnisse der µ-Indentermessungen zusammengestellt. Der Zusatz von Metakaolin führt zu höheren Vickershärten bei den Referenzproben. Nach der Säurelagerung findet man an den Oberflächen deutlich niedrigere Härten, abhängig vom pH-Wert. Ein Einfluss des Zusatzstoffes ist nicht mehr erkennbar.

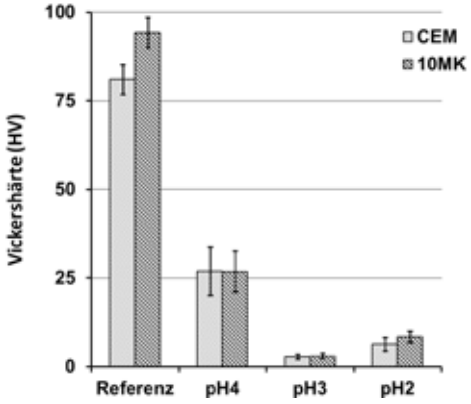



Abbildung 4:
Vickershärten an den Oberflächen nach 28 d in HCl

Auch in den Querschnitten (Abb. 5) zeigt sich eine pH-abhängige Erniedrigung der Härten. Dabei nehmen sie bei den CEM-Proben innen und außen ähnlich stark ab, d.h. es besteht ein gleichmäßiger Korrosionszustand über die gesamte Tiefe, was optisch nicht erkennbar war. Bei den 10MK-Proben ist die Härte im Innenbereich höher als im Außenbereich und insgesamt höher als bei den CEM-Proben, d.h. der Bereich unter der sichtbar korrodierten Schicht korrodiert mit MK langsamer. Bei pH 2 sind die Härten innen und außen wieder ähnlich und auf einem Niveau mit den CEM-Proben bzw. auch mit den Oberflächenmessungen.

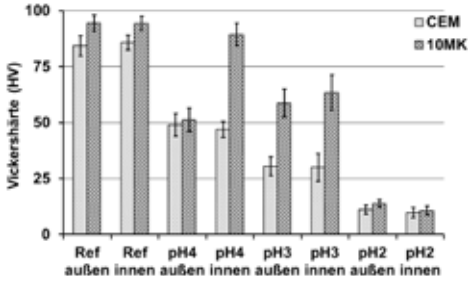



Abbildung 5:
Vickershärten an den Querschnitten nach 28 d in HCl

Die in Abb. 6 dargestellten $^{29}$Si-NMR-Spektren zeigen den Einfluss der Säurelagerung auf die Struktur der CSH-Phasen. Obwohl optisch noch unverändert, sind schon bei pH 4 deutliche Veränderungen erkennbar. Im Vergleich zu den Referenzproben hat sich das Ver-

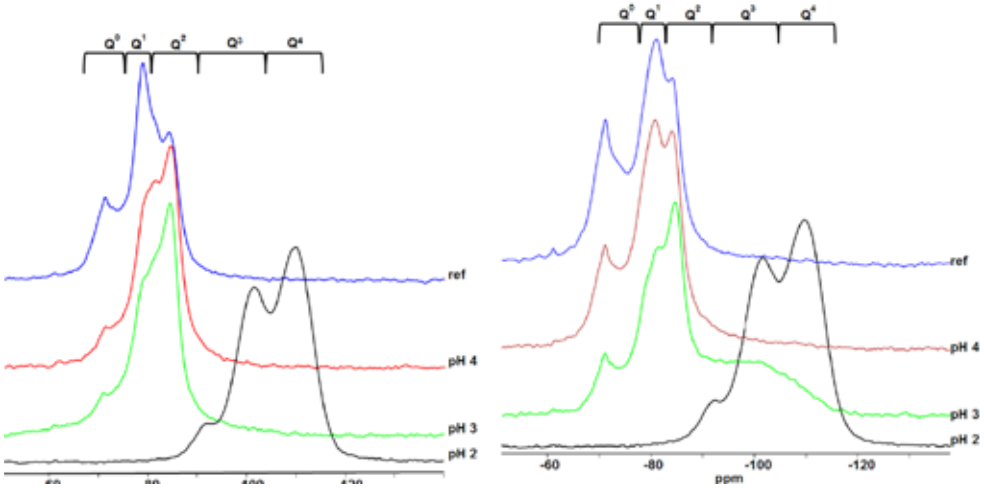



Abbildung 6:
$^{29}$Si-NMR-Spektren: links: CEM;
rechts: 10MK nach 28 d in HCl

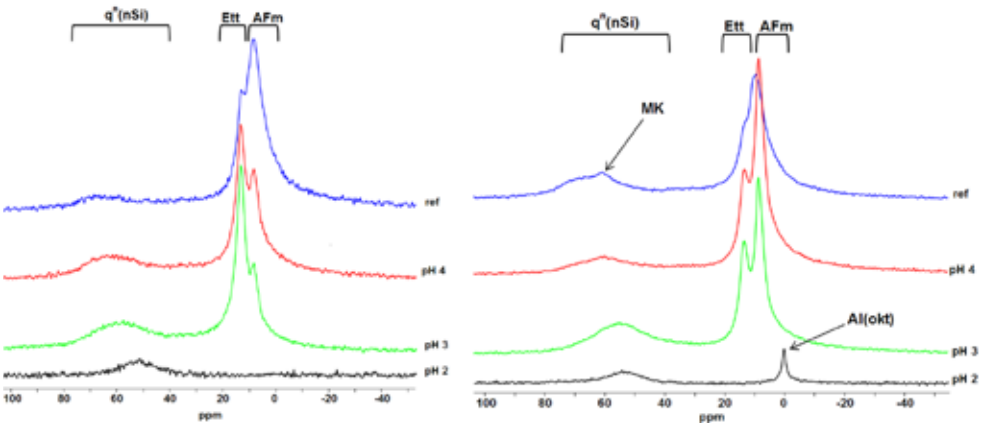
hältnis der $Q^1$- und $Q^2$-Signale zu Gunsten der $Q^2$-Signale verschoben, die Kettenstruktur ist jedoch erhalten geblieben. Der Effekt ist bei der CEM-Probe deutlich stärker als bei der 10MK-Probe. Bei den pH 3 gelagerten Proben setzt sich dieser Trend fort, wobei nun auch deutliche Anteile an $Q^3$- und $Q^4$-Signale auf das Vorhandensein von vernetzten Korrosionsprodukten bei der 10MK-Probe hinweisen. Der optische Eindruck der pH 2 gelagerten Proben spiegelt sich auch in den $^{29}$Si-NMR-Spektren wieder: Es sind keine kettenförmigen CSH-Phasen mehr nachweisbar, die gesamte Probe besteht jeweils aus vernetzten Korrosionsprodukten, deren Zusammensetzung bei beiden Mischungen sehr ähnlich ist.

Tabelle 3:
Ergebnisse der $^{29}$Si-NMR-Messungen (Angaben in mol-% Si)

| | | CEM | | | | 10MK | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zuordnung | Position [ppm] | Ref. | pH 4 | pH 3 | pH 2 | Ref. | pH 4 | pH 3 | pH 2 |
| $C_2S$ - $Q^0$ | -71 | 5,6 | 3,3 | 3,3 | - | 10,9 | 7,1 | 4,1 | - |
| $C_3S$ - $Q^0$ | -69 bis -73 | 10,8 | 1,7 | 3,4 | - | 14,8 | 8,5 | 3,3 | - |
| CSH – $Q^1$ | -79 | 49,8 | 39,1 | 34,6 | - | 27,6 | 31,2 | 18,0 | - |
| CSH – $Q^2$(1Al) | -82 | 10,3 | 14,7 | 14,0 | - | 24,3 | 19,9 | 13,5 | - |
| CSH – $Q^2$ | -85 | 23,6 | 41,5 | 41,8 | - | 20,5 | 29,7 | 30,0 | - |
| $Q^2$(1Al) | -86 | - | - | - | 0,8 | - | - | - | - |
| $Q^2$ | -92 | - | - | - | 5,8 | - | 0,9 | 6,8 | 9,3 |
| $Q^3$(1Al) | -96 | - | - | - | 1,0 | - | - | 6,4 | 1,6 |
| $Q^3$ / MK* | -101 | - | - | - | 34,2 | 2,0* | 2,4* | 7,9 | 30,7 |
| $Q^4$(1Al) | -104 | - | - | - | 1,9 | - | - | 3,3 | 3,2 |
| $Q^4$ | -110 | - | - | - | 56,3 | - | - | 6,7 | 54,7 |
| Al/Si | | 0,06 | 0,08 | 0,08 | - | 0,17 | 0,12 | 0,11 | - |
| mittl. Kettenlänge | | 3,6 | 5,2 | 5,6 | - | 6,1 | 5,8 | 7,6 | - |

Die $^{27}$Al-NMR-Spektren der beiden Mischungen unterscheiden sich von Anfang an deutlicher (Abb. 7). Durch das erhöhte Al-Angebot enthält die 10MK-Probe mehr Monophasen (Signal bei ca. 9 ppm) und nichtreagiertes Metakaolin (Signal bei 60 ppm). Während bei der CEM-Probe durch die Säurelagerung zunächst das Ettringitsignal deutlich zunimmt, findet man in den Al-NMR-Spektren der 10MK-Mischung die Zunahme des Friedelschen Salzes als dominantes Signal.

Abbildung 7:
$^{27}$Al-NMR-Spektren: links: CEM; rechts: 10MK nach 28 d in HCl



Bei beiden führt die Lagerung bei pH 2 wiederum zur kompletten Zerstörung dieser Phasen, wobei bei 10MK neben dem in silikatischen Phasen eingebauten Al ($q^4$(4Si) bei ca. 56 ppm) zusätzlich oktaedrisch koordiniertes Al (Signal bei 0 ppm) entstanden ist.

Diese Ergebnisse korrelieren mit XRD-Ergebnissen (Tab. 4), die parallel durchgeführt wurden. Aus diesen war auch ersichtlich, dass bei allen säuregelagerten Proben durchwegs nur noch geringe Mengen an Portlandit vorhanden war (Gehalte in den Referenzproben: 17,2 M.-% bei CEM, 10,8 M.-% bei 10MK). Dabei steigt tendenziell die Menge des Friedelschen Salzes mit der Abnahme von Portlandit in den Proben.

| | CEM | | | | 10MK | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ref. | pH 4 | pH 3 | pH 2 | Ref. | pH 4 | pH 3 | pH 2 |
| Amorph | 46,7 | 59,9 | 56,8 | 100 | 53,2 | 59,2 | 70,5 | 100 |
| C2S | 12,5 | 13,7 | 15,0 | - | 12,7 | 8,7 | 5,6 | - |
| C3S | 6,0 | 6,7 | 6,3 | - | 9,6 | 7,1 | 5,0 | - |
| C4AF | 4,9 | 5,5 | 3,4 | - | 5,1 | 3,7 | 2,7 | - |
| Calcit | 7,8 | 1,6 | 7,0 | - | 5,3 | 5,0 | 2,8 | - |
| Ettringit | 1,2 | 7,6 | 8,0 | - | 2,6 | 6,5 | 6,0 | - |
| Friedels. Salz | - | 3,9 | 1,9 | - | - | 8,2 | 7,15 | - |
| Monosulfat | < 0,5 | < 0,5 | < 0,5 | - | 0,6 | < 0,5 | < 0,5 | - |
| Portlandit | 17,2 | < 1,5 | < 1,5 | - | 10,8 | 1,6 | < 1,5 | - |

Tabelle 4:
Ergebnisse der XRD-Messungen (Rietveld)

Mit LA-ICP-MS wurden die Elementverteilungen über den Querschnitt der Proben ermittelt. In Abb. 8 ist das Eindringverhalten von Chlorid dargestellt. Das Chlorid durchdringt die Proben schon bei den niedrigsten Säurekonzentrationen. Während bei den CEM-Proben die höchsten Cl-Gehalte nach der pH 4-Lagerung gefunden wurden, war dies bei den 10MK-Proben nach der pH 3-Lagerung im Innenbereich.

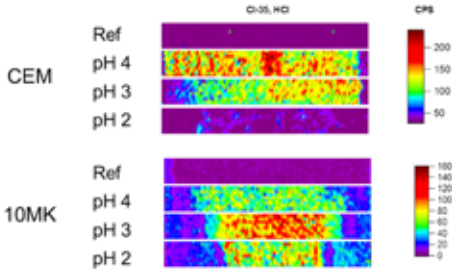



Abbildung 8:
Verteilung von $^{35}$Cl über die Probenquerschnitte, ermittelt mit LA-ICP-MS

Auf Grund des höheren Aluminiumgehalts der 10MK-Proben im Vergleich zu den CEM-Proben wird bei pH 4 die Diffusionsstomdichte der Säurespezies durch die Bildung von Ettringit und Friedelschem Salz an der Korrosionsfront vermindert. Daher ist die Zersetzung der CSH-Phasen am stärkstem im Randbereich, während im Innenbereich eher Änderungen in der Zusammensetzung der kristallinen Phasen mit geringerem Festigkeitsverlust stattfinden.

Dagegen steigt bei pH 3 der Korrosionsgrad insgesamt, so dass Calcium in CSH und Portlandit verstärkt in Lösung eintritt und das Gefüge poröser wird. Aufgrund dessen und der höheren Chloriddiffusionsstomdichte bei diesem pH-Wert können Chloridionen tiefer in das Gefüge eindringen. Wegen des höheren Aluminiumgehalts der 10MK-Proben wird mehr Chlorid im Friedelschen Salz gebunden, was den Chloridgehalt insgesamt erhöht. Dies wird allerdings durch die Bildung von Ettringit begleitet, was zur Bildung von Rissen in geschwächtem Oberflächengefüge führen kann. Damit wird die optische Korrosionstiefe erhöht, vgl. Abb. 3.

## 4. Zusammenfassung

Zementsteinproben mit und ohne Metakaolin wurden für 28 Tage in Salzsäure bei konstanten pH-Werten gelagert, um anschließend das korrodierte Material zu untersuchen. Neben der Bestimmung der Elementverteilungen und der Phasenbestände wurden Härtebestimmungen durchgeführt. Der Metakaolinzusatz führt zu höheren Al-Gehalten in den Proben und zu höheren Festigkeiten. Durch das erhöhte Al-Angebot kann zunächst mehr Friedelsches Salz und Ettringit gebildet werden. Dadurch wird ein Eindringen von Chlorid in den Innenbereich der Proben erschwert, was sich in höheren Restfestigkeiten des Innenbereichs wiederspiegelt. Durch das verzögerte Eindringen ergibt sich jedoch ein verstärkter Angriff am Außenbereich, was dort zu definierten korrodierten Schichten bzw. verstärktem Materialabtrag führt. Ein Angriff bei pH 2 führt zu einer kompletten Zerstörung der CSH-Phasen, so dass hier kein Einfluss des Metakaolins mehr vorhanden ist. Die niedrigen Festigkeiten an den Oberflächen bei den höheren pH-Werten weisen darauf hin, dass auch hier bereits korrodiertes Material mit geringer Festigkeit vorhanden ist. Dabei führt die stärker vernetzte Struktur bei den pH 2 Proben wieder zu einer Erhöhung der Festigkeiten.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der DFG für die finanzielle Unterstützung dieses Projekts.

## Literatur

[1] Alexander, M. G.; Bertron, A.; De Belie, N.: Performance of Cement-based Materials in Aggressive Aqueous Environments, State-of-the-Art Report, RILEM TC 211-PAE, Springer, 2013

[2] Beddoe, R. E.; Schmidt, K.: Acid Attack on concrete – effect of concrete composition: part 1, Cem. Int. 7 (3) (2009) 88–94

[3] Beddoe, R. E.; Schmidt, K.: Acid Attack on concrete – effect of concrete composition: part 2, Cem. Int. 7 (4) (2009) 86–93

[4] Gutberlet, T; Hilbig, H; Beddoe, R.E.: Acid attack on hydrated cement – Effect of mineral acids on the degradation process, Cem. Concr. Res. 74 (2015) 35–43

[5] Schwindl, S.; Rommel, M.; Gutberlet, T.; Beddoe, R. E.; Hilbig, H.: Untersuchung von säuregelagerten Zementsteinproben mit LA ICP MS, GDCh-Monographie Bd. 48, (2014), S. 45–48

[6] Engelhardt, G.; Michel, D.: High-resolution Solid-State NMR of Silicates and Zeolites, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 1987

[7] Schachinger, I.; Stengel, Th.; Hilbig, H.: Effect of Curing Temperature at an Early Age on the Long-Term Strength Development of UHPC, 2. Int. Symp. on UHPC, Kassel, Germany, March 2008

**In: Proceedings of International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), September 15-17, 2015, Berlin**

## 11.5. Concepts for the integration of NDT courses into the academic curriculum of universities

Christian U. GROSSE

### Abstract

Since the application of non-destructive testing techniques becomes more and more attractive in engineering there is a demand to integrate instructions about the basic principles into the academic curriculum. This paper deals with the integration of courses, exercises, seminars and several other elements into the Bachelor and Master curricula at universities. These concepts can be different from the well-known level-courses offered in the non-academic world since they should address also the development of new techniques and applications in a research driven environment. There are several aspects making NDT courses unique compared to other topics. Since NDT is truly interdisciplinary, the courses can be offered separately for different degree programs and disciplines but also as multidisciplinary courses for students in civil, environmental, mechanical or electrical engineering programs, just to name some. While elements of NDT are already included in most of these programs at universities throughout Germany and Europe this is not done in a coordinated way. There is a close relation to topics like measuring techniques, data mining and statistics. First elements of NDT can already be integrated in Bachelor courses and a more comprehensive education can follow in the Master classes. Another specialty of NDT is the easy integration of data driven experiments and simulations using sophisticated measuring devices and sensors as well as complex software what makes such courses very attractive to students. The paper will give recommendations for a curriculum and for several elements (conventional and multi-media) that could support the education of students in the field of non-destructive testing. The recommendations will consider the actual situation in Germany and Europe but can be applied also elsewhere.

**Keywords:** teaching, courses, lectures, exercises, seminars, moodle, media, wiki

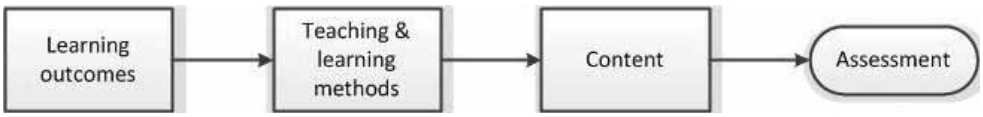
### 1. Introduction

The so-called Bologna process reshaped the qualification process in the framework of European higher education. It established a set of regulations how to determine the competences of the students and what they should know and being able to do on completion of a course or of their bachelor's, master's and doctoral degrees. The framework makes use for two of them (bachelor and master) of the European Credit Transfer and Accumulation System (ECTS), where a certain amount of ECTS points is required to obtain a bachelor's or a master's degree. The modularization of degree programs represents a key element of the Bologna Process [TUM 2014]. The module system, e.g. the grouping of courses into thematic blocks, was introduced in an effort to increase transparency, facilitate the transfer of credits between institutions and, in turn, foster mobility within the European Higher Education Area. It was also introduced to improve the quality of the education limiting the number of dropout students. The module system was designed to provide students insight into the connections between subjects within thematic areas, as well as relationships between different thematic areas, and to ensure that student performance is continually assessed throughout the course of study.

What does this mean for the education in the field of NDT? Modules on NDT– no matter what type of instruction and learning process is addressed, like e. g. lectures, exercises, seminars, projects, self-study, homework, essays, e-learning units – require to follow these rules of modularization, module description and performance assessment in form of an examination. Students who successfully pass an examination completing a module are awarded credits (ECTS points). The number of credits awarded for a module reflects the student workload required for the module.
The key point to perform an educational module is the module description. This should be guided by four elements (Figure 1) and the following questions:

- What learning outcomes is the student to have achieved upon completion of the module?
- What teaching and learning methods will be employed to achieve these outcomes?
- What content is the module to communicate?
- How is students' achievement of these outcomes to be assessed?

Figure 1.
Four elements of a module description




In this context modules for Non-destructive testing has a lot to offer and all of the mentioned ways to teach and learn can be addressed, including teaching elements like lectures, exercises, seminars, projects, self-study, homework, essays, e-learning units and excursions.

## 2. Teaching elements in the context of NDT

The afore mentioned elements will be addressed in the following sections separately while the reader should keep in mind that only a combination of the individual elements can form a full module that is equivalent to e.g. 12 ECTS. Following the definition of the ECTS system above representing the workload of an element, a lecture with three hours plus exercises with one hour per semester week will be equivalent to e.g. 5 ECTS only. Therefore, a single element cannot form a full module which is usually combined by different lectures or exercises. If, after successful completion of the module, students are to be able to conduct NDT measurements independently, lecturing alone is not an adequate teaching method for such an NDT module. Instead, a combination of teaching methods would be better suited to achieving the intended outcomes by providing students guided, hands-on experience through which to acquire laboratory and in-situ NDT skills.

A key focus of the Bologna Process is the shift in orientation of education to outcomes. Assessment in the form of coursework and examinations plays an important role, here, but not as a means of testing students' ability to merely internalize module content. Competence-oriented assessment measures the student's attainment of clearly-defined disciplinary and extradisciplinary learning outcomes at the level appropriate to the module and degree program. This is only possible when both the content and method of assessment are "aligned" with the learning outcomes of the module. The so-called "constructive alignment" (Figure 2) was the basis for the design of NDT teaching elements at TU Munich.

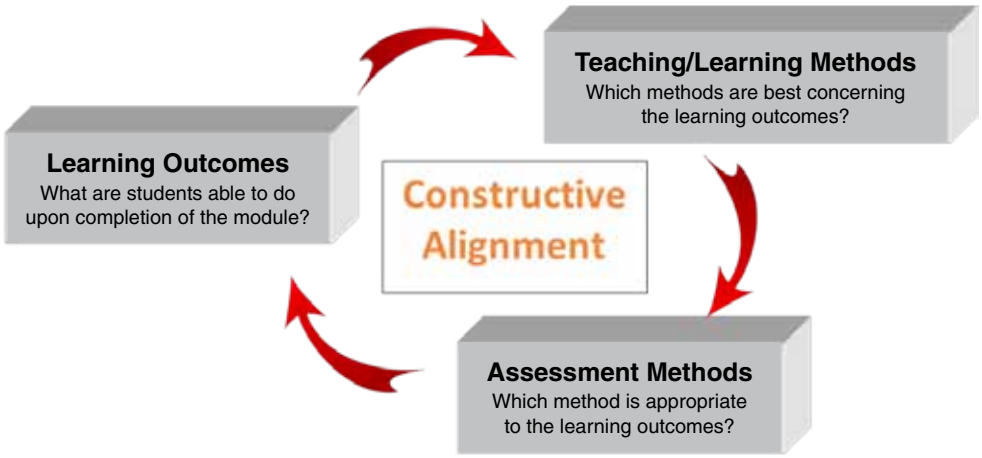



Figure 2.
Constructive Alignment

Since no concept or best practice paper for the integration of NDT content into the curriculum at German universities exists, the following descriptions are based on the practice at the Technische University München and the Chair of Non-destructive Testing. All examples are taken out from the daily work with the students.

## 2.1. NDT lectures

The content of NDT lectures and also the tools that are supporting the teacher and the students (resp. their learning outcomes) have to be selected according to the following points:

a) Field of application (for example civil, environmental, geotechnical, mechanical or electrical engineering, architecture)
b) Expected level of expertise (bachelor or master or post-doc level; introduction, beginners, experts)
c) Time slot available (regular time slot per week per semester, consecutive courses, block courses)
d) Number of students (group work, homework, etc.)
e) Resources available (assistants, measuring devices, computers, samples etc.)

There is a big difference between courses given in physical presence of the students and so-called Massive Open Online Courses (MOOCS) that offer unlimited participation and open access by students via the web. MOOCS are not further considered in this paper but are of increasing importance.

### 2.1.1. Content

It is obvious that a large variety of combination of the boundary conditions that are mentioned in the above list exists that are governing the content of an NDT course. As an example one possible content will be given in Table 1 for both a lecture on NDT in civil and on mechanical engineering for a 3 hours per week per semester (3 SWS). Such a lecture is accompanied with exercises (e.g. 1 SWS) with hands-on activities of the students using the individual techniques after each lecture. Some topics like impact-echo are relevant only in one particular field (here: civil engineering) and accordingly a cross is set only there.

Table 1.
Content of an NDT master course for students in civil and mechanical engineering, resp.

| Type of the content | Content | Civil Eng. | Mech.Eng. |
|---|---|---|---|
| Introduction and Basics | Introduction and motivation | X | X |
| | Fields, waves and particles | X | X |
| | Elastic wave propagation | X | X |
| | Electromagnetic wave propagation | X | X |
| | Data processing techniques | X | X |
| | Sensors and measuring principles | X | X |
| NDT techniques | Visual Testing | X | X |
| | Ultrasound | X | X |
| | Impact-echo | X | |
| | RADAR and microwaves | X | X |
| | Infrared thermography | X | X |
| | Radiography and CT scanning | | X |
| | Eddy current testing | X | X |
| | Penetrant and magnetic particle testing | | X |
| | Potential field mapping | X | |
| | Other handhold techniques | X | X |
| | Acoustic emission testing | X | X |
| | Vibration analysis techniques | X | X |
| | Structural health Monitoring | X | X |
| Applications | Selected applications in Civil Eng. | X | |
| | Selected applications in Mech. Eng. | | X |

The average number of weeks per semester is fourteen. The twenty-one individual topics in Table 1 can easily fit into such a scheme considering that some topics do not need a full lecture day. A 4 SWS lecture plus exercises will result in 42 hours total time (14 x 4 x 45 minutes). This time quota reveal that a one-semester course can be a “beginner course” only. Expert level courses require consecutive courses and a larger involvement of home-work and exercises.

2.1.2. Teaching tools

There are numerous ways to support a lecture and the teaching and learning methods. If the presentation consists of **powerpoint slides** (what is a fact in most cases) a simple way is the distribution of copies of the slides. The existing NDT course at TU Munich consists of about 1500 slides what illustrated that this way of dissemination is second best. Moreover are good slides not loaded with text but should underline the spoken word by pictures or graphs. A reader can in most cases not understand a content without listening to the spoken word. As a general rule there is no compulsory attendance for students enrolled to a certain lecture. So, how can content be provided in a way that students can work at home? Following educational traditions a comprehensive scriptum (lecture notes) is offered at TU Munich to students of NDT courses (Figure 3). It follows closely the structure given in Table 1 and has today about 250 pages [Grosse 2015]. A translation of the **scriptum** into English is under preparation.

Figure 3.
Cover of the scriptum “Introduction into NDT in Engineering” [Grosse 2015]

ZfP
Lehrstuhl für
Zerstörungsfreie Prüfung

TUM

Einführung in die Zerstörungsfreie Prüfung
im Ingenieurwesen

Grundlagen und Anwendungsbeispiele

Arbeitsblätter im Rahmen der Lehrveranstaltungen des Lehrstuhls für
Zerstörungsfreie Prüfung der Technischen Universität München

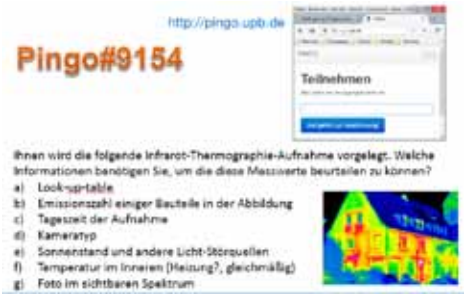
Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Geophys. Christian U. Große
Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung
Technische Universität München
Baumbachstr. 7; 81245 München
Tel.: 089-289-27221; eMail: grosse@tum.de
http://www.zfp.tum.de

Verwendung nur im Zusammenhang mit der Vorlesung – Version 2015-07-01-Skript_ZfP_62

A written scriptum is useful for the preparation or wrapping-up of a lecture at home. To support a successful reception of the content during the powerpoint presentation several tools like group work or blackboard exercises can help but involve usually a minority of the students only. They are inefficient for large groups. A more modern way is the use of live feedback systems.

Figure 4.
Integration of a web-based PINGO question into a lecture slides

The one used in NDT lectures at TU Munich is the web-based **PINGO** system (Peer instruction for very large groups) developed by the University of Paderborn [PINGO 2015]. This tool is free of charges for universities and based on the interaction using a certain website that is provided by the instructor (i. e. professor). For interaction the students can use their own tablet or smartphone. Figure 4 demonstrates how a PINGO question can be integrated into a powerpoint presentation.




The students insert the given number (top left) into the window of the website (top right) and can select one (single choice) or multiple answers in a given time interval (usually 1–2 minutes). Usually the students accept this live feedback system because it is anonymous and praxis oriented. It is certainly a valuable tool for the teacher since it is simple to be used and fast. The lecturer can get into discussion with the students easily and see, if a point was understood or not. Even the development of the students can be investigated by repetitive questions and a comparison with former classes is possible – see Figure 5 where the bars indicate the chosen answers of different classes.

Figure 5.
Results of a PINGO survey with comparison of classes from 2013 (light blue) and 2014 (dark blue) – B and D are wrong answers

Other additional instruments for teaching and learning are the use of multimedia content and Moodle platforms (http://moodle.de/). **Moodle** – as offered by TU Munich – provides a virtual online classroom that can be used for communication and additional materials like documents, books (from the electronic library), work sheets and many more. This virtual classroom can be used by the students at any place and time and by the lecturer the content can be uploaded once and reused for the next course.

## 2.2. Exercises

An invaluable tool to strengthen the skills of students in the field of NDT are exercises. The way exercises can be integrated into a lecture or as more or less independent hands-on laboratory measurements depend strongly on the number of students enrolled for a course and the provided resources (see d) and e) in section 2.1). In case of unfavorable conditions with a large number of students and little resource exercises in a classroom using equipment with an LCD projector interface can be used. Examples of such devices are tiny IR cameras (Figure 6), eddy current, ultrasound impulse-echo devices, RADAR, video endoscopes and other handheld devices. Some of the mentioned devices are wireless what increases the applicability for lectures in large halls in front of many students. NDT devices using miniature sensors like Microelectromechanical Systems (MEMS) or can be combined with a smartphone are also available.

However, a better way to train NDT measurements are individual or grouped hands-on exercises. There are two ways this is done at TU Munich. During exercises for master classes some experiments are done together with the lecturer or an assistant (Figure 7). Problems like defect detections and localizations can be treated in deep. The lecturer can help in unexpected situations or with new and unknown specimen. Even very challenging tasks can successfully be examined and mistakes can be analyzed together. This is a more demanding way to organize an exercise because the students learn to analyze a problem, select the best technique, device and sensor and conducting own measurements finishing with a deep analysis and interpretation of the data.

Figure 6.
Small IR camera that is powered via an USB interface and hooked-up to a computer that can provide a video signal for an LCD projector in a classroom

Figure 7.
Students measuring the ultrasound velocity in through-transmission at different materials

A less challenging way to organize NDT exercises is suitable for a more routine training and suitable for many groups and even for bachelor classes. After a short introduction about the fundamentals of NDT the students are provided with video courses demonstrating a typical measurement (Figure 8) along with a description of the basic settings of the instruments.

Figure 8.
Snapshot of a training video to setup thermographic measurements

In addition a notebook (printout) is provided with a repetition of the basics (e.g. about ultrasonic measurements) and precisely described measuring tasks. 2–3 students are grouped together at their individual exercise day conducting the measurements without supervision (Figure 9). The final results are written into the notebook at the individual topics. The note-

Figure 9.
Students detecting defects in a car front hood made out of CFRC using lock-in thermography – the measured data are displayed on the screen in the lower right corner (© Astrid Eckert, TUM)

book is at the end of the course a document similar to an assessment protocol for each student. This procedure was established by Gehlen and Spengler in 2014 for the bachelor's "practical course on construction materials" (Praktikum Konstruktionswerkstoffe) with big success. A part of this course are measurements with three individual NDT techniques (ultrasound, RADAR, IR thermography or alternatively endoscopy). Figure 8 depicts a snapshot of one of the training videos that are made available to the students before the course starts.

### 2.3. Seminars

Traditionally a seminar is a way to tackle a topic (e.g. a certain application or method) more comprehensively. The "NDT seminar" as it is organized at the Chair of Non-destructive Testing since 2011 at the TU Munich is a combination of external seminar talks by experts and student presentations. An expert talk is followed by questions that the students have to answer in written form. The topics of the student talks are assigned at the beginning of a semester and chosen from a list provided by the chair. A list of former talks (since 2012) can be found on the webpages of the chair (http://www.zfp.tum.de/index.php?id=45).

### 2.4. Self-study, homework, wikis

For certain study lines (Vertiefungsrichtungen) additional work load and credit points can be provided by tasks that a student can treat at home or at the university aside the lectures. Homework is an example for such a task with the drawback that (at least in former years) the finished homework (even if very well done by a student) disappeared in the

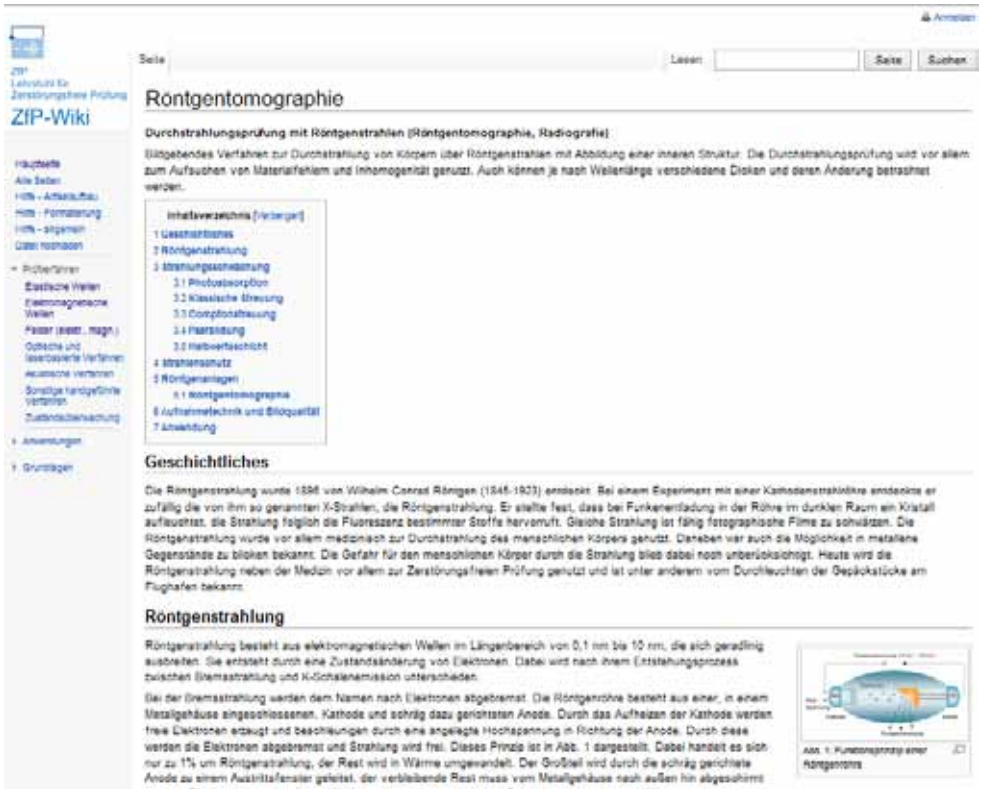



Figure 10.
Snapshot of TU Munich's NDT wiki at http://zfp.cbm.bgu.tum.de/mediawiki

desk of the lecturer. A Wikipedia style “NDT wiki” is the attempt to avoid the drawbacks of homework and to motivate students. Wikipedia (https://www.wikipedia.org/) is known as the free encyclopedia that anyone can edit. At the time being the English Wikipedia version contains about 5 million articles. The idea was to compile an own wiki for the field of NDT where students can provide articles during a homework with the aim to compile a more or less comprehensive database on NDT methods and applications. The NDT wiki (“ZfP-Wiki” http://zfp.cbm.bgu.tum.de/mediawiki) is accessible (readable) by everybody but articles can be provided or changed only after permission by the chair. Figure 10 gives an example of one of the student’s articles on CT scanning. A point that is brought up often in regard to Wikipedia is the quality of the articles. In regard to NDT one can prove that some articles of the free Wikipedia encyclopedia contain mistakes, containing statements that are different between different language versions and are less consistent. It is the secondary aim of the NDT wiki to keep full control of the content, put in more consistency and, primary, to provide students with higher motivation for articles that are worldwide readable and will not disappear after the end of the semester.

The NDT wiki is at the time being with 76 individual articles still in its infancy containing exclusively articles in German. But it is continuously growing and will have English equivalent articles (with the same content) in future.

### 2.5. Excursions

At the Chair of Non-destructive Testing credits may also be awarded for modules requiring forms of qualification other than graded examination, such as participation in a study-related excursion. This gives insights into professional NDT labs and confronts students with real-world problems. A typical NDT excursion consists also of an overview of the company, the actual employment status and typical career examples of NDT employees. There is time enough to answer individual questions and to have private conversations.

Figure 11.
Bachelor, Master and Ph.D. students visiting the NDT group at Siemens AG (Munich) in 2014

Over the last years excursions were organized to visit the NDT groups of the companies Airbus Helicopters, MTU, Siemens (Figure 11) and BMW Group.

## 3. Conclusions and Outlook

The field of Non-destructive Testing provides interesting and unique topics for certain areas of education. First of all NDT is related strongly to materials sciences to provide insight into material properties and deterioration processes. As a truly interdisciplinary science NDT help to identify problems across several material classes, disciplines and applications. NDT methods are involving measuring, data processing and sensing techniques as well as computer science and simulation. All these skills are beneficial for many disciplines and successful students gather abilities that are useful for many employers. In Munich it is a fact that students from an increasing number of different study lines enroll for NDT courses including civil, environmental, geotechnical and mechanical engineering as well as medical, aeronautic and automotive engineering. This should encourage other universities to establish NDT courses on a level and for applications that are suitable for their special field of education. Several already existing courses [Grosse 2013] should be enhanced.

However, no best practice paper is at the moment available as it is for example the case for the education in the field of construction materials [Reinhardt et al. 2000]. Further efforts should be made to provide universities and lecturers with concepts to establish such courses.

## Acknowledgements

The author is grateful to the Technical University of Munich for giving the opportunity and the resources to implement some of the ideas mentioned in the paper. The support from the TU Munich “ProLehre” team is acknowledged as well as the numerous discussions with and the support by students, assistants and colleagues.

## References

[1] Grosse, C. U. [2013]: „Konzepte für die interfakultative Lehre im Fach Zerstörungsfreie Prüfung“. In: Baustoff und Konstruktion (Eds. Nothnagel & Twelmeier), Springer publ. Berlin Heidelberg, pp. 359–374

[2] Grosse, C. U. [2015]: “Einführung in die Grundlagen der Zerstörungsfreien Prüfung im Ingenieurwesen – Grundlagen und Anwendungsbeispiele“, Technische Universität München, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, 250 p.

[3] PINGO [2015]: "Peer Instruction for very large groups", University of Paderborn, http://pingo.upb.de (last visited Aug. 12th, 2015.

[4] Reinhardt, H. W. et al. (Ed.) [2000].: „Hochschullehrer-Memorandum Werkstoffe im Bauwesen – universitäre Lehre und Forschung“. In: Bauingenieur 75, N0 11, pp. 723–729.

[5] TUM, Academic and Student Affairs Office [2014]: „How to Write a Module Description”. Technische Universität München, Version 2 of November 2014.

# 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