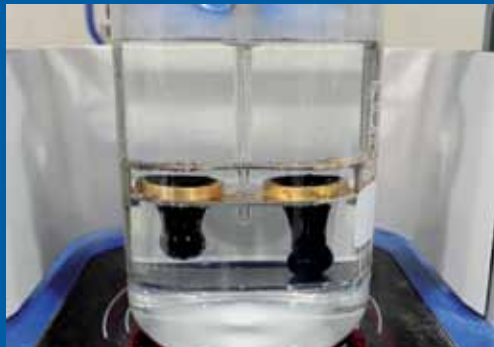




Jahresmitteilung 2014

Schriftenreihe Baustoffe



cbm - Centrum Baustoffe und Materialprüfung



Jahresmitteilung 2014

Schriftenreihe Baustoffe

Inhalt

1. Vorwort	6
2. Personelle Veränderungen	8
3. Organigramm	10
4. Aus dem Lehrbetrieb	12
4.1. Innovative Lehre zum WS 2014/2015	12
4.2. Diplom- und Masterarbeiten	17
4.3. Bauingenieurexkursion zu Baustoffherstellenden Industrien	26
5. Veranstaltungen	41
5.1. 12. Münchener Baustoffseminar	41
5.2. Betriebsausflug 2014	46
5.3. Antrittsvorlesung von Prof. Steven D. Glaser	48
5.4. Tag des Lehrstuhls am 10.01.2014	50
5.5. Firmenlauf 2bRUN	51
5.6. International Conference EuroCoalAsh 2014	52
6. Ehrungen	53
6.1. Gastprofessur für Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen	53
6.2. Dr. Dirk Lowke erhält den Georg-Burg-Preis	54
6.3. Lehrpreis für ZfP	54
7. Berichte aus den Arbeitsgruppen	55
7.1. Arbeitsgruppenschwerpunkte	55
7.2. Abgeschlossene Forschungsvorhaben	63
7.3. Laufende Forschungsvorhaben	84
7.4. Neue Forschungsvorhaben	86
7.5. Ausgewählte Materialprüfung	89
7.6. Faszination Forschung	93
8. Mitarbeit in Ausschüssen, Arbeitskreisen, Gremien und Fachkommissionen	97
9. Dissertationen	101
9.1. Laufende Dissertationen	101
9.2. Dissertation Fact Sheets	103
9.3. Beendete Dissertationen	109
10. Liste aller Veröffentlichungen 2014	115
11. Ausgewählte Veröffentlichung	121
11.1. Avoiding Damaging Alkali Silica Reaction with Fly Ash – Long Term Storage Investigations	121
11.2. Accelerated Carbonation: Changes in Water Transport, Porosity and Phases of Mortar Due to Different CO ₂ Pressures	128
11.3. Efficiency of materials used for repair measures of concrete structures exposed to chlorides	135
11.4. Untersuchung von säuregelagerten Zementsteinproben mit LA ICP MS	150
12. Impressum	153

Liebe Freunde und Partner des cbm!

Das Jahr 2014 stand ganz im Zeichen der Tat. Zwei große „gesichts“-verändernde Projekte, die in den vergangenen Jahren vorbereitet wurden, konnten in diesem Jahr in die Tat umgesetzt werden.

Im letzten Jahr berichteten wir noch über die ersten vorbereitenden Arbeiten in Sachen Erweiterung Büroraumkapazität (Fertigstellung der Fundamente), jetzt steht er da, unser Modulanbau aus Stahl, der von nun an, was hätte man erwartet, die AG Stahl und Stahlkorrosion beherbergt. Die damit einhergehenden Umzüge, die in drei Etappen stattfanden, haben uns fast das ganze Jahr 2014 in Atem gehalten. Das Angesicht des cbm hat sich dadurch sichtbar verändert.

Auch das Gesicht des Grundpraktikums hat sich verändert. Das neu entwickelte, videogestützte Grundpraktikum – wir berichteten in 2013 von den Anfängen – ist nun aus den Kinderschuhen, sprich aus der Einführungsphase herausgewachsen. Im Sommersemester 2014 wurde das Praktikum, nun fest im Curriculum der Bauingenieure verankert, erstmalig durchgeführt. Glaubt man den Umfragen, die Veranstaltung wurde mehrmals und zudem unabhängig voneinander von verschiedenen Einrichtungen evaluiert, kamen die Neuerungen bei den Studierenden sehr gut an.

Doch warum wurde mehrmals und unabhängig voneinander evaluiert? Weil das Projekt sehr unter Beobachtung stand und nicht nur TUM-begleitet evaluiert wurde (Fragebogen 1, ProLehre), sondern auch sogenannte „Begleitforscher“ der Universität Bielefeld (Bildungsforscher) dieses Projekt sehr genau unter die Lupe genommen haben (Fragebogen 2). Für uns war insbesondere interessant zu

erfahren, wie die Studierenden ihren Kompetenzzuwachs während des laufenden Semesters (Fragebogen 1a) bzw. nach Abschluss der Prüfung (Fragebogen 1b) einschätzten. Auch das neue Prüfungsformat, die Parcoursprüfung im Labor, stand im Fokus der Evaluierung. Am Ende waren wir in der Lage, den vor der Prüfung „gefühlten“ und den nach Abschluss der Parcoursprüfung „gemessenen“ Kompetenzzuwachs zu vergleichen. Die Lücke war nicht groß. Die Studierenden können sich offenbar sehr gut selbst einschätzen.

Wir gehen davon aus, dass von dem neuen, noch anschaulicher, noch interaktiver gestalteten Praktikumsformat nicht nur die Studierenden des BSc-Studiengangs „Bauingenieurwesen“, sondern auch die in anderen Studiengängen aktiven Studierenden mittelfristig mit dem Ziel „noch mehr Anschaulichkeit“ profitieren werden.

Apropos Studierende und Studiengänge, die Studierendenzahlen steigen weiter, inzwischen mehr als 3000 Studierende allein an der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt (BGU)! Da sich unsere Lehrangebote jedoch längst nicht mehr nur auf klassische Studiengänge dieser Fakultät beschränken, spüren wir auch den Zuwachs in den anderen Fakultäten. Mit unseren Lehrangeboten bedienen wir momentan neun, z. T. sehr stark nachgefragte Studiengänge, auch über die Fakultätsgrenzen hinweg. Unsere Exporte gehen so u. a. in die Fakultäten WI (Wirtschaftswissenschaften), MW (Maschinenwesen) und AR (Architektur), auch in die Munich School of Engineering (MSE) und in die Lehrerbildung.

Neben der Lehre haben wir uns weiteren Herausforderungen in der Forschung gestellt. Projekte wurden erfolgreich

abgeschlossen, neue, darunter auch wieder größere Verbundprojekte, wurden angestoßen und akquiriert. An den gleichbetonten Pfeilern „Grundlagenforschung“ und „angewandte Forschung“ wollen wir weiter festhalten, denn nur durch die Kopplung beider Felder vermeiden wir den sprichwörtlichen „Elfenbeinturm“. Aber jede reife Entwicklung für die Praxis findet ihren Ursprung in Grundlagenforschung, der wir uns sehr verpflichtet fühlen.

Nicht zuletzt auch aus diesem Grund wurden u. a. bestehende Forschungsk Kooperationen weiter verstärkt und neue begonnen, woraus sich u. a. auch eine Guest Professorship an der China Building Materials Academy (CBMA) in Peking entwickelte. Wissenschaftler (Visiting and Research Scholars) aus den USA (Steven Glaser, UC Berkeley) und China (Zhendi Wang, CBMA) waren bei uns über längere Zeiträume zu Gast.

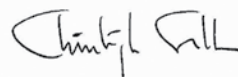
So blicken wir wieder auf ein ereignisreiches und auch ertragreiches Jahr zurück, wohl wissend, dass ohne die Unterstützung unserer Freunde und Partner der Weg zu guter Lehre, Forschung und Materialprüfung sicherlich viel schwieriger wäre.

Wir möchten diese Erkenntnis zum Anlass nehmen, Ihnen dafür zu danken, dass Sie uns als Bildungseinrichtung, als Forschungspartner und auch als unabhängige Prüfer, Überwacher, Zertifizierer Ihr Vertrauen geschenkt haben, für Ihre Ideen und Anregungen, die sich aus diesen Kontakten heraus ergaben und uns weiter gebracht haben und auch für Ihre Kritik, die uns weiter anspornt.

Wir freuen uns auf weitere, gemeinsam mit Ihnen zu lösende Aufgaben.

Ihre

Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen



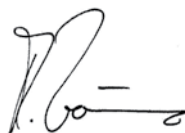
Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Geophys. Christian Große



Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz



Dr.-Ing. Thomas Wörner



2. Personelle Veränderungen

Wissenschaftliche Mitarbeiter, die ihre Forschung im cbm aufgenommen haben:

Herr Manuel Raith, M.Sc.	(01.01.2014)
Herr Daniel Weger, M.Sc.	(01.01.2014)
Herr Philipp Jatzlau, Dipl.-Ing.	(01.12.2014)

Nicht wissenschaftliche Mitarbeiter, die uns nun unterstützen

Herr Hrvoje Josip Grgic	(01.04.2014)
Herr Mirosław Teodorowicz	(01.04.2014)
Herr Michael Tröndle	(01.07.2014)
Frau Sonja Hafenmayer	(01.11.2014)

ausgeschiedene Mitarbeiter

Herr Ronald Richter, Dipl.-Ing.	(31.03.2014)
Herr Marc Zintel, Dipl.-Ing.	(30.06.2014)
Herr Martin Baumann	(31.07.2014)
Herr Julian Hörbrand	(31.08.2014)
Herr Tobias Gutberlet, M.Sc.	(31.10.2014)
Herr Francisco Durán Graeff, Civ.Eng.	(30.11.2014)

von links: Frau Sonja Hafenmayer, Frau Britta Uhl, Frau Bianca Freibuchner, das neue Sekretariat der Institutsleitung



in den Ruhestand verabschiedet haben wir

Frau Constanze Liedtke

(31.12.2014)

25-jähriges Dienstjubiläum feierten

Frau Renate Deuerling

(16.01.2014)

Herr Barnabas Omozokpia

(01.06.2014)

Wir trauern um unseren Mitarbeiter

Herrn Georg Hell

(†20.05.2014)



links:
Frau Constanze Liedtke,
Verabschiedung in den Ruhe-
stand.

Rechts oben:
Frau Renate Deuerling, 25-jäh-
riges Dienstjubiläum

Rechts unten:
Herr Barnabas Omozokpia,
25-jähriges Dienstjubiläum

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.
Fr. Wang, M.Sc.

Mörtellabor

Hr. Kriegel
Hr. Gottmann
Hr. Blendowsky

Physiklabor

Fr. Hartlieb-Pfüller

AG 2 BETONTECHNOLOGIE

Hr. Lowke, Dr.-Ing.
Hr. Skarabis, Dipl.-Ing.
Hr. Kränkel, Dipl.-Ing.
Fr. Illguth M.Sc.
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.
Hr. Zashev, Dipl.-Ing.

Assistenz/Techn. Sachbearbeitung:

Fr. Bognar
Fr. Kohler
Fr. Röttinger

Stahllabor

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

Korrosionslabor

Fr. Lillich

Ausbilderin
Auszubildende Baustoffprüfer
Auszubildende Chemielaboranten

Fr. Fritz
Fr. Böltl
Fr. Koch

Fr. Frey

Fr. Lindel

Fachgebiet Gesteinshüttenkunde

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

Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung

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

EDV

Hr. Laureana

Bibliothek

Fr. Kassel

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

Projektgruppe Bewehrung Hr. Dr.-Ing. Osterminski

AG 4 CHEMIE

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

Chemielabor

Hr. Gmell
 Fr. Erhardt
 Hr. Halegua

AG 5 BITUMENHALTIGE BAUSTOFFE UND GESTEINE

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

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

FG Gesteine (52)

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

Gesteinslabor

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

Sandlabor

Hr. Reier
 Hr. Janeselli
 Fr. Fritz

Mechanische Werkstatt

Hr. Strehle

AG 6 ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG

Hr. Groschup, Dipl.-Geophys.
 Hr. Jatzlau, Dipl.-Ing.
 Hr. Malm, M.Sc.
 Hr. Raith, M.Sc.

ZfP Labor

Fr. Gemander, M.Sc.
 Fr. Nahm

Elektronische Werkstatt

Hr. Münchmeyer

4. Aus dem Lehrbetrieb

4.1 Innovative Lehre zum WS 2014/2015

4.1.1. „Erlebnislernen“ auch in großen Gruppen durch ein vernetztes System von teilvirtualisierten Praktika und kompetenzorientierten Prüfungen

Zwischenbericht zum gleichnamigen Stipendium der Joachim Herz Stiftung für Prof. Christoph Gehlen

Projektidee/Einleitung

Bei der Neukonzeption des Moduls „Werkstoffe im Bauwesen“, welches in der Studieneingangsphase von angehenden Bauingenieuren gelehrt wird, sollten die üblicherweise im 1. Fachsemester eher theoretischen Lehrformate Vorlesung (VL) und Hörsaalübung (HSÜ) von Beginn an mit diversen eLearning-Angeboten (Lehrfilme zu Praktikumsversuchen, Selbsttests) veranschaulicht werden. Neben der zusätzlichen Veranschaulichung, z. B. durch Lehrfilme, sollte das eLearning Angebot auch die Aufgabe übernehmen, die in VL und HSÜ vermittelten theoretischen Grundlagen mit den im Folgesemester (2. Fachsemester) angebotenen (praktischen) Laborveranstaltungen zu verzahnen. Dies sollte durch die plattformgestützte Vorabbearbeitung eines mit Hilfe der Filme und Selbsttests zu bearbeitenden Arbeitsbuchs „Praktikum“ geschehen.

Jedes einzelne Lehrformat im Gesamtmodul (VL, HSÜ, eLearning-Angebot, Praktikum) ist in der Hochschullehre nicht neu. Neu und momentan im Bauingenieurwesen einzigartig ist aber das System der verschiedenen Maßnahmen, die vernetzte Aktion zwischen Vorlesung, Hörsaalübung, eLearning-Projekt und Praktikum, die dem Studierenden ein abwechslungsreiches „Erlebnislernen“ ermöglichen soll. Nach dem Entwurf der Einzelkonzepte für Vorlesung, Hörsaalübung und eLearning-Projekt, die nicht Gegenstand der Förderung waren, war nun im Rahmen des Stipendiums das Konzept des Praktikums mitsamt der dazugehörigen lernzielgerechten Prüfung auszuarbeiten.

Die Idee war vor allem, das alte, vor der Neukonzeption schon bereits existierende Praktikum, deutlich zu entlasten und über das eLearning-Projekt mit den Formaten Vorlesung und Übung zu verzahnen. Die Erleichterung des „alten“ Praktikums sollte durch eine Teilvirtualisierung und kompetenzorientierte Neukonzeption eines nun „Laborübung“ genannten Praktikumsbetriebs erreicht werden. Das veranschaulichte Lernen von Faktenwissen (Prüfabläufen) tritt in dem neuen, jetzt Laborübung genannten Praktikum in den Hintergrund und wird auf das eLearning Angebot verlagert. In der gelockerten Laborübung soll es jetzt darum gehen, die frei gewordene Kapazität zu nutzen, stärker auf den Aufbau von Diskurs-, Handlungs- und Interaktionskompetenzen in den drei Feldern Baustoffherstellung, Baustoffprüfung und -beurteilung zu fokussieren.

Durch die Verringerung der Präsenzzeit (Besuch von nur noch drei Laborübungen anstatt von früher zehn) und die dadurch gewonnene zusätzliche Laborkapazität konnte in der neuen Laborübung die Gruppengröße signifikant reduziert werden. Mit der deutlich kleineren Gruppe kann nun gewährleistet werden, dass Laborversuche von jedem Einzelnen selbstständig durchgeführt werden können. Nur so entsteht echtes „Laborfeeling“ und nur so entsteht bei jedem einzelnen Studierenden Handlungskompetenz. Auch für die „Gruppendynamik“ und das Gemeinschaftsgefühl ist dies sehr wichtig, da in diesen Kleinstgruppen eine lebendige Kommunikation stattfinden kann. Häufig werden in solchen Kleinstgruppen Lerngemeinschaften für die gesamte Studienzeit gegründet.

Beschreibung der Lehrinnovation

Handlungsorientiertes Lernen in kleinen Gruppen, selbstständiges Lösen von Aufgaben und Fallstudien rund um die Materialprüfung und/oder die Herstellung einzelner Werkstoffe sowie eigenständige Strukturierung von Arbeitsabläufen sind einige wichtige Mikrolernziele

der neuen Laborübung. Die Studierenden sollen hier u. a. auch Fallstudien bearbeiten, d. h. von wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern gecoacht könnten sie überprüfen, ob ein Frischbeton die Abnahmekriterien auf der Baustelle erfüllt oder ob Bretter für die Herstellung eines Brettschichtholzträgers für eine Turnhallendecke geeignet sind. Ob diese Lernziele der Laborübung auch erreicht wurden, wird nun über eine gegenüber der bisherigen Prüfungsform (schriftliche Prüfung) lernzielgerechtere Prüfungsmethode beurteilt. Ziel bei der Neukonzeption der Prüfung war, eine im Sinne des Constructive Alignment entsprechende Prüfungsform zu entwickeln, in der nicht Faktenwissen über Versuche im Rahmen der Materialprüfung schriftlich abgefragt wird. Über die neue Prüfungsform sollte beurteilt werden können, ob die Studierenden nach dem Besuch der Veranstaltungen in der Lage sind, selbst handanlegend Materialkennwerte zu bestimmen, diese auszuwerten und deren Bezug zur Praxis zu beurteilen. Wir entwickelten eine „Parcoursprüfung“, in der jeder Studierende eine ausgewählte Station „praktisch“ durchläuft. Bei dieser ausgewählten Station stellt der Studierende entweder Material selbst her oder führt Versuche zur Materialprüfung entweder direkt aus oder gibt, falls der jeweilige Versuch aus versicherungstechnischen Gründen von einem Laboranten durchgeführt werden muss, Arbeitsanweisungen aus. Die so ermittelten Ergebnisse bzw. werkstoffspezifischen Kennwerte sollen die Studierenden in der Parcoursprüfung beurteilen, sie sollen verschiedene Ergebnisse gegeneinander abwägen und vergleichen, sie könnten sogar Versuchsaufbauten analysieren, so dass ihre Prüfungsleistungen auf den Taxonomiestufen Anwenden, Analysieren, Bewerten und Entwickeln einzuordnen sind.

Die Rahmenbedingungen dieser Parcoursprüfung sollten in unverkrampfter Atmosphäre stattfinden. Daher wurde entschieden, die Parcoursprüfung nicht zu benoten, sondern, als Studienleistung eingebracht, lediglich mit „erbracht“ oder mit „nicht erbracht“ zu bewerten. In jeder Prüfung wollen wir so jedem einzelnen Studierenden begegnen, dass es zu einem gegenseitigen Austausch kommt und die Prüfungssituation auch vom Prüfling aktiv mitgestaltet wird. Nur so können unserer Auffassung nach Diskurs-, Handlungs- oder Interaktionskompetenzen erprobt und überprüft werden. Letztendlich sollte die Prüfung eher einem Lerngespräch ähneln, um vor der schriftlichen Klausur, die am Ende des gesamten Moduls geschrieben werden soll, ein „Feedback“ „zum richtigen Zeitpunkt“ zu geben. Die am Ende des 2. Fachsemesters abgelegte schriftliche Klausur ist die einzig benotete Lernzielkontrolle des gesamten Moduls. Die Lehrinnovation bestand im Wesentlichen darin, a) die im praktischen Handeln erreichbaren Taxonomiestufen zu erhöhen und b) eine lernzielgerechte Prüfung der im Rahmen der Laborübung erreichten Diskurs-, Handlungs- oder Interaktionskompetenz zu entwickeln (Parcoursprüfung).

Inwieweit wurden die mit der Lehrinnovation verfolgten Ziele erreicht? Welche Probleme haben dazu geführt, dass Ziele nicht wie geplant erreicht wurden?

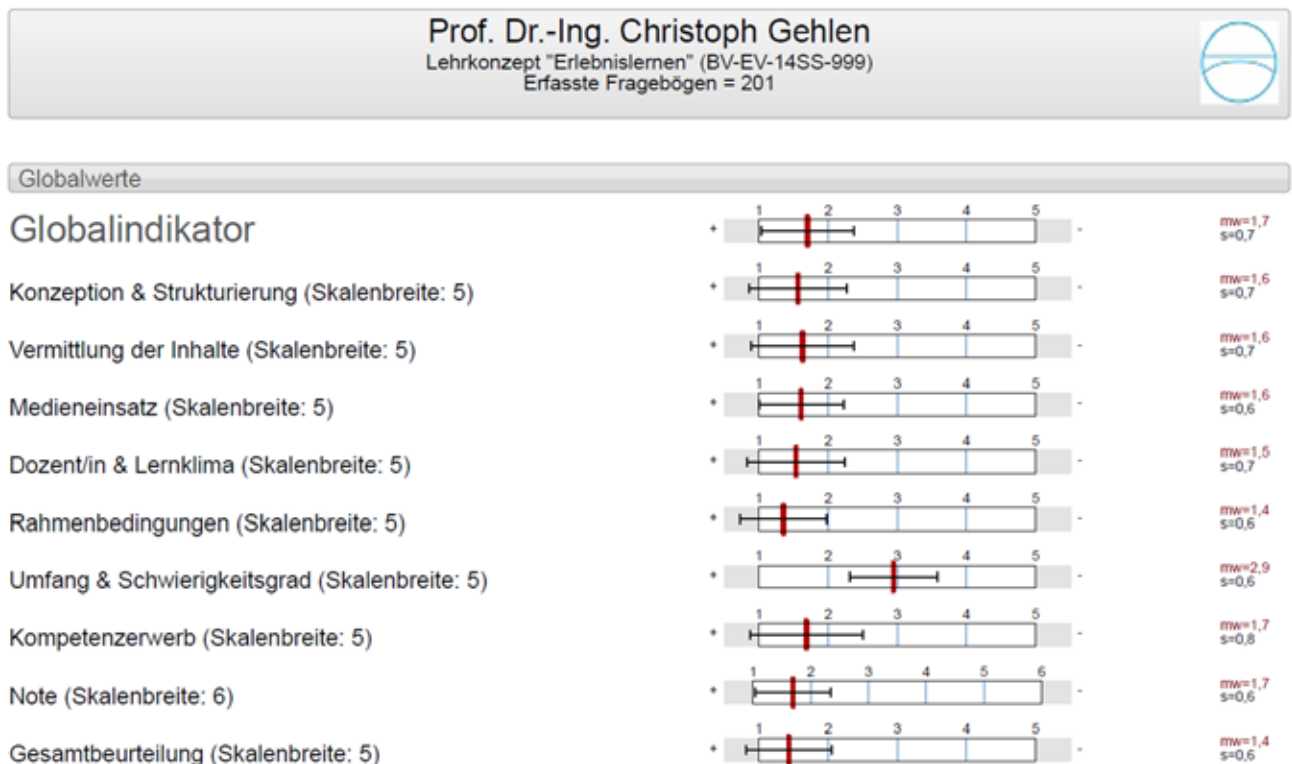
Die Ziele wurden voll erreicht. Das frühere Praktikum wurde erfolgreich entlastet, die in der neuen Laborübung vermittelten Inhalte führten bei den Studierenden zu einer deutlich verbesserten Handlungskompetenz, die in den Parcoursprüfungen anhand von sogenannten Rating-Sheets für uns messbar festgestellt werden konnte. In den Rating-Sheets wurde insbesondere die Vollständigkeit der Handlungsabläufe, die Güte der Durchführung und auch die dafür aufgewandte Zeit bewertet.

Das einzige Problem bestand im Vorfeld der Umstellung eigentlich nur darin, die eigenen Mitarbeiter davon zu überzeugen, dass die Änderung auf ein solches Format, insbesondere die Änderung des Prüfungsformats von Klausur auf Parcoursprüfung in einem Massendstudiengang wie Bauingenieurwesen nicht zu einer unverhältnismäßig höheren Arbeitsbelastung führt. Die befürchtete Zusatzbelastung entfiel, da die Verkleinerung der Gruppengröße durch eine Reduktion von zehn auf drei Laborübungen kompensiert werden konnte, der be-

fürchtete erhöhte Prüfungsaufwand (jeder Studierende wurde ja nun nicht mehr schriftlich, sondern jetzt rund 30 Minuten im Labor geprüft) stellte sich für den einzelnen Mitarbeitenden aus folgendem Grund nicht ein: Durch die gebündelte (mündliche) Prüfung an drei ganzen (Parcoursprüfungs-)tagen wurden alle wissenschaftlichen und nichtwissenschaftlichen Mitarbeitende (rund 40 Mitarbeitende) gleichermaßen und nicht nur einzelne beansprucht. Dadurch stellte sich unter den Mitarbeitenden eine „Happening“-Stimmung ein, so dass die zugegeben an den Prüfungstagen herrschende hohe Arbeitsbelastung nicht als hoch, sondern als eher angenehm positiv, sozusagen als wertgeschätzter Prüfer im Einsatz, in Erinnerung blieb. Für die vorher mit der Ausarbeitung, Aufsicht und Korrektur der Prüfung und die anschließende Betreuung der Einsichtnahme beauftragten wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter stellte sich dadurch sogar eine spürbare Erleichterung ein. Diese Arbeitsschritte entfielen komplett.

Das neue Format, hier also das mit einer lernzielgerechten Prüfung abschließende Format Laborübung wurde mit Hilfe eines in Zusammenarbeit mit den Begleitforschern und der TUM-Hochschulabteilung „ProLehre“ entwickelten Evaluierungsbogen evaluiert. Die TUM weit weitestgehend einheitlichen Evaluierungsfragen zum Format „Praktikum“ wurden an einigen Stellen lediglich ergänzt, um projektspezifische Besonderheiten der Laborübung, insbesondere aber auch das besondere Prüfungsformat, besser analysieren zu können. Das Ergebnis war ein überdurchschnittlich hoher Rücklauf von gut 70 Prozent (201 von 281 geprüften Studenten beantworteten die gestellten Fragen) mit (nicht nur für ein Massenpraktikum) weit überdurchschnittlich guten Noten vgl. hierzu Bild 1. Insbesondere der von den Studenten selbst eingeschätzte Kompetenzerwerb, der sonst durchschnittlich in der Studieneingangsphase eher im bescheidenen Bereich 3 evaluiert wird, sticht mit durchschnittlich 1,7 mit einem Streuband zwischen 1,0 und 2,5 besonders positiv heraus.

Abbildung 1:
Evaluierung Erlebnislernen



Bauwerkserhaltung



Lehrstuhl für Massivbau – Prof. O. Fischer
Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung – Prof. C. Große
Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen – Prof. C. Gehlen

LERNZIELE DER VERTIEFUNG

Nach Abschluss der Vertiefung Bauwerkserhaltung sind die Studierenden in der Lage:

- die aktuellen ZfP-Verfahren der Qualitätssicherung, der Inspektion und Dauerüberwachung von Bauteilen, Anlagen und Bauwerken handzuhaben,
- die Einsatzbereiche und -grenzen der ZfP-Verfahren zu beurteilen und mit wichtigen beispielhaften Anwendungen und Schadensfälle vertraut umzugehen,
- Neubauten mit Blick auf ausgewählte, dauerhaftigkeitseinschränkende Umwelt-einwirkungen zu bemessen sowie für Bauten im Bestand die jeweilig zu erwartende Gebrauchstauglichkeit zu prognostizieren,
- Strategien zur Vermeidung von Schäden abzuleiten, Verfahren zur dauerhaften Behebung von Bauschäden zu beurteilen sowie geeignete Instandsetzungs-konzepte aufzustellen und auszuführen,
- wissenschaftliche Fragestellungen und/oder eigene Untersuchungsergebnisse in einem Vortrag vor Publikum zu präsentieren und Ihre Ergebnisse mit dem Publikum kritisch zu diskutieren.

INHALT DER VERTIEFUNG BAUWERKSERHALTUNG

Pflichtmodul (12 ECTS)

Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (WS) (3 SWS / 4 ECTS)

- Prüfkonzeppte (Signale, Systeme, Filter, Zeitreihen)
- Grundlagen der Schwingungen und Wellen; Wellenausbreitung
- Messtechnik, Sensorik, Signalaufzeichnung und Auswertung
- Ultraschall
- Impakt-Echo
- Infrarot-Thermografie zur Bauwerksanalyse
- Detektion von Bewehrung und Bauteilschäden mit Radar
- Sonstige handgeführte ZfP-Verfahren
- Schwingungsanalyse zur Dauerüberwachung
- Schallemissionsanalyse
- Überwachung von Bauwerken



Grundlagen der Lebensdauerbemessung und Instandhaltung von Massivbauwerken (SS) (3 SWS / 4 ECTS)

- Bemessungs- und Sicherheitskonzepte
- Modellentwicklung, Modellierung von Umwelteinwirkungen
- Prüfung von Materialwiderständen
- Bemessung gegenüber Umwelteinwirkung
- Bauwerksunterhaltung und Monitoring
- Zustandserfassung, Beurteilungsverfahren
- Schutzprinzipien, Instandsetzungsplanung zum Korrosionsschutz
- Ersatz von geschädigtem Beton
- Oberflächenschutzsysteme und Abdichtungen
- Elektrochemische Verfahren
- Behandlung von Rissen und Hohlstellen



Grundlagen der Nachrechnung und Verstärkung von Massivbaukonstruktionen (WS/SS) (3 SWS / 4 ECTS)

- Grundlagen
- ausgewählte Verfahrenstechniken
 - externe Vorspannung
 - Spritzbeton
 - Textilbeton
 - geklebte Bewehrung (Stahl, CFK)
- Bemessungsansätze
 - Biegeverstärkung
 - Querkraftverstärkung
 - Stützenverstärkung
- Ausführung, aktuelle Entwicklungen und Forschung



Wahlmodule

Beurteilung und Erhaltung historischer Stahlkonstruktionen (SS) (2 SWS / 3 ECTS)

- Entwicklung der Lastannahmen und Normen
- Alte Stähle, Nieten
- Konstruktionsprinzipien, historische Bemessung genieteter Tragwerke
- Ermüdungsverhalten genieteter Stahlkonstruktionen
- Entwicklung Schweißtechnik und historische Schweißkonstruktionen
- Korrosionsschutz: historischer Überblick, Sanierung, aktuelle Beschichtungssysteme
- Historische Lagerkonstruktionen
- Nachrechnung historischer Konstruktionen auf Basis aktueller Normen
- Sanierung genieteter und geschweißter Stahlkonstruktionen
- Projektarbeit: Nachrechnung einer historischen Eisenbahnbrücke



Assessment and Retrofitting of Existing Timber Structures (SS) (3 SWS / 4 ECTS)

- Material properties assessment (wood species)
- In-situ properties determination and grading
- Biological and physical degradation assessment
- (International) Standards and guidelines for assessment for wood structures
- In-situ test methods
- Traditional timber joints
- Repair techniques for sawn timber and glued laminated timber
- Strengthening techniques



Bauwerksanalyse und Exkursionen Instandsetzung (WS) (2 SWS / 3 ECTS)

- Visuelle Schadenserkennung an Bauwerken
- Einsatzmöglichkeiten zerstörender und zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden
- Einsatz von Prüfgeräten in der praktischen Anwendung am Bauwerk
- Gezielte Schadensdarstellung
- Erkennung der Schadensursachen und -mechanismen sowie der jeweils anzuwendenden Untersuchungsmethoden
- Besuch laufender Instandsetzungsbaustellen und von Bauwerken mit erfolgter Instandsetzung
- Einführung in die Instandsetzungsplanung
- Darlegung normativer Randbedingungen und Vorgaben
- Erläuterung der baupraktischen Umsetzung von Instandsetzungsplanungen an Beispielen
- Vorstellung von fehlerhaften Instandsetzungen an Beispielen



Bruchmechanik und Ermüdung (SS) (2 SWS / 3 ECTS)

- Ermüdungslasten und Lastkollektive
- Ermüdungsversuche: Durchführung und Auswertung
- Bruchmechanik (LEBM, EPBM)
- Qualitätskontrolle
- Nachbehandlung von Schweißnähten
- Restnutzungsdauer von Brücken
- Ermüdungskonzepte und Anwendung gemäß Eurocode3 und Eurocode9



Rechtliche Aspekte in der Bauwerkserhaltung (WS) (1 SWS / 2 ECTS)

- Praxisrelevante, gesetzliche Vorschriften für die Bauwerkserhaltung aus dem
- Öffentlichen Baurecht
- Wohnmietrecht
- WEG-Recht
- Privaten Baurecht
- Architekten- und Ingenieurrecht



Weitere Wahlfächer (SWS / ECTS)

- Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (WS) (3 / 4)
- Grundlagen der Lebensdauerbemessung und Instandhaltung von Massivbauwerken (SS) (3 / 4)
- Grundlagen der Nachrechnung und Verstärkung von Massivbaukonstruktionen (WS/SS) (3 / 4)
- Seminar zerstörungsfreie Prüfung (WS) (2 / 3)
- Seminar Bauwerkserhaltung (WS/SS) (2 / 3)
- Workshop Baustoffherstellende Industrien (SS) (1 / 2)





LERNZIELE DER VERTIEFUNG

Nach Abschluss der Vertiefung Werkstoffe sind die Studierenden in der Lage:

- Anforderungen an unterschiedliche Werkstoffe zu identifizieren und zu definieren,
- Werkstoffe anwendungsgerecht auszuwählen,
- Werkstoffeigenschaften durch die Rohstoffauswahl und die Prozesstechnik zu verändern,
- Baustoffe und Bauteile zu bewerten bzw. anforderungsgerecht zu konzipieren sowie ggf. zu entwickeln,
- durch Anwendung geeigneter Prüfverfahren die angestrebten Eigenschaften des Baustoffes zu verifizieren,
- Baustoffe, Baustoffgemische sowie Bauweisen technisch, ökologisch und ökonomisch während der gesamten Nutzungszeit zu bewerten,
- für besondere Konstruktionen und Anwendungsfälle einen geeigneten Beton auszuwählen und Mängeln sowie Schäden durch sachgerechte Planung und Ausführung entgegenzuwirken,
- wissenschaftliche Fragestellungen und/oder eigene Untersuchungsergebnisse in einem Vortrag vor Publikum zu präsentieren und Ihre Ergebnisse mit dem Publikum kritisch zu diskutieren.

Lehrstuhl für Bauchemie – Prof. J. Plank
Fachgebiet für Gesteinshüttenkunde – Prof. D. Heinz
Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen – Prof. C. Gehlen



INHALT DER VERTIEFUNG WERKSTOFFE

Pflichtmodul (12 ECTS)

Zusatzmittel und Spezialbetone (WS) (5 SWS / 7 ECTS)

Zusatzmittel

- Chemie und Wirkungsweise von heute unverzichtbaren Betonadditiven, wie zum Beispiel:
 - Verflüssiger
 - Fließmittel
 - Verzögerer
 - Beschleuniger
 - Retentionsmittel
 - Stabilisatoren
 - Luftporenbildner

Spezialbetone

- Leichtbeton
- Selbstverdichtender Beton
- Sichtbeton
- Spritzbeton und Faserbeton
- Massenbeton
- Ultrahochfester Beton (UHPC)
- Sonderbetonverfahren
- Nachbehandlungsmethoden
- High Durable Concretes
- Dauerhaftigkeitsaspekte (Frost)



Mineralische Werkstoffe (WS/SS) (4 SWS / 5 ECTS)

Werkstofftechnik und Werkstoffwissenschaft der wichtigsten mineralischen Bau-Werkstoffe:

Mineralische Bindemittel (WS)

- Bindemittel – Zement, Kalk, Gips

- Rohstoffe – Eignung und Verfügbarkeit
- Verfahrenstechnik vom Rohstoff zum anwendungsgerechten Produkt
- Bautechnische Eigenschaften der Werkstoffe
- Ökologische und arbeitshygienische Aspekte
- Analyse- und Prüfverfahren

Keramik und Glas (SS)

- Keramik – Ziegelprodukte, Blähton, etc.
- Glas – Tafelglas, Glasfasern, Blähglas, etc.

- Rohstoffe – Eignung und Verfügbarkeit
- Verfahrenstechnik: vom Rohstoff zum anwendungsgerechten Produkt
- Bautechnische Eigenschaften der Werkstoffe
- Ökologische und arbeitshygienische Aspekte
- Analyse- und Prüfverfahren



Wahlmodule

Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit von Baustoffen (WS) (2 SWS / 3 ECTS)

- Einführung Nachhaltigkeit und Ökologie
- Lebenszyklus Baustoffe/ Bauwerke
- Inhaltliche und methodische Grundlagen von Ökobilanzen
- Umweltwirkungen Zementproduktion
- Umweltwirkungen Bitumen, Asphalt und Teer
- Bewertung der Umweltverträglichkeit von Baustoffen
- Baustoffrecycling
- Strategien für reduzierte negative Umweltwirkungen der Betonproduktion



Praktikum Analytik und Prüftechnik (SS) (2 SWS / 3 ECTS)

- Bestimmung von Porosität, Oberfläche und Korngrößenverteilung
- Chemische Analytik
- Säurewiderstand von Beton
- Mikroskopie
- Röntgendiffraktometrie
- Thermoanalyse/Kalorimetrie
- Porenlösungsuntersuchungen
- Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton
- Lasergranulometrie und Luftstrahlsiebung



Anwendungsgerechte Optimierung mineralischer Baustoffe (SS) (2 SWS / 3 ECTS)

- Betonzusatzstoffe
- Kombinierte Bindemittel
- Schnell- und Quellschäume
- Sonderzemente
- Betone mit nachwachsenden Rohstoffen
- Multifunktionale Baustoffe (Bionik)
- Bindemittel mit hohem Sulfatwiderstand
- Bindemittel zur Vorbeugung von AKR



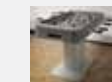
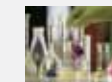
Straßenbaustoffe (WS) (2 SWS / 3 ECTS)

- Hydraulisch gebundene Tragschichten
- Straßenbeton
- Straßenbetonpraktikum
- Bitumen
- Asphalt / Praktikum Asphalt



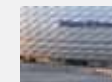
Seminar Baustoffe (SS) (2 SWS / 3 ECTS)

- Erarbeitung (min. 20 Seiten) und Präsentation (rd. 20 min) eines aktuellen Themas aus der Bauforschung Aktuelle Themen finden Sie auf unserer Homepage: www.cbm.bgu.tum.de
- Kleine experimentelle Untersuchungen und/oder Literaturrecherchen
- Arbeitsaufwand: max. 90 h / Laufzeit: rd. 2 Monate



Weitere Wahlfächer (SWS / ECTS)

- Spezialbetone (WS) (3 / 4)
- Zusatzmittel (WS) (2 / 3)
- Mineralische Bindemittel (WS) (2 / 3)
- Keramik und Glas (SS) (2 / 3)
- Workshop Baustoffherstellende Industrien (SS) (1 / 2)



4.1.2. Neue Vertiefer Bauwerkserhaltung und Werkstoffe

Abbildungen auf vorhergehenden Seiten: Darstellung des Masterstudiengangs Bauingenieurwesen mit den Inhalten über Bauwerkserhaltung (Seite 15) und Werkstoffe (Seite 16).

4.2. Diplom- und Masterarbeiten

AG Bindemittel und Zusatzstoffe

4.2.1. Hydratationsmechanismen von Gips-Zement-Puzzolan- Bindemitteln mit Spezialzementen

Masterarbeit von Natalia Rachmatulin

Betreuender: Ying Wang, M.Sc.

Die Verwendung des Nebenproduktes REA-Gips aus Kohlekraftwerken als Baustoff kann nicht nur die CO₂-Bilanz verbessern, sondern hat auch einen ökonomischen Vorteil. Aufgrund der Wasserlöslichkeit von Gips ist der Einsatz im Baubereich bislang jedoch nur auf den Innenbereich begrenzt. Die Zugabe von Zement und Puzzolanen ermöglicht es aber, die Wasserbeständigkeit der auf Gips basierten Bindemittelmischungen zu verbessern. Um die Dauerhaftigkeit solcher Bindemittelsysteme zu gewährleisten, soll vor allem eine spätere Ettringitbildung als Schadmechanismus verhindert werden.

Ziel der Arbeit war es, neben einer Literaturrecherche, den Einfluss der Spezialzemente auf den Hydratationsverlauf der Gips-Zement-Puzzolan-Bindemittel mit verschiedenen Labormethoden zu untersuchen. Dabei wurden zwei Spezialzemente, Calciumsulfoaluminat-Zement und Schnellzement mit Dodekacalciumheptaaluminat („C₁₂A₇“) eingesetzt. Pastenprismen (40 × 40 × 160 mm³) wurden mit ausgesuchten Rezepturen hergestellt. Alle Proben enthalten 50 M.-% α-Halbhydrat, 15 M.-% Spezialzement und 35 M.-% Puzzolane. Als Puzzolan wurde vor allem eine der DIN EN 450 entsprechende Steinkohlenflugasche verwendet. Nach der Herstellung wurden die Prismen unter Wasser bei 20°C und 8°C bis zu 90 Tagen gelagert. Die Massen- und Längenänderung sowie die Festigkeit und Resonanzfrequenz wurden nach bestimmten Lagerungsdauern ermittelt. Die frühe Hydratation wurde mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) und Wärmeflusskalorimetrie analysiert. Anschließend wurden die Hydratationsprodukte und das Gefüge unter Verwendung von XRD sowie Hg-Druck-Porosimetrie charakterisiert.

Die Ergebnisse zeigten, dass während der Wasserlagerung die GZP-Prismen mit Calciumsulfoaluminat-Zement eine wesentlich kleinere Dehnung als die Prismen mit Schnellzement zeigten. Bereits nach 28 Tagen Wasserlagerung wiesen die Prismen mit Schnellzement eine Rissbildung auf. Mit einem geringfügigen Ersatz von Flugasche durch Mikrosilica wurde die Dehnung deutlich vermindert. Eine deutliche Korrelation zwischen Ettringitmenge und Dehnung konnte durch die vorhandenen XRD-Ergebnisse nicht festgestellt werden.

4.2.2. Bestimmung der Eindringtiefe alkalihaltiger Flugverkehrsflächenenteiser in Zementstein

Masterarbeit von Christian Tauscher

Betreuender: Kai Fischer, M.Sc.

Auf Flugbetriebsflächen werden Enteisungsmittel auf der Basis von Alkaliformiaten- und

-acetaten verwendet, da aufgrund der Vermeidung von Korrosionsschäden an Luftfahrzeugen und flughafentechnischen Anlagen keine chloridhaltigen Substanzen eingesetzt werden dürfen.

In der Praxis hat der Einsatz dieser Enteisungsmittel nachweislich zu Schäden auf Flugbetriebsflächen aus Beton infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) geführt. Zum gegenwärtigen Kenntnisstand ist das Eindringverhalten der AKR-forcierenden alkalihaltigen Enteisungsmittel in x_1 -Beton- und x_2 -Zementsteingefüge sowie die Bestimmung deren Eindringtiefe, noch weitestgehend unerforscht.

Daher sollte in dieser Arbeit das Eindringen alkalihaltiger Flugflächenenteiser in Zementstein charakterisiert werden. Hierfür wurde 7 und 28 Tage alter Zementstein in PE-Flaschen für eine Dauer von 7, 14 und 28 Tagen mit aufliegenden Natriumformiat-Lösungen (Enteisungsmittel) beansprucht. Die geeigneten Lösungskonzentrationen, die Dauer der Lösungsbeaufschlagung und eine zielführende Vorbehandlung (Trocknung und Feuchtlagerung) der Zementsteinproben wurden auf der Basis von Literaturdaten sowie in Vorversuchen an Zementsteinwürfeln bestimmt. Zur Charakterisierung der Lösungsmigration und daran gebundene Veränderungen in der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung in den Zementsteinproben wurden folgende Untersuchungsmethoden angewandt: ICP-OES, UV-VIS-Spektroskopie, XRD, FT-IR-Spektroskopie, TOC und Laserablation mit nachgeschalteter ICP-MS zur orts aufgelösten Elementanalyse.

Die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Das Eindringen von Natriumformiat in Zementstein kann qualitativ festgestellt werden. Ein quantitativer Nachweis der Eindringtiefe konnte mit dem Versuchsprogramm nicht erreicht werden.
- Je länger die Hydratationsdauer des Zementsteins bis zur Lösungsbeaufschlagung ist, desto langsamer verläuft das Eindringen des Natriumformiates.
- In Übereinstimmung mit Literaturdaten konnte bestätigt werden, dass die Natriumformiat-Lösungen die Stabilität von Ettringit im Zementstein verringert.
- Bei identischer Hydratationsdauer des Zementsteins wurde qualitativ eine geringere Eindringtiefe mit zunehmender Lösungskonzentration festgestellt.

Die Untersuchungen der Arbeit liefern damit einen Grundstein für eine weitere Forschung auf dem Themengebiet des Eindringens von Flugverkehrsflächenenteisern in Beton.

4.2.3. Untersuchung des Einflusses von NaCl auf Betone hinsichtlich einer Alkali-Kieselsäure Reaktion

Masterarbeit von Ulrike Worm

Betreuender: Kai Fischer, M.Sc.

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden an Betonfahrbahndecken von Bundesautobahnen wiederholt Schadensfälle durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) festgestellt. Als wesentliche Einflussgröße wird, neben der dynamischen Belastung durch den Verkehr, der Eintrag von NaCl aus Tausalz in den Beton angesehen. Eine verstärkte AKR durch NaCl-Eintrag in Beton wurde bereits von zahlreichen Autoren in beschleunigten Versuchen unter erhöhten Temperaturen im Labor nachgewiesen.

In der vorliegenden Arbeit lag der Fokus deshalb auf einer Wirkung von NaCl unter praxisnahen Temperaturbedingungen. Dieser Einfluss wurde an Betonen mit reaktiven und

schlechtreaktiven Gesteinskörnungen (Borosilikatglas, Grauwacke, Granit und Diabas) untersucht. Zusätzlich wurde die Wirkung eines Zementaustauschs durch Flugasche und Metakaolin bei gleichartigen Beanspruchungen betrachtet.

Feinbetonprismen ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) wurden nach 91-tägiger Vorlagerung über Wasser für 56 Tage bei 20°C in Lagerungslösungen gegeben, deren Zusammensetzung den Porenlösungen der verwendeten Bindemittel, nach einer Hydratationsdauer von 91 Tagen, entspricht. Dadurch wurde eine permanente Aufrechterhaltung der Alkalitäten in den Proben gewährleistet. Außerdem wurden weitere Betonprismen in gleichartige Lagerungslösungen gegeben, die zusätzlich 20 M.-% NaCl enthielten. Die Lösungslagerung erfolgte in luftdicht verschlossenen Behältnissen bei regelmäßiger Überprüfung der pH-Werte. An festgelegten Zeitpunkten wurden Längen- und Resonanzfrequenzmessungen (zur Bestimmung des dynamischen E-Moduls) durchgeführt und Porenlösungszusammensetzungen sowie die Porositäten der Betone untersucht. Ergänzend wurden Polarisationsmikroskopie und REM-EDX durchgeführt. Nach der 56-tägigen Beanspruchung der Betone in den Lagerungslösungen traten ausschließlich in den Proben mit Borosilikatglas Anzeichen für eine AKR auf. Längenänderungen, Veränderungen des dynamischen E-Moduls sowie eine makro- und mikroskopische Charakterisierung (Abb.1) der Betongefüge lassen Interpretationen zum Ausmaß der AKR zu. Daraus lässt sich bei NaCl-Beaufschlagung eine intensivere Schädigung des Betons ohne Flugasche nachweisen. Dies kann anhand des Abfalls des dynamischen E-Moduls sowie durch das makro- und mikroskopische Rissbild festgestellt werden. Die flugaschehaltigen Betone zeigen generell geringere Schädigungen, die sich vor allem in geringeren Längenänderungen und einer geringeren, mikroskopisch erfassbaren, Rissmenge und -breite ausdrücken.

Die Beanspruchung von Betonen in künstlichen Porenlösungen ohne und mit NaCl bei 20°C zeigt, dass der Zusatz von NaCl eine AKR auch bei diesem Temperaturniveau verstärkt. Jedoch konnte dies bei den bisher realisierten Lagerungsdauern von 56 Tagen lediglich für Beton mit sehr reaktivem, synthetischem Borosilikatglas nachgewiesen werden. Ein vermutetes, vergleichbares Verhalten von Betonen mit den natürlichen potentiell reaktiven Gesteinskörnungen (Grauwacke und Granit) soll durch eine weiterlaufende Beanspruchung der entsprechenden Proben über mehrere Jahre nachgewiesen werden. Der teilweise Austausch von Zement durch Flugasche und Metakaolin erhöhte erwartungsgemäß den Widerstand gegenüber einer AKR auch bei dem hier beschriebenen Beanspruchungsszenario.

AG Stahl und Korrosion

4.2.4. Auswertung und Bewertung von Inspektionsdaten an Verkehrswasserbauwerken

Masterarbeit von Philip Looock, M.Sc.

Betreuender: Dipl.-Ing. Amir Rahimi

Mit der Aus- und Bewertung von Inspektionsdaten an Verkehrswasserbauwerken kann der IST-Zustand betroffener Bauwerke wiedergegeben werden. Deskriptive Vorgaben und tatsächliche, umwelt- und nutzungsbedingte Einwirkungen führen selbst bei angemessenem Instandhaltungsaufwand zur Notwendigkeit organisierter und belastbarer Inspektionen. Hierdurch soll die Dauerhaftigkeit, die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit für eine betreiberorientierte Nutzung prognostiziert werden.

Die Auswertung der Inspektionsdaten an Verkehrswasserbauwerken stellt unterschiedliche Schädigungstrends dar, die durch ausgewählte Gutachten der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) weitestgehend verifiziert werden. Dennoch zeigt sich, dass eine ausschließlich visuelle Inspektion den Schädigungsverlauf nur unzureichend berücksichtigt. Um die Belastbarkeit zukünftiger Prognosen zu erhöhen, erscheint es deshalb unbedingt sinnvoll, die derzeitigen Inspektionsprogramme durch zusätzliche Bemessungsmodelle und standortabhängige materialtechnische Laborprüfungen zu erweitern. Die Erstellung dieser Masterarbeit wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) gefördert.

Zustand und Objektanzahl - sortiert nach aufsteigender Objektanzahl

Legend: ■ Zustandsbewertung ■ Objektgruppenanzahl

Objektgruppen	Zustandsbewertung (Blue Bar)	Objektgruppenanzahl (Red Bar)
versetzt, inform	1	1
Pumpenspeicheranlagen	1	1
Deiche, Jähle, Lärmschuttwälle	1	1
Brücke, Lokomotivbrücken	1	1
Bewässerungsanlagen	1	1
Schiffahrtskanäle	1	1
Uferdeichwerke, Dämme	1	1
Bodenschuttungen	2	2
Anlagen für die Entwässerung	2	2
Leuchtturmanlagen	2	2
Talsperrenanlagen	2	2
Kreuzschiffe	2	2
Funkfeuerwerke	2	2
Hilfsanlagen	2	2
Schiffbauanlagen	2	2
Raketenabfeuerwerke	2	2
Anlagen für die Entwässerung	2	2
Sperrbauwerke	2	2
Lagerhallen, Schutzhäuser	2	2
Fernwärmekraftwerke	2	2
Standbauwerke	2	2
Auflagebauten	2	2
Rohrleitungsanlagen	2	2
Einzelbauwerke	2	2
Lagerstätten und Anlagen	2	2
Umschlaganlagen	2	2
Einzelbauwerke	2	2
Hochwassersperren	2	2
Einzelbauwerke	2	2
Mauerbauwerke	2	2
Parallelbauwerke	2	2
Bauwerke, Lagerstätten	2	2
Sicherheitsanlagen	2	2
Landbauwerke	2	2
Kanalarbeiten	2	2
Speicheranlagen	2	2
Lagerstätten	2	2
Bodenschuttungen	2	2
Flussbauwerke	2	2
Uferbauwerke	2	2
Leuchtturmanlagen	2	2
Schiffbauwerke	2	2
Dämme	2	2

Masterarbeit von Philipp Tamm, M.Sc.
Betreuender: Dipl.- Ing. Amir Rahimi

Dieses Konzept, welches auf der Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten beruht, soll die wirtschaftliche Lebensdauerbemessung für sachkundige Planer verbessern. Als weitere

Vereinfachung wird in der vorliegenden Arbeit das Bemessungskonzept in Bemessungsnomogramme überführt. Diese Nomogramme entstehen für die Expositionsklassen XS2 und XS3 und für zwei verschiedene anzustrebende Zuverlässigkeiten.

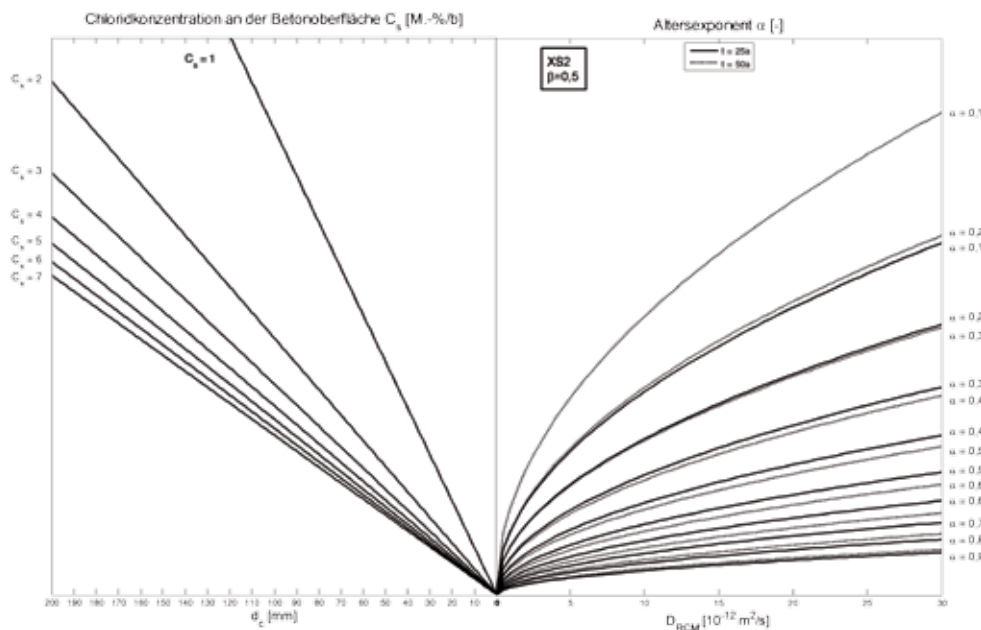


Abbildung:
Masterarbeit Philip Tamm

4.2.6. Prognose der Restnutzungsdauer von instandgesetzten Betonbauteilen unter Chlorideinwirkung

Masterarbeit von Dimitar Kostadinov, M.Sc
Betreuender: Dipl.- Ing. Amir Rahimi

Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion ist ein maßgebender Aspekt bei der Dauerhaftigkeit sowie Tragfähigkeit von Betonbauwerken. Eine traditionelle und bewährte Reparaturmaßnahme ist ein Teil des Bauteilbetons durch einen neuen Reparaturmörtel oder -beton zu ersetzen. Ziel dieses Verfahrens ist die vorhandene Passivität der Bewehrung über die Restnutzungsdauer zu erhalten bzw. die Passivität der Bewehrung wiederherzustellen. Zur Verfolgung und Abbildung des Chlorid-Transports ist ein 2-Schicht-System zu betrachten, dass aus einer alten Betonschicht und einer neuen Reparaturschicht besteht. Die Restnutzungsdauer des Bauteils hängt einerseits vom Chlorideindringverhalten der beiden Schichten und andererseits von ggf. in der Altbeton-Schicht vorhandenen (Rest-) Chloriden ab. Eine wissenschaftlich hinterlegte Prognose der Restnutzungsdauer nach der Instandsetzung ist derzeit nicht möglich, da die notwendigen Modelle aufgrund mangelnder Kenntnis über den Chlorid-Transport und die -Umverteilung in so einem 2-Schicht-System fehlen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Möglichkeit einer mathematischen Beschreibung der Chloridumverteilung in einem 2-Schicht-System untersucht. Für den Fall, dass die Reparaturschicht und die verbleibende Betonschicht gleichen Chloriddiffusionswiderstand aufweisen und unter Annahme, dass das Restchloridprofil dem Ficksch'en Diffusionsgesetz folgt, kann das Chlorid-Transport durch folgendes Faltungsintegral beschrieben werden:

Abbildung:
Masterarbeit Dimitar Kostadinov

$$C(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D \cdot t}} \int_x^\infty e^{-\frac{(x-y)^2}{4D \cdot t}} \cdot C_{s,0} \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{\sqrt{4D \cdot t}}\right) dy$$

Das Integral bietet keine Lösung in einer geschlossenen Form, d. h., das Integral kann nicht in einer endlichen Zahl von bekannten Funktionen ausgedrückt werden. Unter zu Hilfenahme von mathematischen Programmen (MAXIMA) wurde eine approximierte Lösung dieses Integrals herausgearbeitet. Mit dieser mathematischen Funktion wurden probabilistische Berechnungen (mit dem Programm COMSOL Multiphysics® software) zur Einschätzung der Restnutzungsdauer von Betonbauwerken nach einer Instandsetzungsmaßnahme durchgeführt.

AG Chemie

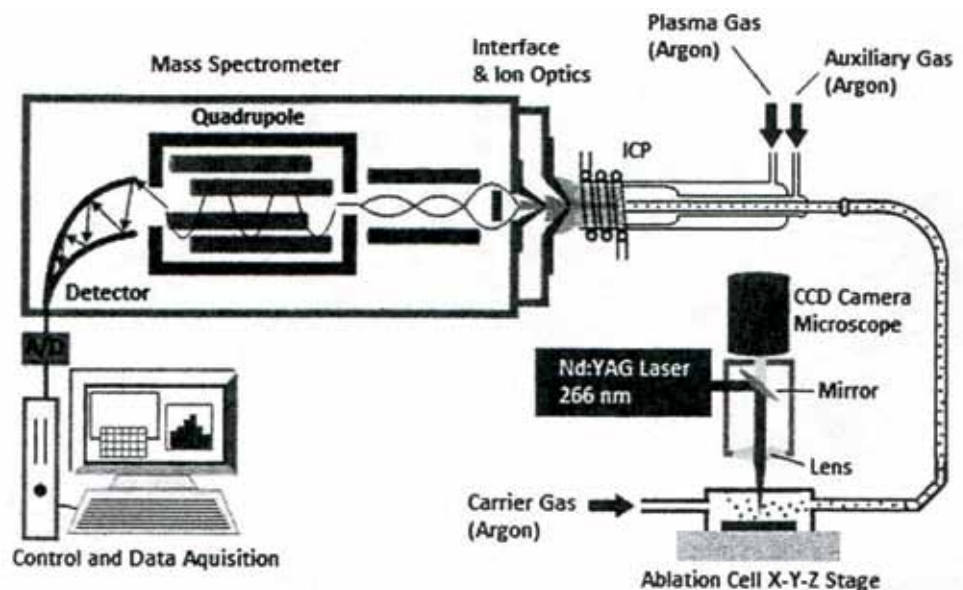
4.2.7. Laserablation-ICP-MS an säuregelagerten Zementsteinproben

Masterarbeit von B. Eng. Moritz Rommel

Betreuender: Tobias Gutberlet, M.Sc. und Dr. rer. nat. Harald Hilbig

Die Anwendung der LA-ICP-MS (Laser Ablation - Inductively-Coupled Plasma – Mass Spectrometry) Analyse an Feststoffproben ist im Bereich der Baustoffforschung eine relativ neue Untersuchungsmethode. Der schematische Aufbau einer LA-ICP-MS, wie er in Abbildung 1 dargestellt ist, zeigt die Systemkomponenten ganz allgemein. Das am Centrum für Baustoffe und Materialprüfung vorhandene System besteht aus einem Nd:YAG Laser mit einer Wellenlänge von 213 nm und einer Pulsdauer im Bereich von 3 bis 5 Nanosekunden (NWR213 der Firma New Wave), sowie aus einem Massenspektrometer NexION™ 300d, der Firma Perkin Elmer.

Abbildung 1:
Schematischer Aufbau einer
Laserablations-ICP-MS Anlage
[28]



In der Ablationszelle der Lasereinheit trifft ein gerichteter Laserpuls auf die Feststoffoberfläche einer Probe. Die Materie wird örtlich scharf begrenzt von dem Laserpuls verdampft. Es entsteht ein Feststoffaerosol, das Partikel unterschiedlicher Größe enthält. Ein in die Ablationszelle eingeleitetes Trägergas (Helium) transportiert die Partikel in das Argon Plasma des ICP-MS. Dort werden die Partikel verdampft, atomisiert und anschließend teilweise ionisiert. Der Detektor des Massenspektrometers zählt mit einem diskreten Satz von Dynoden die gewählten Isotope. An einem Rechner werden die Intensitäten der Isotope als Signalverläufe über der Zeit (bzw. Messstrecke) dargestellt.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur näheren Untersuchung der korrodierten Schicht beim Säureangriff auf Beton ergab sich die Frage, mit welcher Messmethodik der LA-ICP-MS-Analyse und welcher Darstellungsform die Veränderungen der Elementzusammensetzung über den Querschnitt von säuregelagerten Zementsteinproben auf geeignete Weise dargestellt werden können. Für die Untersuchung wurden 3 Mischungen basierend auf einem CEM I 42,5 R verwendet (reine Portlandzementprobe als Referenz (PZ100), eine mit 10 M.-% Metakaolin (MK10), eine mit 35 M.-% Hüttensand (HS35)). Diese Proben wurden in verschiedenen Säuren bei unterschiedlichen pH-Werten gelagert. Abbildung 2 zeigt exemplarisch den Querschnitt einer in Schwefelsäure (pH 3) gelagerten, hüttensandhaltigen Probe (HS35).



Abbildung 2:
Aufnahme mit dem Auflichtmikroskop: HS35S3, eingebettet in Epoxidharz.

Die Entwicklung der Messmethode hatte zum Ziel, eine repräsentative und möglichst orts aufgelöste Wiedergabe der Probenquerschnitte zu ermöglichen. Hierzu wurde unter Durchführung von Vorversuchen ein Linienraster entworfen und entsprechende Einstellungen, sowohl am Lasersystem als auch am Massenspektrometer, gewählt. Um die mit der Messmethodik generierten Daten von Isotopenverteilungen bildhaft darzustellen zu können, erfolgte die Einarbeitung in eine zu diesem Zwecke dienliche Software (Iolite). Abbildung 3 zeigt exemplarisch die mit Iolite generierte bildhafte Darstellung der S-34 Intensitäten über den Probenquerschnitt von drei unterschiedlichen Proben, die in Schwefelsäure bei pH 4 gelagert wurden.

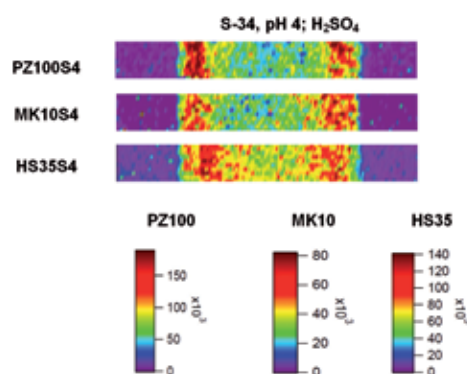


Abbildung 3:
Vergleich von S-34-Intensitäten über den Querschnitt der PZ-, MK- und HS-Probe nach Schwefelsäurelagerung bei pH4.

Schwerpunktmäßig wurde versucht, bei der Interpretation der Ergebnisse Einflüsse auf die gemessenen Intensitäten, welche aus den unterschiedlichen Probenstrukturen und Zusammensetzungen, als auch aus der Messmethodik selbst resultieren können, herauszuarbeiten. Unterstützend wurden hierzu Konfokalmikroskopaufnahmen der Ablationsprofile und Ergebnisse aus Lithiummetaborat-Schmelzaufschlüssen herangezogen. Hierbei wurde deutlich, dass qualitative Vergleiche der Probenzusammensetzung in den meisten Fällen, ohne erfolgreiche Quantifizierung, nur eingeschränkt möglich sind. Für die Interpretation müssen die wesentlichen Faktoren wie der Volumenabtrag, die Probendichte und die Sensitivität des Messsystems berücksichtigt werden. Dennoch zeigen die erzeugten Bilder der

Isotopenverteilungen, dass mit dieser Methode charakteristische Unterschiede beim Angriff von Säuren auf die verschiedenen Zementsteine bei unterschiedlichen pH-Werten darstellbar sind. Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass die Portlandzementsteinprobe mit dem größten Calciumanteil beim Schwefelsäureangriff zunächst weniger von Schwefel durchdrungen wird, was dazu führt, dass die Probe im Laufe des Angriffes einem geringeren Querschnittsverlust unterliegt als die Metakaolin- und Hüttensandprobe.

AG Zerstörungsfreie Prüfung

4.2.8. Radar zur zerstörungsfreien Detektion von Bewehrung in Beton

Masterarbeit von Anna Margareta Bär

Betreuender: Fabian Malm, M.Sc.

Die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) erlangt einen immer höheren Stellenwert als Hilfsmittel zur Inspektion und Überwachung von Bauteilen. Eines der neueren Verfahren der ZfP ist die Anwendung des Georadar (GPR) zur Detektion von Einbauteilen in Beton. Für die Messung im Reflektionsverfahren sind bereits einige Messgeräte und Auswertungsprogramme erhältlich. Nach einem Überblick über die Funktionen der beiden Auswertungsprogramme ReflexW und RADAN7 wird in dieser Masterarbeit der Nutzen einer computergestützten Bearbeitung der Messdaten untersucht. Hierzu werden die Ergebnisse beider Programme geprüft und verglichen, indem identische Sequenzen von Messdaten ausgewertet werden. Als Testobjekte dienen bewehrte Probekörper mit definierter Lage der Armierung und zusätzlichen Einbauten. Im Zuge der Messung und Auswertung wurden Grenzen des Radarverfahrens gesucht und zudem auf Fehlerquellen geachtet.

Die Detektion von Bewehrung in Beton mittels Radar hat sich unter den definierten Bedingungen als praktikabel erwiesen. Des Weiteren kann eine nachträgliche, computergestützte Bearbeitung der Messdaten die Ergebnisse deutlich verbessern. Ebenso können mithilfe der Auswertungsprogramme große Datenmengen zügig bearbeitet und die Ergebnisse anschaulich dargestellt werden. Hierbei spielt jedoch die Qualifikation und Erfahrung des Prüfers eine wichtige Rolle.

Grenzen in der Anwendung zeigen sich beispielsweise in der geometrischen Struktur sowie den Materialeigenschaften des Messkörpers. Auch die Zugänglichkeit der Messfläche setzt in der Praxis oft Grenzen. Dennoch ist die Radarmessung eine nützliche Methode zur Analyse des Bewehrungsverlaufs in Beton.

4.2.9 Quantitative Impact- und Porositätscharakterisierung an CFK-Werkstoffen mittels zerstörungsfreier Prüfmethoden

Masterarbeit von Jan-Carl Grager

Betreuender: Dipl.-Geophys. Robin Groschup

Die in Zusammenarbeit mit der Firma Airbus entstandenen Masterarbeit von Jan Carl Grager untersucht das Potenzial verschiedener zerstörungsfreier Prüfverfahren (Ultraschall in Tauchtechnik, luftgekoppelter Ultraschall, Ultraschall-Phased-Array, optisch angeregte Lockin-Thermografie (OLT), Ultraschall Burst-Phasen-Thermografie (UBP), Phasenkontraströntgen und Computertomografie) zur quantitativen Schadensanalyse von CFK-Impactschädigungen. Außerdem wird mittels Computertomografie (CT) und Materialografie der Porositätsgrad von CFK-Werkstoffen ermittelt.

Die theoretischen Grundlagen der verwendeten zerstörungsfreien Prüfverfahren werden behandelt. Es wird die Anfälligkeit von CFK-Strukturen gegenüber Impactschäden sowie deren charakteristisches, kegelförmiges Schadensbild erörtert. Zudem erfolgt eine Betrachtung von Ursachen und Auswirkungen von Porosität in CFK-Werkstoffen. Ein Überblick über zerstörende und zerstörungsfreie Prüftechniken zur Bestimmung des Porositätsgrades wird geboten.

Es werden Impactversuche an CFK-Materialien aus der Luftfahrt- und Automobilindustrie bei verschiedenen Impactenergien durchgeführt. Im Anschluss erfolgen Referenzmessungen mit dem Ultraschall-Doppeltransmissionsverfahren in Tauchtechnik mit einem punktfokussierten 10-MHz-Prüfkopf. Die Schadensflächen werden mit dem „-6-dB-Schwellwertverfahren“ bestimmt und dienen als Vergleichswerte für andere zerstörungsfreie Prüfverfahren. Systematische Fehler dieses Verfahrens werden diskutiert und experimentell nachgewiesen. Luftgekoppelte Ultraschallmessungen in Transmission erfolgen mit Prüffrequenzen von 75 kHz bis 300 kHz. Resonanzeffekte in den Impactschäden verhindern eine Auswertung mit dem „-6-dB-Schwellwertverfahren“, weshalb ein eigenes Schwellwertverfahren erarbeitet wird. Es wird gezeigt, dass die Signalhöhen der Hintergrundverteilung des nicht beschädigten CFK-Materials normalverteilt sind. Unterschiedliche Beschichtungen werden mit dem Ziel der Fehlerkontrasterhöhung in den OLT-Phasenbildern auf die Impactproben aufgebracht. Es wird gezeigt, dass eine realistische Schadensflächenbestimmung in Phasenbildern der OLT und UBP in erster Linie von der Probenrückseite aus möglich ist. Zur Auswertung der Phasenbilder wird ein Verfahren verwendet, welches vom „-6-dB-Schwellwertverfahren“ abgeleitet ist. Sehr feine Rissstrukturen in den Schadensflächen können hier mit der CT nicht aufgelöst werden, weshalb eine Auswertung entfällt. Es kann jedoch eine Schwäche des Referenzverfahrens aufgezeigt werden. Entscheidende Vorteile bei der Charakterisierung von Impactschäden mit 2D-Röntgenphasenkontrast- und Dunkelfeldmethoden gegenüber herkömmlicher, absorptionsbasierender Röntgenmethoden werden dargelegt.

Im Hinblick auf die quantitative Porositätscharakterisierung wird der Einfluss der ausgewählten Voxelgröße auf den Porositätsgrad untersucht. Der Auswirkung des Faservolumengehaltes von Referenzproben auf die Porositätsbestimmung wird betrachtet. Am Ende findet ein Vergleich von zerstörender (Materialografie) und zerstörungsfreier Prüfung (CT) zur Porositätsbestimmung statt.

4.2.10. Neue fortschrittliche Röntgenmethoden für CFK-Anwendungen

Masterarbeit von Mathias Florian Kiesch

Betreuender: Manuel Raith, M.Sc.

Die Masterarbeit von Florian Kiesch entstand in Kooperation mit der Firma Airbus und beschäftigt sich mit unterschiedlichen fortschrittlichen Röntgenmethoden für CFK-Anwendungen. Aufgrund nötiger Sicherheitsvorkehrungen werden Röntgentechniken bisher nur sehr eingeschränkt in der Luftfahrtindustrie eingesetzt. In dieser Arbeit werden aktuelle Entwicklungen in der Röntgentechnik der letzten Jahre dargestellt und eine Marktübersicht über momentan erhältliche Detektoren und Röntgenquellen gegeben. Davon ausgehend werden passende Röntgenkonzepte zusammengestellt und anschließend hinsichtlich ihrer Eignung für luftfahrtspezifische Szenarien beurteilt. Des Weiteren werden Ansätze für die Sichtbarmachung innerer CFK-Strukturen verfolgt, diese hinsichtlich ihrer Machbarkeit bewertet und erste Messungen zur Demonstrierung durchgeführt. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Feststellung von Ondulation.

4.2.11. Einseitige Wabenbauteilprüfung mit Luftultraschall

Masterarbeit von Mathias Sebastian Palm

Betreuender: Dipl. Geophys. Robin Groschup

Die Masterarbeit von Mathias Sebastian Palm entstand in Kooperation mit der Firma Airbus und beschäftigt sich mit der zerstörungsfreien Prüfung von Sandwichbauteilen mit Honigwabenkern. Solche Bauteile kommen in der Helikopterindustrie vermehrt zum Einsatz und unterliegen strengen Sicherheitskriterien. Die zerstörungsfreie Prüfung dieser Bauteile ist essentieller Bestandteil des Qualitätsmanagements, sowohl bei der Fertigung, als auch während der Lebensdauer des fertigen Produkts. Gerade bei der Prüfung nach dem Einbau, entweder bei Wartungsarbeiten oder im Einsatz als sogenannte „in field“ Prüfung, kann oftmals nur eine Seite der Sandwichbauteile erreicht werden. Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung mit Lamb-Wellen, die bei einseitigem Probenzugang anwendbar sind, zu validieren. Bevor die Messungen mit Lamb-Wellen durchgeführt werden, müssen zunächst Referenzmessungen in Durchschallungstechnik mit luftgekoppeltem Ultraschall an der verwendeten Probe erfolgen. Dazu ist ein beidseitiger Zugang zur Probe notwendig. Das Durchschallungsverfahren wird bereits zur Prüfung von Serienteilen in der Helikopterindustrie verwendet und dient im Rahmen dieser Studie als Vergleichsverfahren. Mit einer Analyse der Frequenzspektren der Messergebnisse, wird die Defekterkennung des Durchschallungsverfahrens weiter gesteigert und es werden Auswertungsmöglichkeiten erarbeitet, die auch bei der Analyse von Lamb-Wellen Anwendung finden. Zudem werden zur Vorbereitung von Messungen eine umfassende Literaturrecherche zu Lamb-Wellen und eine ausgeprägte theoretische Auseinandersetzung mit der Ausbreitung von Lamb-Wellen in Sandwichstrukturen mit Honigwabenkern durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Voruntersuchungen werden die Parameter der anschließenden Messungen abgeleitet. Zur Anregung von Lamb-Wellen werden verschiedene piezoelektrische Aktuatoren verwendet, die auf verschiedene Weise an die Probe gekoppelt sind. Zur Messung bei einseitigem Probenzugang kommen vorrangig luftgekoppelte Ultraschallprüfköpfe, aber auch ein Einpunkt-Laservibrometer zum Einsatz. Die Ergebnisse der Messungen werden abschließend auf ihre Defekterkennung hin untersucht.

4.3. Bauingenieurexkursion zu Baustoffherzeugenden Industrien

Der Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung hat wie jedes Jahr auch im Sommer 2014 eine Exkursion organisiert. Die jährliche 3 bis 4-tägige Exkursion findet im Rahmen des Wahlfaches „Baustoffherzeugende Industrie – Exkursionen“ für Studierende im Masterstudium statt. Insgesamt nahmen 9 Studierende des Masterstudiums Bauingenieurwesen in Begleitung von Dipl.-Ing. Amir Rahimi und Daniel Weger, M.Sc. an der Exkursion teil. An drei Exkursionstagen wurden folgende Ziele besichtigt:

Tag 1: Dienstag, 10. Juni 2014

- Lech-Stahlwerke (in Meitingen)
- Merk Timber GmbH (in Aichach)

Tag 2: Mittwoch, 11. Juni 2014

- KSW Südbayern (in Friedberg)
- Ziegelwerk Hörl & Hartmann (in Dachau)

Tag 3: Donnerstag, 12. Juni 2014

- BASF (in Trostberg)
- Rohrdorfer Zementwerke (in Rohrdorf)

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

Die einzelnen Stationen werden durch die Berichte von Studenten dargestellt.

4.3.1. Lech Stahlwerke

Bericht von Victor Andrei Petrascu

Das Unternehmen

Im Rahmen der Veranstaltung Baustoffherzeugende Industrie haben wir die Lech-Stahlwerke in Meitingen im Ortsteil Herberetshofen besichtigt. Diese betreiben das einzige Stahlwerk in Bayern und produzieren, mit rund 700 Mitarbeitern, jährlich ca. 1,1 Million Tonnen Betonstahl sowie Qualitäts- und Edelbaustahl. Im Jahre 1970 wurden die Lech-Stahlwerke vom italienischen Unternehmer Luigi Guissani als Bayerische Elektrostahlwerke gegründet und gehören heute zur Max-Aicher Gruppe. Die Lech-Stahlwerke verwenden für die Produktion des Stahles Metallschrott. Es werden Stahl-Knüppel mit Hilfe von Elektrolichtbogenöfen über Stranggussanlagen produziert und zu den entsprechenden Produkten gewalzt. Seit der ersten Schmelze am 19. März 1972 wurden mehr als 30 Millionen Tonnen Schrott recycelt, was über 4000 Tonnen täglich verwertetem Schrott entsprechen.



Bild 1:
Exkursionsgruppe am Freilager
der Lech Stahlwerke

Stahlprodukte

In den Lech-Stahlwerken in Meitingen werden sowohl Betonstahl als auch Qualitäts- und Edelbaustahl produziert. Die Produktion des Betonstahls umfasst Betonstabstähle mit einem Durchmesser zwischen 8 und 32 mm, die mit Hilfe des Tempcore-Verfahrens hergestellt werden. Beim Tempcore-Verfahren wird der Stahl direkt nach dem Walzen auf einer Wasserkühlstrecke auf etwa 100° C runter gekühlt. Durch dieses Verfahren verbessert sich insbesondere die Duktilität und Festigkeit des Stahles. Die Lech-Stahlwerke produzieren auch Qualitäts- und Edelbaustähle, wobei 80% des hergestellten Edelbaustahls an europäische Automobilhersteller und deren Zulieferer geliefert wird. Der produzierte Stahl wird bei

der Herstellung von Antriebs-, Lenkungs-, Motoren-, und Fahrwerksteilen verwendet. Diese werden aber auch in der Maschinen- und Bergbau-, sowie Ketten-, und Schraubenindustrie eingesetzt. Die Stahlprodukte werden je nach dem Verwendungszweck als Rohstranggussknüppel, Rundstahl, Schmiedehalbzeug und Blankstahl produziert.

Fertigungsprozess

– Schrottaufbereitung und Lieferung: Bei der Herstellung des Stahles wird dieser vollständig aus sortiertem Schrott gewonnen. Der Transport von etwa 60% des Schrottes wird umweltfreundlich per Bahn angeliefert. Die Sortierung und Aufbereitung des Schrottes erfolgt in den Anlagen der Max Aicher Recycling GmbH.

– Schmelzvorgang: Das Schmelzen des Schrottes für die Gewinnung von Stahl erfolgt in zwei Elektrolichtbogenöfen. Jeder Elektrolichtbogenofen hat eine Kapazität von 100 Tonnen, wobei der Abstrich schlackenfrei über einen Bodenabstrich erfolgt. Die Verwendung des Elektrolichtbogenofen trägt auch zum Klimaschutz bei, da der CO₂-Ausstoß je Tonne Stahl bei der konventionelle Produktion im Hochofen um 75% höher ist als bei der Produktion im Elektrolichtbogenofen.

– Sekundärmetallurgische Behandlung: Die Anwendung der sekundärmetallurgischen Behandlung ist für die Verbesserung des Stahles und des Einhaltens der Anforderungen notwendig. Dies ist eine Nachbehandlung des Stahles nach dem Frischen und wird in den Stahlwerken durch eine Behandlung in Pfannenöfen und Vakuumbehandlung durchgeführt. Die LSW verfügen über zwei Pfannenöfen, in welchen, neben der metallurgischen Behandlung (z.B. Entschwefelung), auch die chemische Analyse und die Gießtemperatur eingestellt werden. Während des Schmelzprozesses werden viele Gase gelöst, die bei der

weiteren Verarbeitung des Stahles zu negativen Eigenschaften führen. Durch die Reduzierung des Wasserstoff- und Kohlenstoffgehaltes im Stahl werden seine Eigenschaften verbessert, was zu einer Verbesserung des Reinheitsgrades führt. Für die Verbesserung des Reinheitsgrades beim Qualitätsstahl werden zwei Vakuumentgasungsanlagen verwendet. Bei dieser Behandlung wird die Pfanne in ein Vakuumgefäß gehoben, mit einem Deckel verschlossen und der Stahl evakuiert.

– Strangguss: Der Stranggussprozess stellt den Übergang vom flüssigen zum festen Zustand des Stahles dar. Auf zwei Stranggießanlagen wird bei den Lech-Stahlwerken in Meitingen der aus Stahlschrott geschmolzene Rohstahl in sogenannte Knüppel gegossen. Diese bilden das Vormaterial zur Erzeugung von mehr als 1 Mio. Tonnen Beton, Qualitäts- und Edelbaustahl.

Bild 2:
Stranggießanlage der Lech
Stahlwerke



– Walzen: Die Lech-Stahlwerke verfügen über zwei unterschiedliche Walzwerke, wobei im Walzwerk I Betonstahl und im Walzwerk II Qualitäts- und Edelbaustahl verarbeitet wird. Im Walzwerk I werden die Knüppel direkt aus der Stranggusshitze in einem erdgasbeheizten Stoßofen auf Walztemperatur gebracht. Das Walzwerk verfügt über 18 Walzgerüste in fortlaufender Anordnung, wobei im letzten Gerüst die Betonstahlrippen in die Betonstahlstäbe eingewalzt werden. Der Betonstahl wird danach gekühlt, vorbereitet und gebündelt. Im Walzwerk II wird hochwertiger Stabstahl aus Qualitäts- und Edelbaustahl hergestellt. Dieser wird hauptsächlich in der Automobilindustrie und Maschinenbauindustrie verwendet. Das Walzwerk II verfügt über 16 Duo-Gerüste in fortlaufender Anordnung. Die Knüppel werden in einem erdgasbeheizten Hubbalkenofen auf 1000 bis 1200° C erwärmt und dann zu den entsprechenden Abmessungen gewalzt. Laserdiameter überprüfen, ob die engen Toleranzen eingehalten wurden. Die Stäbe werden auf dem Wendekühlbett abgelagert.



Bild 3:
Walzstraße der Lech Stahlwerke
(Foto: Wolfgang Felkl)

– Adjustage: Bei der Adjustage findet eine Endkontrolle des Stahlstabes statt. Dies erfolgt durch eine Reihe von Prüfverfahren, die dem Stahl eine bessere Qualität und Sicherheit beim Einsatz gewährleisten. Die vier Prüf- und Richtlinien auf welche die Prüfung von Stabmaterial und Halbzeug erfolgt sind Materialidentität, Querschnitt-/Innenflächenprüfung, Verfahren der Oberflächenprüfung und Wärmebehandlung.

Prüfmethoden

Stähle werden in der Adjustage einer Reihe von Prüfmethoden unterzogen, damit diese der Qualitätsanforderungen entsprechen. Durch diese Qualitätssicherung und Prozessoptimierung können die Stähle auch bei sehr engen Toleranzen die Anforderungen erfüllen. Zu den Prüfungen gehören auch moderne Riss- und Ultraschallprüfungen. Diese Prüfmethoden teilen sich in Prozess- und Produktbegleitende Methoden, Prüfmethoden im mechanischen Labor und Metallographie.

Bei den Prozess und Produktbegleitenden Prüfmethoden werden die Proben aus der Produktion durch ein Rohrpostsystem in das Labor zur Prüfung gesendet. Hier werden diese vorbereitet und auf Radioaktivität und chemische Zusammensetzung geprüft. Weitere Produktbegleitende Prüfmethoden, die bei der LSW angewendet werden, sind die Schlackenbestimmung und die gaschromatographische Bestimmung der Elemente C, S, O-Gesamt, N und H aus der Stahlprobe. Die Schlackenbestimmung wird mit Hilfe einer Röntgenfluoreszenzanalyse ermittelt. Im mechanischen Labor werden die Betonstahlrippen in einer automatischen Prüfeinheit geprüft.

4.3.2. Merk Timber GmbH

Bericht von Emanuel Dembech

Das Unternehmen

Das Unternehmen wurde im Jahre 1867 als Familienbetrieb gegründet. Im Jahre 2004 wurde die Fa. Merk Projekt GmbH Teil des FINFOREST METSÄ GROUP aus Finnland, in deren Besitz das Unternehmen bis zum Insolvenzantrag und -verwaltung in den Jahren 2012/13 stand. Im Zuge der Insolvenzverwaltung wurde als neuer Investor, der Baukonzern Ed. Züblin AG gewonnen. Dieser gehört wiederum zum international agierenden STRABAG S.E. Konzern. Durch die Neustrukturierung im Mutterkonzern, bildete sich als neue Sparte für den Holzingenieurbau, das Timber Construction Competence Team (im Folgenden abgekürzt als TCC), zu welchem die Züblin Holzbausparte, die Merk Timber GmbH und die Stephan Holzbau GmbH angehören. Die Belegschaft der Merk Timber GmbH zählt derzeit 185 Mitarbeiter in der Verwaltung und in der Produktion. Der Konzern Ed. Züblin AG beschäftigt insgesamt ca. 13.500 Arbeiter und Angestellte. Der Jahresumsatz der Fa. Merk belief sich im letzten Jahr auf ca. 32 Mio. Euro und konnte in den letzten Jahren konsolidiert und leicht ausgebaut werden. Das Unternehmen unterhält mehrere Zweigstellen und Vertriebsstandorte/Nebenstandorte im In- sowie Ausland, wie z.B. in Österreich und Italien.

Produkte und Bauweisen

Der moderne Ingenieurholzbau erfreut sich einer großen Vielfalt an möglichen Bausystemen, welche zumeist firmenspezifisch ihren Ursprung finden. Auch das Unternehmen Merk Timber GmbH unterhält firmeneigene, patentierte Holzbauweisen. Es werden Lösungen und Systembauweisen für Wände (außen und innen), Fassaden und Fassadenverkleidungen, Decken und Dächern bis hin zu Sonderbauteilen angeboten. Als Ausgangsmaterial dient Fichtenholz. Das Unternehmen benötigt für die Produktion jährlich ca. 60.000 m³ Holz. Zur Veranschaulichung entspricht dies ca. 4-5 Lkw pro Tag an Materialzulieferung. Die Verleimung erfolgt durch modifizierte Melaminharze. Die Keilverzinkung zur Endloslamelle erfolgt in einer Vakuumanlage. Der Abbund, also das maßgerechte Anreißen, Bearbeiten, Zusammenpassen und Kennzeichnen erfolgt einerseits traditionell durch Sägen, Fräsen, Stemmen, Bohren sowie maschinell mittels Hundecker PDA. Die Herstellung von Brettsperrholz dient als Basis zur Herstellung der hauseigenen Bausysteme.

Bauvorhaben / Projekte

In den letzten Jahrzehnten war die Merk Timber GmbH an der Realisierung zahlreicher Projekte im In- und Ausland beteiligt. Das Unternehmen realisiert im Allgemeinen Gewerbebauten, Wohnbauten, Fassaden bis hin zu



Bild 4:
Montage der Konstruktion
EXPO Hannover – Quelle
Homepage Merk Timber GmbH
Produktions- und Werksbe-
sichtigung

öffentlichen Bauten wie Kindergärten, Schulen und Kultuszentren. Beispielhaft sind zu nennen: Elefantenhaus Zoo Zürich (CH), Bürogebäude Stadtwerke Lübeck (in Ausführung), Metropol Parasol in Sevilla (ESP), Holzachterbahn New Jersey (USA), Las Arenas – Barcelona (ESP), EXPO Hannover, Kindergarten Sachsenheim.

Im Anschluss an eine Firmenpräsentation in den Büroräumlichkeiten fand auf dem Betriebsgelände der Merk Timber GmbH eine Werksbegehung statt. Dabei wurde uns der gesamte Fertigungsprozess von der Anlieferung bis zum Abtransport des fertigen Produktes gezeigt und erläutert. Die Besichtigung führte uns über das Werksgelände vorbei an der Zwischenlagerung in die Produktionshallen. Dort wurde der Produktionsprozess erklärt.

– Trocknung / Festigkeitssortierung: Die gelieferte Rohware wird technisch getrocknet. Die Trocknungszeit ist materialabhängig, die Trocknungstemperatur ist größer 55°C. Dabei wird der Werkstoff auf eine Holzfeuchte von $10 \pm 2\%$ getrocknet und danach gehobelt. Die vorgehobelten und technisch getrockneten Bretter werden maschinell nach der Festigkeit sortiert. Hierbei können auch die Oberflächenqualitäten der Decklamellen berücksichtigt werden.



Bild 5:
Logistik – Abtransport der Bauelemente Werk Merk Timber GmbH

– Keilzinkenverbindung / Lamellenhobeln / Klebstoffauftrag / Verpressen der Lamellen: Anschließend an der Festigkeitssortierung werden eventuelle Fehlstellen im Baustoff (z.B. Äste) ausgekappt und die stirnseitigen Enden zur Keilzinkenverbindung vorbereitet und zu einer Endloslamelle gestoßen. Die Endloslamellen werden auf Fertigdicken von 17/27/33/42 mm gehobelt. Der weitere Prozess besteht im Wesentlichen aus Auslegen der Lagen und der Verklebung. Auf der Breitseite erfolgt das Auftragen des Klebstoffes und das aufeinander-schichten von mindestens 3 Lamellen. Der Systemaufbau besteht aus 3/5/6/7 Lagen.

– Bearbeiten des Rohlings / Abbund / Transport: Die aufeinander-geschichteten Lamellen werden in Pressbetten miteinander verpresst. Unter Druck härtet der Rohling aus. Dabei handelt es sich um ein patentiertes Verfahren zum Verbund der Lagen mittels Druck. Das speziell entwickelte Verfahren soll laut Angaben des Unternehmens durch den geringen Energieverbrauch ökologisch und wirtschaftlich zugleich sein. Die Prozesszeit beläuft sich auf ca. 8 Std. und wird heutzutage durch computergestützte Systeme gesteuert.

Im Anschluss findet eine weitere Bearbeitung des Brettschichtholzrohlings statt, Dabei werden die Elemente gehobelt und gefasst. Dafür wird das Element auf Kanthölzern weiterverarbeitet.

Zum Abschluss erfolgen die Abbundarbeiten, wie der Einbau von Stahlteilen, das Herstellen von Schlitten, Durchbrüche und Öffnungen sowie der Witterungs- oder Holzschutz. Um die Montage auf der Baustellen zu erleichtern und eine „Just-in-time“ oder „Just-insequence“ Logistik zu ermöglichen, werden die fertig abge bunden Elemente, mittels projektgebunde-

ner Etikettierung gekennzeichnet, in welcher der Auftrag, die Bauteilnummer, die Oberflächenbeschaffenheit sowie die Transportnummer angegeben wird. Als letzter Schritt gehört die Zwischenlagerung auf das Betriebsgelände oder der Transport zur Baustelle, der fertigen Bauteile.

4.3.3. Kalksandsteinwerke Südbayern

Bericht von Christian Wostatek

ArcelorMittal ist der weltweit führende Stahlhersteller mit einer Präsenz in mehr als 60 Ländern. Die Kalksandsteinwerke (KSW) Südbayern sind ein 2006 entstandener Zusammenschluss der Kalksandsteinwerke Eching und Augsburg und sind Mitglied in der Unika Vertriebsgruppe. Das Werk Eching wurde 1960 gegründet und produziert seit 2000 den Großformatstein Quadro. Das von uns besuchte Werk Augsburg wurde 1962 von 22 Ziegelwerken gegründet, welche sich erst 2007 aus der Geschäftsführung zurückzogen und somit erst ab diesem Zeitpunkt ein freier Wettbewerb möglich war. Das KSW Augsburg unterzog sich 1996 unter laufendem Betrieb einer Neukonzipierung, so dass es seither zu den modernsten Kalksandsteinwerken in Bayern zählt. Zurzeit laufen die Arbeiten, um eine neue Presse in Betrieb zu nehmen, wodurch auch das Großformat Quadro gefertigt werden kann. Das Liefergebiet des KSW Augsburg erstreckt sich in einem Radius von 200 km um das Werk, wobei Lieferungen nach Österreich bis 2010 noch verboten waren, denn dort galt ein Lieferverbot der Regierung wegen Bedenken zur Radonstrahlung. Erst nachdem die Nachweise zur Unbedenklichkeit erbracht wurden, stand auch dieser Markt zur Verfügung.

Die Werksführung ging zunächst an den Kalksilos vorbei, welche zweimal täglich durch Silozüge aus Tschechien oder Merken befüllt werden. Danach ging es in die Sandgrube, welche mit einer Abbaugenehmigung für 6 Jahre von der Bayerischen Forstverwaltung gepachtet ist. Es wird 30 m tief und bis 5 m über dem Grundwasser abgebaut. In der Grube baut ein Radlader den Tagesbedarf von 500 t an Sand ab und übergibt den Sand durch ein Grobsieb an ein Förderband.

Das Förderband transportiert den Aushub auf einen Mischkegel in dem das Material homogenisiert wird. Von diesem Haufen wird der Sand in eine Siebanlage transportiert. Dort wird auf 7 mm und 25 mm gesiebt. Sandkörner bis 7 mm werden sofort eingesetzt, Körnungen zwischen 7 mm und 25 mm werden abgeschieden und zu Brechsand aufbereitet und Kies über 25 mm wird zur Auffüllung der Gruben benutzt. Das für die Kalksandsteinherstellung verwendete Material besteht zu 2/3 aus natürlichem Sand und zu 1/3 aus Brechsand.

Die benötigten Rohstoffe Kalk, natürlicher Sand und Brechsand werden über je eine Schneckenpumpe in einen so genannten Reaktor transportiert, wo der Brandkalk mit Wasser abgelöscht wird. Das auf Pressfeuchte gebrachte Kalk-Sand-Gemisch wird aus dem Reaktor direkt von oben in den so genannten Unterstempel der Pressen gefüllt. Der so entstandene Rohling wird nach oben ausgestoßen und Richtung Härter transportiert.

Mit diesem Pressverfahren lassen sich bei einem Pressdruck von 800 t Steine mit einer Höhe von max. 23,8 cm herstellen; für den Quadro mit 50 cm Höhe sind Pressdrücke von 1200 t nötig.

Die ausgestoßenen Rohlinge werden auf Maßabweichungen (max. 0,5 mm zulässig) sowie Beschädigungen kontrolliert und bei Auffälligkeiten aussortiert und in den Reaktor zurückgeführt. Unauffällige Rohlinge werden auf 1m Höhe gestapelt und in einen von elf 30 m lan-

gen röhrenförmigen Autoklaven (Dampfkessel) gefahren. Wenn ein Autoklav voll ist, werden die Klappen mit Bajonettverschlüssen geschlossen und die Rohlinge bei 180°C und 16 bar für 6 h gehärtet. Als Qualitätskontrolle der gehärteten Steine werden diese regelmäßig einer Druckfestigkeitsprüfung unterzogen. Die gebrochenen Steine könnten bis zu einem Anteil von 35% als Recyclingmaterial im Kalksandstein wieder verwendet werden. Allerdings ist das Aufbereiten des Kalksandsteinbruchs durch den geringen Rücklauf aus der Wirtschaft unrentabel, so werden die geprüften Steine stattdessen in die Grube geschüttet.

Die fertigen Steine werden auf Paletten gestapelt und mit einer Schrumpffolie überspannt. Die Folie verbessert zum einen die Steinqualität und erleichtert zum anderen das Verheben der Paletten.

Im Anschluss des Rundgangs wurden wir in eine Produktausstellungshalle geführt, wo uns einige Besonderheiten beim Bauen mit Kalksandstein vorgeführt wurden.



Bild 6:
Härtung der Steinrohlinge in
Autoklaven

4.3.4. Ziegelwerk Hörl & Hartmann

Bericht von Valentina Schlecht

Aktuelles

Das Ziegelwerk Hörl und Hartmann ist seit der Gründung bis heute ein Familienbetrieb und bereits in der vierten Generation tätig. Die Geschäftsführung erfolgt momentan durch Anton Hörl. Diese soll jedoch zukünftig durch Matthias Hörl übernommen werden.

Im Ziegelwerk, mit seinen zwei Standorten Dachau und Gersthofen, arbeiten mittlerweile insgesamt 120 Mitarbeiter, die werktags in einem Zweischichtsystem und am Wochenende nur in einer Schicht arbeiten. Der Betrieb stellt im Moment etwa 300 verschiedene Ziegelprodukte her. Die Herstellungsdauer pro Ziegelprodukt beträgt 6 Wochen, danach werden die Produkte bis zu 6 Monaten gelagert. Die Firma erweitert ihre Vertriebsaktivitäten auch nach Südtirol und Norditalien. Hörl und Hartmann erwirtschaftet jährlich einen Umsatz von ca. 30 Mio. €.

Produktion

1. Rohstoffabbau und Zwischenlagerung

Die Tonvorkommen werden aus der in unmittelbarer Nähe liegenden Lehmgrube abgebaut. Lastkraftwagen transportieren den Ton dann auf die Mischhalde. Bereits beim Abbau werden die unterschiedlichen Lehmqualitäten selektiert und entsprechend den Produktanforderungen in der Mischhalde vermengt. Die Mischanlage dient dazu, Schlechtwetterperioden, in denen kein Lehmabbau durchgeführt werden kann, zu überbrücken. Wichtig ist auch, dass der Rohstoff in der Mischhalde Zeit für ein erstes Aufquellen hat.

2. Aufbereitung

Unter Aufbereitung versteht man in der Ziegelindustrie die Zerkleinerung und weitere Homogenisierung des Rohstoffes (Ton- bzw. Lehmmaterial), damit er sich zum Formen, Trocknen und Brennen eignet. Die Aufbereitungsanlage besteht aus den drei Hauptmaschinen Kollergang, Vorwalzwerk und Feinwalzwerk.

3. Sumpfhausanlage

Förderbänder transportieren den zerkleinerten Rohstoff anschließend in die Sumpfhausanlage. Die Lagerung des Materials in der Sumpfanlage für ca. eine Woche bewirkt zum einen die nochmalige gründliche Vermischung der inzwischen zusammengeführten Rohstoffkomponenten, zum anderen kommt es zum Mauk-Prozess, einer gleichmäßigen Durchfeuchtung und Homogenisierung des Materials.

4. Zuschlagstoffe

Aufgrund der unterschiedlichen Qualitätsanforderungen an die Produkte ist es notwendig, Zuschlagstoffe wie z.B. Sägemehl, Granit oder Zunder in bestimmten Verhältnissen dem Rohstoff beizumengen. So wird bei der Herstellung eines hochwärmedämmenden Ziegels Sägemehl als Porosierungsmittel zugefügt. Die Produktion von Schallschutzziegeln erfordert die Zugabe von Granit oder Zunder. Diese Zuschlagstoffe gelangen über Kastenbeschicker und Förderbänder in das aus der Sumpfanlage kommende Rohmaterial.

5. Formgebung

Über ein Förderband kommt das Material zur Formgebung in eine Vakuumschneckenpresse. Am Eingang des Pressenaggregates knetet der Doppelwellenmischer die Verarbeitungsmasse zum letzten Mal durch und presst diese in die Vakuumkammer. Durch das

Vakuum werden den Tonschnitzeln die Luftmoleküle entzogen. Die Pressenschnecke sorgt im Zylinderkopf für die Materialverdichtung. Mit einem Pressdruck von ca. 12 bar wird das Tongemisch durch ein auswechselbares Mundstück gedrückt und auf die spätere Steinhöhe zugeschnitten. Jetzt sind die so genannten Rohlinge fertig.

6. Trocknen und Brennen

Anschließend werden die Rohlinge im Kammertrockner 24 – 72 Stunden getrocknet und im Tunnelofen 22 – 48 Stunden gebrannt. Die aus dem Porosierungsstoff Sägemehl frei werdenden Schwelgase (Kohlenwasserstoff-Verbindungen) werden in einer thermischen Nachverbrennungsanlage (TNV) „nachverbrannt“. Die heißen Reingase aus der TNV-Anlage werden wieder in den Ofen geleitet und heizen das Brenngut auf. Sie vermischen sich dabei mit den dort entstandenen Schwelgasen und werden wieder über das erste Tunnelofenwagenfeld abgezogen, wo der Kreislauf von vorne beginnt.

Auf los geht's los:

Mit einer Vorführung wurde unsere Besichtigung im Ziegelwerk abgerundet. Es wurde gezeigt, wie schnell und einfach sich die hergestellten Ziegel verlegen lassen. Freiwillige durften den Mörtel mit Mörtelschlitzen auf die Ziegel auftragen und Ziegel verlegen.



Bild 7:
Vorführung Ziegelsteinverlegung

4.3.5. BASF

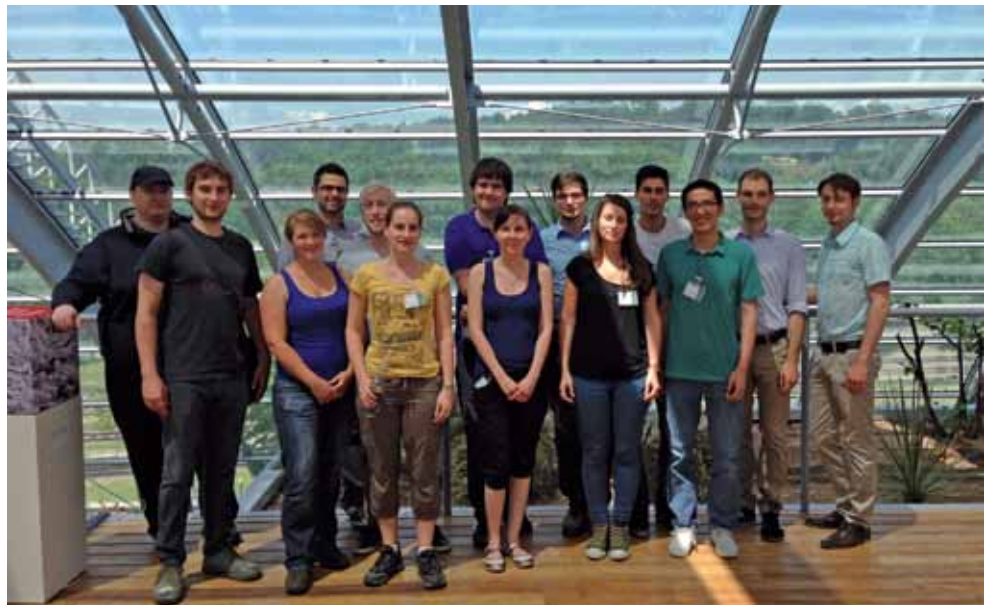
Bericht von Simina Rosa

1. Die BASF in Trostberg

Die Geschichte von Trostberg als Chemiestandort begann in 1895 als die Chemiker Adolph Frank und Nikodem Caro die Bayerischen Stickstoffwerke AG gründeten. Sie haben die Grundlagen für die industrielle Produktion des Kunstdüngers Kalkstickstoff und von anderen stickstoffbasierten Chemierzeugnissen geschaffen. Etwa drei Jahrzehnte später entsteht die Süddeutsche Kalkstickstoff - Werke AG (SKW Trostberg AG) durch die Fusion der Bayerischen Stickstoffwerke AG mit der Bayerische Kraftwerke AG. In 2001, durch die

Verschmelzung mit Degussa H&L, entsteht die sogenannte neue Degussa und letztendlich in 2006 akquiriert die BASF die globale Bauchemiesparte der Degussa und gliedert sie in den Konzern ein. Dabei hat sich Trostberg zu einem Mehrbereichsstandort der BASF entwickelt: Die Forschung Construction Materials & Systems hat hier ihren Hauptsitz, die drei Unternehmensbereiche Construction Chemicals, Dispersions & Pigments sowie Performance Chemicals werden auch in Trostberg vertreten.

Bild 8:
Die Organisatoren Amir Rahimi (4.v.l.) u. Daniel Weger (5.v.l.) wurden mit den Exkursionsteilnehmern bei der BASF auch von Dr. Oliver Mazanec (2.v.r.) einem ehemaligen wissenschaftlichen Mitarbeiter des cbm begrüßt.



2. Die Labors

Nach unserem Empfang und der Sicherheitseinweisung wurde uns das Fliesenkleberlabor und das Betonlabor gezeigt. Im Fliesenkleberlabor durften wir Fliesenkleber nach unterschiedlichen Rezepturen herstellen. Der Fliesenkleber von BASF hat als Hauptkomponenten Portlandzement, Sand, Kalksandstein (6%), Cellulose Fasern und Edel - Dispersionspulver. Das Dispersionspulver befindet sich in Kapseln, die sich während der Mischung auflösen und verteilen.

Die Mischungen wurden mit dem PCI Nanosilent Fliesenkleber der BASF durchgeführt. Vorteile dieses Produktes sind die Trittschallreduzierung, Entkopplung des Bodenbelags vom Untergrund, Untergrundaussgleich und eine einfache Verarbeitung.

Wir haben als erstes drei Mischungen mit drei unterschiedlichen Fliesenkleber - Rezepturen hergestellt:

1. Rezeptur: 1 kg Trockenpulver, 220 g Wasser;
2. Rezeptur: 1 kg Trockenpulver, 300 g Wasser, 4 g Superabsorber;
3. Rezeptur: 1 kg Trockenpulver, 380 g Wasser, 4 g Superabsorber.

Der Superabsorber wird verwendet, um die Wasserkontrolle im Zement zu gewinnen. Denn er kann ein Vielfaches seines Eigengewichtes an Wasser oder anderen Flüssigkeiten ansaugen. Werden sie in der Trockenmischung eingefügt, so kann das Absaugen von Wasser die Rheologie der Frischmörtel ändern und die Sedimentation und das Bluten von Zement

reduzieren. Der Zementleim wird nach dem Mischen mit einem Spachtel auf einem Brett aufgetragen und danach werden die Fliesen aufgebracht. Diese werden mit einem 2 kg schweren Gewicht gepresst und nach 0, 5, 10 und 15 Minuten wird das Brett vertikal gelagert. Damit wird die Haftung des Fliesenklebers geprüft. Rutschen die Fliesen nicht (oder nur ganz wenig), so hat der Fliesenkleber die Prüfung bestanden.

Man konnte feststellen, dass der Mörtel mit einem geringeren Wassergehalt eine schlechtere Haftung aufweist, da eine größere Zahl von Fliesen entweder nach unten gerutscht oder ganz abgefallen ist. Der Fliesenkleber mit dem größten Wassergehalt aus den 3 Versuchen hatte die besten Ergebnisse. Wichtig bei einem Fliesenkleber ist seine Trocknungszeit. Er darf er nicht zu schnell austrocknen.

Als nächstes wurde eine vierte Mischung durchgeführt, ein Reparaturmörtel. Der Reparaturmörtel mit weicher Konsistenz bestand aus 45% Zement und einer Kombination aus mineralischen Füllstoffen und hochwertigem Kunststoffpulver. Reparaturmörtel werden für die Instandsetzung der beeinträchtigten Bauwerke verwendet. Eingesetzt wird er am Randbereich von Ausbrüchen, für den Verbund mit dem Untergrund oder um die Dichtigkeit der Betondeckung zu verbessern. Wegen der hohen Anforderungen werden ausschließlich kunststoffmodifizierte zementgebundene Mörtel für Reparaturmörtel verwendet.

Als nächstes haben wir das Betonlabor besucht, wo die Materialien unterschiedlichen Praxistests unterzogen werden. Die primären Tätigkeiten des Betonlabors sind die Produktionskontrolle und Produktionsentwicklung, vor allem von Fließmitteln, aber auch von Luftporenbildnern und Verzögerern. Geplant ist, dass ab dem nächsten Jahr künstliche Luftporen auf der Baustelle im Beton eingefügt werden können. Neben den unterschiedlichen Zementarten und der Sieblinienoptimierung wurde uns über das selbstentwickelte Fließmittel erzählt. Ende der 1960er Jahren wurde ein modifiziertes Melaminharz, Melmet, in Trostberg entwickelt. Melmet bewirkt eine Verflüssigung der zement- und gipsbasierten Produkte und markierte somit den Beginn der modernen Bauchemie. Neben Melmet wurden auch Hochleistungsfließmittel unter den Markennamen Glenium und Melflux (auf Basis von Polycarboxylatether) produziert.

3. Das Gelände

Bei der Führung über das BASF Gelände haben wir die Produktions- und Lagerungsstandorte der unterschiedlichen Zusatzmittel, die in Trostberg produziert werden, gesehen. Die Experten in Trostberg haben sich auf vier Bereiche spezialisiert: Trockenmörtel, Gipsausgleichsmassen/Anhydritfließestriche, Gipskartonplatten und Feuerfestmörtel.

Für die unterschiedliche Anwendung von Trockenmörtel werden in Trostberg auch Pulveradditive entwickelt und hergestellt. Neben den Melmet und Melflux Fließmitteln werden Starvis Stabilisierer und Vinapor Entschäumer entwickelt. Der Stabilisierer sorgt dafür, dass sich nichts entmischt und dass das Material nicht blutet. Der Entschäumer gewährleistet die Freiheit von Luftblasen beim Anmischen des Trockenmörtels, da Luftblasen zur Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes des Betons führen. Bei Fliesenklebern, Reparaturmörteln und anderen vertikalen Systemen kommt es besonders auf Standfestigkeit bei gleichzeitiger geschmeidiger Verarbeitbarkeit an. Auch diese im Grunde gegensätzlichen Eigenschaften werden durch innovative Starvis Polymere aus Trostberg vereint. Alle Produkte, die in Trostberg hergestellt werden, werden bis zur Verpackung von den Mitarbeitern ständig überwacht.

4.3.6. Rohrdorfer Zement

Bericht von Franziska Achatz und Felix C. Schwippel

Zementherstellung

Zur Herstellung von Zement wird hauptsächlich Kalkstein, Ton und Mergel benötigt, da in diesen natürlichen Rohstoffen die Hauptbestandteile CaCO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 enthalten sind. Sie werden entweder durch Brechen oder durch Sprengen in Steinbrüchen gewonnen und über Schwerlastkraftwagen zu Brechern transportiert, die das grobstückige Material zerkleinern. Der in Rohrdorf verwendete Hammerbrecher bringt 800 Tonnen Rohmaterial pro Stunde auf einen Durchmesser von 40 bis 50 Millimeter.

40 Prozent des Ausgangsmaterials wird im direkt angrenzenden Steinbruch gewonnen, der Rest muss von umliegenden Werken, meist über Bahntransport angeliefert werden.

Über Bandförderer wird das gebrochene Material in der Mischbettkammer in verschiedenen Kammern, getrennt nach Gesteinsart, eingelagert. In Rohrdorf werden Kalkstein, Kalkmergel und Tonmergel verwendet. Der Unterschied zwischen Kalk- und Tonmergel liegt im Kalk- beziehungsweise Tongehalt des Gesteins. Eine Homogenisierung wird später durch das gezielte Abtragen aus den verschiedenen Kammern erreicht. Der so gemischte Rohschotter wird über Förderbänder zur Rohmühle, hier einer Walzenschüsselmühle transportiert. In der Rohmühle wird das Material, nachdem noch Korrekturstoffe wie Flugasche hinzugefügt wurde, auf Mehlkörngröße zerkleinert und währenddessen von den Abgasen des Ofens getrocknet. Dieser Prozess ist einer der größten Stromverbraucher in der gesamten Herstellungskette. Zwischengelagert wird das fertige Rohmehl anschließend in Silos.

Bild 9:
Drehrohröfen



Der Weg von den Silos zum Ofen führt über einen mit mehreren Bechern ausgestatteten Wärmetauscharturm. Hier wird das Rohmehl von Ofenabgasen bereits auf eine Temperatur von 950 °C erwärmt.

Erst durch das Brennen des Rohmehls entsteht der reaktionsfähige Baustoff Zement, das macht den Ofen zum Herzstück des Zementwerks. Da 20 Prozent des jährli-

chen Heizölbedarfs allein beim anfeuern des Ofens verbraucht werden, muss unter allen Umständen verhindert werden, dass es zu einem ungeplanten Stillstand kommt. Um das sicherzustellen, gibt es eine werkeigene Maschinenbaufirma, welche sich um die Wartung kümmert und alle wichtigen Teile immer auf Reserve vorrätig hält oder diese eigenhändig herstellen kann. Wartungsarbeiten, die nicht bei laufendem Betrieb durchgeführt werden können, müssen in die drei Wintermonate geschoben werden, in denen der Ofen still steht. Um in dieser Zeit keine Lieferengpässe zu haben, hält das Werk etwa 120.000 Tonnen Zement vor.

Die gesamte Produktion ist auf die Leistungsfähigkeit des Ofens ausgerichtet und mit notwendigen Puffern ausgestattet. Dies gewährleistet einen durchgehenden Nachschub an Brennmateri-

In Rohrdorf wird ein Drehrohröfen verwendet, um die nötige chemisch-mineralogische Umwandlung zum Zementklinker zu erreichen. Das Material wird dafür auf bis zu 1450 °C

erhitzt, damit sich der Kalk an die hydraulischen Faktoren bindet. Diesen Prozess nennt man Sinterung.

Bei den Brennstoffen zur Befeuerung der Ofenanlage kann zwischen Primär- und Sekundärbrennstoffen unterschieden werden. Steinkohle und Heizöl werden in Rohrdorf als Primärbrennstoffe verwendet, machen jedoch nur 20 Prozent der benötigten Brennmittel aus. Daneben setzen sich die Sekundärbrennstoffe aus Abfallstoffen wie Altreifen, Dachpappe, Lösemitteln, Schweröle, Kunststoffabfällen oder Papierfangstoffen zusammen, was auf den Umweltschutzgedanken zurückzuführen ist.

Der noch glühende, kleinstückige Zementklinker wird mit einem Rostkühler schnell auf eine Temperatur von 100 °C abgekühlt und anschließend in Silos gelagert.

Erst im folgenden Schritt muss entschieden werden, welche Zementsorte angestrebt wird, da diese in erster Linie von der Mahlfeinheit der Zementkörner abhängig ist. Durch eine höhere Mahlfeinheit ergibt sich eine kleinere Korngröße und somit eine größere spezifische Oberfläche. Damit geht für feinere Zemente auch ein höherer Wasseranspruch und schnellere Erhärtungsreaktion einher. Diese Reaktionsgeschwindigkeit lässt sich über qualitativ hochwertige Zusatzstoffe, wie zum Beispiel Hüttensand wieder etwas senken.

Für den Mahlprozess stehen in Rohrdorf Rohrmühlen zur Verfügung, die einen Durchsatz von 250 Tonnen pro Stunde möglich machen. Der Zementklinker wird gemeinsam mit den nötigen Zusatzstoffen und Gips als Erstarrungsregler in die mit Stahlkugeln gefüllte Mühle gegeben. Um die angestrebte Feinheit garantieren zu können, werden zu große Körner nach Durchlaufen der Mühle in einem Sieb ausgeschieden und der Mühle erneut zugeführt.

Der Verkauf und Versand des fertigen Zements erfolgt überwiegend in Silofahrzeugen. Nur 8 Prozent des Gesamtverkaufs wird über Sackware getätigt, weshalb eine Abfüllung in Säcke auch ausschließlich in Rohrdorf möglich ist.

Energieverbrauch und Energieeffizienz

Der Ablauf bis zum endgültigen Produkt der Zementherstellung ist energetisch sehr aufwändig, so verbrauchen die 54 deutschen Zementwerke ca. 100 Kilowattstunden pro Tonne Zement (3,5 Terawattstunden jährlich). Darüber hinaus benötigen einige Schritte einen sehr hohen thermischen Energieaufwand wie beispielsweise die Sinterung bei 1450 °C, welcher mittels Brennstoffen umgesetzt wird und hiermit den größten Teil des Energieverbrauchs einnimmt.

Aus politischer, globaler und aus wirtschaftlicher Sichtweise versucht man die Energieeffizienz stetig zu erhöhen. Das ermöglicht gleichzeitig eine Senkung der CO₂-Emissionen, der Kosten und des Ressourcenverbrauchs. Der spezifische Brennstoffbedarf konnte seit 1950 um ca. 60 Prozent auf 2800 Kilojoule pro Kilogramm Zement reduziert werden und wird nahezu als theoretische mögliche Grenze festgelegt. Umgesetzt wird dies durch verfahrenstechnische Verbesserungen wie beispielsweise ein Wärmetauscheranlage -(Kraftwerk) oder ein innovativer Mahlprozess und Verfahren.

Die Rohrdorfergruppe ist Vorreiter in der energetischen Ausnutzung des Zementwerkes und baute somit das erste deutsche Kraftwerk, das die bei der Zementherstellung entstehenden heißen Rauchgase zur Stromerzeugung nutzt. Das Abhitzekraftwerk mit einer Wärmerück-

gewinnungsanlage wurde durch ein Konsortium aus der Siemens-Division Industry Solutions und Kawasaki Plant Systems, Ltd. 2012 realisiert. Das Kraftwerk deckt ca. ein Drittel des Strombedarfs des Zementwerks. Somit kann mehr als 30 Prozent der sonst ungenutzten Abwärme in den Energiekreislauf zur weiteren Nutzung zurückgeführt werden.

Das Prinzip der Anlage beruht darin, dass künftig Strom aus der Abgaswärme des Drehrohrofens, des Klinkerkühlers und der Restwärme vom Abgaskamin erzeugt wird. Darüberhinaus könnte zusätzlich die Abwärme eines Chloridbypasses künftig mit eingebunden werden. Zusammenfassend wird diese Anlage als innovativ, umweltfreundlich und hocheffizient deklariert und durch das Bundesumweltministerium im Rahmen des Umwelt-Innovationsprogramms gefördert. Die Leistung beträgt ca. 6,8 Megawatt rund 50.000 Megawattstunden elektrische Energie pro Jahr. Das entspricht einem Stromverbrauch von etwa 34.600 Personen oder ca. 16.400 Haushalten. Durch die Stromrückgewinnung aus industrieller Abwärme kann die Emission von CO₂ pro Jahr von ca. 31.500 Tonnen eingespart werden. Somit wird eine Erhöhung der Energieeffizienz der Produktion und eine Senkung des CO₂-Ausstoß erzielt.

Des Weiteren liegt das Bestreben darin, fossile Brennstoffe vermehrt durch alternative Brennstoffe wie Altholz, Altreifen, Altöl, Klärschlamm, Kunststoff- sowie Produktions- und Gewerbeabfälle zu ersetzen. Hierdurch können Rückstände (Abfallprodukte) ohne weitere Verwendung sinnvoll in die Kreislaufwirtschaft zurückgeführt und nochmals verwertet werden. Es kann dementsprechend natürliche Ressourcen sowie Eingriffe in die Natur schonen oder zumindest reduzieren. Am Beispiel des Zementwerks Rohrdorf werden für die thermischen Prozesse hauptsächlich ca. 80 Prozent alternative Brennstoffe wie Altreifen, Dachpappe oder Papierfasern wieder- bzw. weiterverwertet. Der energetische Wirkungsgrad in modernen Zementwerken beträgt heute um die 70 Prozent. Aus technisch-physikalischer Sicht kann dies kaum noch erhöht werden.

Umweltverträglichkeit - Zementproduktion

Während des Prozesses der Zementproduktion fällt nicht nur das klimaschädliche Gas CO₂ an, sondern werden zuzüglich noch Rauchgase wie Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxid (NO_x) emittiert. Diese schadhaften Abgase sind unter anderem für das Vorkommen des "Sauren Regens" bekannt und verantwortlich. Diese Stickoxide werden mittels sogenannter SCR-Anlagen gefiltert. "SCR" bedeutet selective catalytic reduction und heißt übersetzt selektive katalytische Reduktion.

Das Rohrdorfer Zementwerk hat eine moderne Anlage für den beschriebenen Zweck im Jahr 2011 realisiert und ist damit auf dem neuesten Stand der Technik in Bezug auf die Rauchgasfilterung. Das Projekt der SCR-Anlage betrug in seinem kompletten Umfang ca. 30 Mio. € und trägt ausschließlich dem Aspekt des Umweltschutzes bei. Es werden dadurch keine wirtschaftlichen Prozesse gesteigert, verbessert oder optimiert.

Durch diese Säuberung entstehen die Produkte Wasser (H₂O) und Stickstoff (N₂). Dadurch kann die Stickoxidemissionen erheblich gesenkt werden und unterstützt damit den Aspekt einer Entlastung der Umwelt durch Schadstoffe.

5. Veranstaltungen

5.1 12. Münchener Baustoffseminar

Panta Rhei - Rheologie des Frischbetons



Bild links: Fließmaßversuch
Bild rechts: Beton fließend
Fotos: Heike Geigl

Am 27. März 2014 kamen erneut zahlreiche Vertreter aus Hochschule, Wirtschaft und Verwaltung zusammen, um sich über die neuesten Werkstoffentwicklungen im Bauwesen zu informieren. Das mittlerweile 12. Baustoffseminar des Centrums Baustoffe und Materialprüfung stand diesmal unter dem Motto „Panta Rhei – Rheologie des Frischbetons, optimiert und modelliert“.

Panta Rhei (Heraklit) - Dieser aus der griechischen Philosophie entlehnte Ausdruck beschreibt in anschaulicher Weise den Grundsatz der Rheologie: Alles fließt und bewegt sich. Dies gilt in besonderer Weise für den Frischbeton. Bevor der Beton seine tragenden, umhüllenden und gestalterischen Funktionen erfüllen kann, muss er im frischen Zustand verarbeitet und in Form gebracht werden. Der Frischbeton stellt eine hochkonzentrierte Suspension aus Wasser und Feststoffpartikeln von wenigen μm bis zu mehreren mm dar und vereint die viskosen Eigenschaften einer Flüssigkeit mit den elastischen Eigenschaften eines Festkörpers. Infolge der Hydratationsreaktion des Zements und des damit einhergehenden thixotropen Strukturaufbaus weisen die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons zudem eine starke Abhängigkeit von der Zeit und der Scherbelastung auf. Der Frischbeton besitzt somit das komplexe Materialverhalten eines viskoelastisch-thixotropen Werkstoffs welches die Verarbeitungseigenschaften während des Transports, des Pumpens, der Befüllung der Schalung, des Verteilens und der Verdichtung bestimmt.

Durch die gezielte Variation der Betonzusammensetzung ist es möglich, die rheologischen Parameter Viskosität, Fließgrenze und Thixotropie zu beeinflussen und damit die Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons zu optimieren. Dadurch können Stoffkosten reduziert und die Anwendungssicherheit während der Verarbeitung des Frischbetons deutlich erhöht werden. Durch die Entwicklung von Betonen mit erweiterten rheologischen Eigenschaften, wie Fließfähigkeit oder Selbstverdichtungsvermögen, eröffnen sich zudem neue Anwendungsfelder.

In diesem Sinne wurden im Rahmen des Münchener Baustoffseminars 2014 die Aspekte aus Forschung und Entwicklung mit den Fragestellungen der Anwendung und Praxis verknüpft.



Frischbetonrheologie - Von der Konsistenz zu den interpartikulären Wechselwirkungen

Dirk Lowke

Hochleistungsbetone gehören zu den wichtigsten Entwicklungen der Betontechnologie der letzten Jahre. Dabei werden immer höhere Anforderungen sowohl an die Frisch- als auch an die Festbetoneigenschaften gestellt. Hinsichtlich der Festbetoneigenschaften liegt der Fokus vor allem auf einer Erhöhung der Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften, während bei den Frischbetoneigenschaften vor allem eine hohe Fließfähigkeit, leichte Verdichtbarkeit oder gar die Fähigkeit sich selbst zu entlüften angestrebt werden. Die verbesserten Frischbetoneigenschaften erleichtern die Verarbeitung erheblich und verkürzen gleichzeitig die Einbauzeiten. Zudem geht damit eine deutliche Reduzierung von Verarbeitungsfehlern einher, was ebenfalls zu einer Erhöhung der Dauerhaftigkeitseigenschaften beiträgt. Auf der anderen Seite können höhere Fließfähigkeiten jedoch zu einer Erhöhung des Schalungsdrucks sowie der Gefahr einer ungenügenden Mischungsstabilität führen. Daher bedarf es einer genauen Abstimmung der Fließfähigkeit der verwendeten Hochleistungsbetone unter besonderer Berücksichtigung der Randbedingungen des herzustellenden Bauteils.

Im Beitrag von Herrn Lowke wurden die angesprochenen Fragestellungen grundlegend behandelt. Zunächst wurden die theoretischen Grundlagen der Rheologie von Betonen sowie der interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen besprochen. Anschließend wurde gezeigt, durch welche betontechnologischen Maßnahmen die rheologischen Eigenschaften gezielt gesteuert werden können und wie dies auf Basis der interpartikulären Wechselwirkungen begründet werden kann.



Praxisorientierte Optimierung der rheologischen Eigenschaften von UHPC

Christoph Gehlen

Ultra-Hochfeste Betone (UHPC) zeichnen sich in erster Linie durch ihre sehr hohe Festigkeit sowie die sehr guten Dauerhaftigkeitseigenschaften auf. Möglich wird dies durch sehr geringe w/z-Werte und hohe Anteile mehlfeiner Zusatzstoffe. Zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften werden daher in der Regel hohe Gehalte an Fließmitteln verwendet. Diese können insbesondere die Fließgrenze deutlich reduzieren. Die Viskosität bleibt hingegen sehr hoch, was mit einer schlechten Verarbeitbarkeit und Entlüftungsfähigkeit des Betons einhergeht.

Der Beitrag beschäftigte sich mit der Rheologie Ultra-Hochfester Betone. Zum einen wurden Mindestanforderungen an die plastische Viskosität und die Fließgrenze der UHPC festgelegt, um eine ausreichende Formfüllung in Abhängigkeit der geometrischen Randbedingungen wie minimaler Bauteilquerschnitt und Schlankheit eines Bauteils sicher zu gewährleisten. Zum anderen wurde gezeigt, wie die Rheologie eines UHPC gezielt durch die Wahl der Zusatzstoffe beeinflusst werden kann, um ein optimiertes Formfüllungsvermögen zu erreichen. Zu diesem Zweck wurden Untersuchungen zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften im Rotationsrheometer mit Formfüllungsversuchen in charakteristischen Modellschalungen kombiniert.

Zielsichere Optimierung des Pumpens von Frischbeton - material- und prüftechnische Aspekte

Viktor Mechtcherine

Pumpen von Beton ist heute ein weit verbreitetes und effektives Verfahren in der Transportbetonindustrie. Das Pumpen ermöglicht die effiziente Förderung großer Frischbetonmengen über größere Distanzen und in große Höhen. Dennoch existieren für die Beurteilung der Pumpbarkeit von Frischbeton bislang keine normativen Regelungen, in denen die Anforderungen an die rheologischen Eigenschaften festgeschrieben sind. Ebenso gibt es bisher keine fundierten Konzepte für die Anpassung des Betonentwurfs an die Anforderungen der Pumpbarkeit. Im Beitrag wurde ein Überblick über material- und prüftechnische Ansätze für eine zielsichere Optimierung des Pumpens von Frischbeton vorgestellt. Einen zentralen Platz nimmt hierbei das Gleitrohr-Rheometer ein, ein neu entwickeltes Gerät, welches eine zielsichere und praxisnahe Einschätzung der Pumpbarkeit von Frischbeton ermöglicht. In seinen Ausführungen hat Herr Mechtcherine festgestellt, dass für eine zielsichere Gestaltung sowie für einen reibungslosen Ablauf von Betonpumpprozessen vertiefte Kenntnisse der Zusammenhänge zwischen Betonzusammensetzung, technologischen Parametern, Umweltbedingungen einerseits und der Rheologie von konventionellen und neuartigen Betonen andererseits unumgänglich sind. Für eine zutreffende experimentelle Beschreibung der Betonförderprozesse in Rohrleitungen sind systemadäquate rheologische Messverfahren und Geräte wie das Gleitrohr-Rheometer unentbehrlich. Auf Grundlage von Messungen mit diesem Gerät können analytische und numerische Modelle für den Betonfluss parametrisiert werden und beim Verständnis der Vorgänge beim Pumpen von Beton helfen. Die Gesamtheit dieser Erkenntnisse soll es ermöglichen, Empfehlungen zur Gestaltung von Betonpumpen und der zugehörigen Fördertechnik zu formulieren, mit dem Ziel, ein erweitertes Spektrum an normgerecht hergestellten Normal- und Sonderbetonen durch Pumpen zielsicher fördern zu können.



Verdichtbarkeit und Stabilität Leichtverarbeitbarer Betone

Thomas Kränkel

Für eine ausreichende Entlüftung bei gleichzeitig hoher Mischungsstabilität leichtverarbeitbarer Betone (LVB) bedarf es i.d.R. lediglich geringer Verdichtungsleistungen. In der Baupraxis bleibt bei der Wahl dieser Verdichtungsleistung jedoch die Viskosität des Frischbetons gänzlich unberücksichtigt. Gerade diese spielt jedoch während des Verdichtens sowohl hinsichtlich des Entlüftungs- als auch des Sedimentationsverhaltens eine entscheidende Rolle. In dem Beitrag wurden die grundlegenden Zusammenhänge zwischen der plastischen Viskosität von LVB sowie dem Entlüftungsverhalten und der Mischungsstabilität während der Verdichtung vorgestellt. Die vorgestellten Untersuchungen belegten den direkten Zusammenhang zwischen der plastischen Viskosität von LVB und deren Entlüftungs- sowie Sedimentationsverhalten während der Verdichtung. Niederviskose Mischungen entlüften bereits bei geringer Verdichtungsleistung, hochviskose Mischungen weisen dagegen eine gesteigerte Robustheit gegen Überverdichtung auf. Die Untersuchungen legen die Basis, um exakte Empfehlungen hinsichtlich einer auf den jeweiligen LVB angepassten Verdichtung abzugeben. Diese Empfehlungen beziehen sich dann nicht mehr nur auf die Konsistenz der LVB, sondern berücksichtigen auch deren Viskosität. Dieses Vorgehen ist nötig, um auf der Baustelle zielsicher einen ausreichend entlüfteten, jedoch mischungsstabilen LVB einsetzen zu können.





Zemente und Zusatzstoffe – aktuelle Entwicklungen

Detlef Heinz

Beton ist der mit Abstand wichtigste Baustoff unserer Zeit. Das drückt sich in einem aktuellen weltweiten Verbrauch von ca. 5 Mrd. m³ pro Jahr aus. Entsprechend hoch sind die Verbrauchsmengen der Betonausgangsstoffe, deren Produktion in unterschiedlichem Maße auch zu regionalen und überregionalen Umweltbelastungen führt. Als bisher unverzichtbares, rohstoff- und energieintensives Ausgangsprodukt der erforderlichen Bindemittel für den Beton kommt dabei dem Zementklinker eine besondere Bedeutung zu. So werden etwa 5% der weltweiten anthropogenen CO₂-Emissionen der Zementproduktion zugeschrieben, mit einem wesentlichen Anteil aus der Klinkerproduktion. Für Deutschland liegt der Anteil der CO₂-Emissionen der Zementproduktion an der Gesamtemission etwa bei 3%. Es fehlt daher nicht an Initiativen zur Minderung des Klinkeranteils in den Zementen oder auch in den Betonen, insbesondere durch den Einsatz von inerten oder reaktiven Bindemittelkomponenten, Englisch SCM Supplementary Cementitious Materials, die als Zementbestandteil oder Betonzusatzstoff eingesetzt werden. Die geschilderten Entwicklungen bei Zement und Beton lassen in Bezug auf die gewünschten rheologischen Eigenschaften von Frischbeton einen zunehmenden Zielkonflikt zwischen dem Erreichen der Anforderung zur Verminderung des W/B-Wertes zur Erzielung einer bestimmten Festigkeit und Dauerhaftigkeit durch Einsatz von Fließmitteln und deren Nutzung zur Sicherstellung der Frischbetonverarbeitbarkeit erkennen. Die Dynamik und auch die Richtung der künftigen Entwicklung werden bestimmt durch die weiteren Anstrengungen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Betonproduktion und die Verfügbarkeit geeigneter Zusatzstoffe und Fließmittel. Dabei werden auch neue Komponenten wie z.B. calcinierte Tone oder Kalksteine mit geringerem Calciumcarbonatgehalt bei den Zusatzstoffen oder z.B. Sulfoaluminat-basierte Zemente bei den Bindemitteln eine noch zu definierende Rolle spielen. In beiden Bereichen wird sich das cbm durch weitere aktive Forschung einbringen.



Optimierte Fließmittel zur Rheologiesteuerung besonders wasserarmer Betone

Johann Plank

Mit der Erfindung der Polycarboxylatether (PCEs) im Jahre 1981 durch die Firma Nippon Shokubai begann eine stürmische Entwicklung auf dem Gebiet der Betonfließmittel. Sie führte dazu, dass es heute neben den Methacrylsäureester-basierten PCEs noch zahlreiche andere chemische PCE-Varianten gibt, u.a. auf Basis von Allyl-, Methallyl-, Isoprenyl- und Vinyl-Ethern. Trotz ihrer großen stofflichen Vielfalt zeigen alle PCEs sehr gute Verflüssigungswirkung gerade in wasserarmen Betonen. Darin übertreffen sie die Stoffklasse der Polykondensat-Fließmittel deutlich. Bei der Ausprüfung von PCE-Fließmitteln mittels Ausbreitmaß an Mörteln mit w/z-Werten < 0.40 beobachtet man, dass diese Mörtel zwar ein hohes finales Ausbreitmaß erreichen, jedoch ein sehr langsames, kriechendes Fließverhalten aufweisen. Derartige Mörtel und auch Betone fließen honigartig und wirken sehr klebrig. Der Effekt ist umso stärker, je niedriger der Wasser-zu-Zement-Wert ist. Das rheologische Verhalten dieser Betone ist z.B. hinsichtlich ihrer Verpumpbarkeit, der Entleerungsgeschwindigkeit aus einem Krankübel und der Verteilung beim Einbringen in Schalungen mit engmaschiger Bewehrung äußerst nachteilig. Ziel der beschriebenen Untersuchungen war es herauszufinden, ob speziell zusammengesetzte PCE-Fließmittel ein rasches Fließverhalten des Mörtels oder Betons erzeugen können, und wie derartige Moleküle chemisch aufgebaut sein müssen. Zu diesem Zweck wurde eine Auswahl an MPEG-, APEG- und IPEG-PCE-Fließmitteln gezielt synthetisiert und sowohl ihre generelle Verflüssigungswirkung als auch die Fließgeschwindigkeit mittels Mörtelausbreitmaß am Hägermann-Tisch,

in der Fließrinne sowie am Auslaufrichter untersucht und verglichen. Herr Plank kam zu dem Schluß, dass sich PCE-Fließmittel hervorragend zur Verflüssigung besonders wasserarmer Betone eignen. Unter ihnen gibt es jedoch nur wenige, die dem Beton neben einer guten Verflüssigung gleichzeitig ein rasches Fließvermögen verleihen. Dazu sind nur besonders hydrophile PCE-Moleküle mit hohem HLB-Wert in der Lage. Dieser kann anhand der molekularen Zusammensetzung sehr einfach nach der Methode von Griffin berechnet werden. Ist die Molekülstruktur nicht bekannt, kann die Wirkung eines PCE-Produkts auf die Fließgeschwindigkeit von Mörtel/Beton durch Rotationsviskosimetrie anhand des Wertes für die plastische Viskosität eines einfachen Zementleims bestimmt werden. Auf diese Weise optimierte PCE-Moleküle weisen deutliche Vorteile auf. Sie erlauben insbesondere ein rascheres Entleeren von Beton aus Schütttrichtern, sowie ein schnelleres Einbringen und Verteilen in komplizierten Schalungen.

Zum Formfüllungsvermögen dünnwandiger Schalungen – Experiment und Simulation

Sandy Illguth

Insbesondere bei dünnwandigen, gekrümmten Schalungen ist es mitunter schwierig, diese komplett und in angemessener Zeit durch Beton auszufüllen. Kommt zudem ein zäher Hochleistungsbeton für das Bauteil zum Einsatz, kann die Formfüllung unter Umständen nicht mehr gewährleistet werden. Umso wichtiger wird es, eine Methode zu haben, mit der es möglich ist, das Fließverhalten des Betons und damit den Füllungsgrad der Schalung vorhersagen zu können.

Im Beitrag wurde die Methode der numerischen Strömungsmechanik (engl. CFD - Computational Fluid Dynamics) vorgestellt, die es ermöglicht, den Fließvorgang von Beton zu simulieren. Dafür ist es notwendig, die für die Simulation notwendigen rheologischen Eingangsparameter vorab in einem Experiment möglichst genau zu bestimmen. Dazu wurde eine Methode entwickelt, mit der es möglich ist, aus experimentell ermittelten Daten Eingangsparameter für die Simulation zu bestimmen. Mit der hier vorgestellten Methode ist es nunmehr möglich, das Fließverhalten von feinkörnigen ultrahochfesten Betonen in einer L-förmigen Modellschalung vorherzusagen.



Zerstörungsfreie Prüfmethode zur Beobachtung rheologischer Prozesse bei Frischbeton

Christian U. Große

Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Untersuchung rheologischer Eigenschaften von zementgebundenen Materialien zielen auf verschiedene Fragestellungen. So steht bei vielen Praxisanwendungen die Verarbeitbarkeit einer Betonmischung im Vordergrund bzw. die Bestimmung des Erstarrungsanfangs und des Erstarrungsendes. In dem Zusammenhang ist es interessant, dass die messtechnischen Möglichkeiten hier nicht voll ausgeschöpft werden und die angewendeten Verfahren entweder nicht zerstörungsfrei arbeiten oder nur rudimentäre Informationen über die ablaufenden rheologischen Prozesse liefern. Beispiele für diese etablierten Methoden sind die Ermittlung von Erstarrungsanfang und -ende bei Zementleim mit dem Vicat-Nadel-Versuch (DIN EN 196-3), Penetrationsverfahren nach ASTM C-403 für Beton oder die derzeit üblichen Rheometer. Der wesentliche Nachteil der meisten etablierten Verfahren ist, dass sie nur eine Momentaufnahme der Werkstoffeigenschaften ergeben und sich mit ihnen der Hydratationsverlauf nicht kontinuierlich untersuchen lässt. Zuverlässige zerstörungsfreie Aussagen, z. B. über die Wirkungsweise von Betonzusatzmitteln wie Verflüssiger, Luftporenbildner oder Beschleuniger, können mit diesen Verfahren



in der Regel nicht gewonnen werden. Notwendig wären Verfahren, die Daten auf der Basis von bekannten physikalischen, rheologischen oder chemischen Gesetzmäßigkeiten gewinnen und in der Lage sind, den Erstarrungs- und Erhärtungsvorgang möglichst kontinuierlich zu verfolgen. Nur so können die aktuellen Ansprüche im Betonbau oder der Zusatzmittelinindustrie für die Herstellung von Betonwaren erfüllt werden. Zusammenfassend erklärte Herr Große, dass mit Ultraschallverfahren detaillierte Informationen über rheologische Prozesse kontinuierlich gewonnen werden können. Außerdem ist es durch die kombinierte P- und S-Wellenmessung möglich, elastische Materialparameter direkt zu bestimmen. Dabei erlauben verschiedene Signalanalyseverfahren die weitgehende Automatisierung der Messdurchführung, was neben dem verminderten Aufwand sehr gut reproduzierbare Ergebnisse liefert. Mit der kombinierten Kompressions- und Scherwellenprüfung steht ein zuverlässiges Untersuchungsverfahren zur Verfügung, welches differenzierte Materialanalysen, z. B. zur Wirkungsweise von Betonzusatzmitteln, ermöglicht.

5.2 Betriebsausflug 2014

Tunnel Luise-Kiesselbach-Platz (Mittlerer Ring Süd West), Hohenpeißenberg und Kloster Wessobrunn

Florian Hiemer (Fotos: D. Heinz, K.-H. Kreft, C. Liedtke)

Der Betriebsausflug am 24. September 2014 fing für die meisten Interessierten dieses Mal bereits deutlich früher an. Ursprünglich sollten alle Teilnehmer bei der Besichtigung der Baustelle am Luise Kiesselbach Platz Sicherheitsschuhe, Helm und eine Warnweste tragen und mussten sich um deren Organisation auch eigenständig kümmern. Diese strenge Auflage konnte nach Rücksprache mit den Verantwortlichen zur Erleichterung Aller noch kurzfristig ein wenig entschärft werden, und so war eine Teilnahme an der „Tunneltour“ auch mit festem Schuhwerk möglich.

Für die Frühaufsteher der Ausflugsgruppe startete der Tag bereits um 7 Uhr morgens mit einem ausgiebigen Frühstück im Institut. Wer lieber etwas länger im Bett bleiben wollte, konnte mit den Überbleibseln des Buffets oder einer Tasse Kaffee auf der etwa halbstündigen Fahrt zum Luise-Kieselbach-Platz den Tag gemütlich starten.

Pünktlich um 8.15 Uhr angekommen, konnten wir uns über einen interessanten Infovortrag zur derzeit wohl bekanntesten Baustelle im Münchner Stadtbereich freuen. Herr Robert Bauer, der Projektleiter der ARGE Tunnel LKP, war während der gesamten Baumaßnahme involviert und konnte daher mit sehr ausgiebigen Informationen und einigen witzigen Anekdoten glänzen.

Bild 1:
links: Auf „Tunneltour“ mit dem
Projektleiter;
rechts: Die cbm-Ausflügler in
ihrer PSA



Bei dem Tunnel am Luise-Kieselbach-Platz handelt es sich um den dritten und letzten Teil des 1996, durch einen Bürgerentscheid von den Münchner Bürgern geforderten Ausbaus des Mittleren Rings. Die Ausbaustrecke ist annähernd drei Kilometer lang und neben den normalen Tunnelabschnitten in Deckelbauweise mit Bohrpfahlwänden gibt es einen offenen Bereich sowie einen Knotenpunkt, der über zwei Ebenen realisiert wurde. Startschuss für das Projekt war im Jahr 2007, die gesamte Maßnahme sollte sich über einen Zeitraum von 10 Jahren erstrecken. Herr Bauer hob allerdings hervor, dass das Projekt als eines der wenigen Bauvorhaben heutzutage sogar vor dem geplanten Fertigstellungstermin beendet werden konnte. Die Verkehrsfreigabe ist daher bereits für die zweite Jahreshälfte 2015 geplant. Aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens auf dem betroffenen Streckenabschnitt musste dieser zudem durchgehend befahrbar bleiben. Durch eine penible Planung der Verkehrsführung konnte dies, sogar für Fußgänger und Radfahrer, auch gewährleistet werden. Für viel Freude beim Projektleiter sorgte außerdem ein kleines Kätzchen, das, nachdem es eines Morgens im Tunnelrohbau gefunden wurde, in seiner Familie ein gemütliches Zuhause gefunden hat.

Nach der Besichtigung des Tunnels fanden wir uns wieder im zweistöckigen Reisebus ein, um uns bei mittlerweile strahlendem Sonnenschein auf den Weg zum Hohenpeißenberg zu machen. Auch wenn zwischendurch kurz Verunsicherung herrschte, ob ein so großer Bus wirklich auf den engen und kurvigen Straßen zum Berggipfel fahren sollte, überzeugte uns ein routinierter Busfahrer vom Gegenteil und brachte alle sicher und pünktlich zur Wirtschaft. Es blieb sogar genug Zeit um den Hohenpeißenberg zu erkunden und das traumhafte Alpenpanorama zu genießen.

Neben dem wundervollen Ausblick über das Alpenvorland und den Pfaffenwinkel lockt die Wallfahrtskirche Mariä Himmelfahrt täglich zahlreiche Ausflügler auf den „Bayerischen Rigi“. Auf dem knapp 1000 Meter hohen Berg befindet sich auch die wohl älteste Wetterstation der Welt, in der seit 1781 fast ununterbrochen meteorologische Beobachtungen systematisch festgehalten werden.

Soviel frische Bergluft machte uns doch sehr hungrig und so fanden wir uns alle im Gasthof „Bayerischer Rigi“ zum herzhaften Mittagessen bei Panoramablick ein. Nachdem alle Mägen gefüllt und die letzten Dessertgläser abgeräumt waren, war leider nur noch ein kurzer Besuch der Toilette möglich, bevor wir die Reise in Richtung Wessobrunn fortsetzten. Für die Führung durch den Prälatentrakt des Klosters Wessobrunn wurden die 54 Ausflüge-



Bild 2:
Rundblick über den Pfaffen-
winkel vom „Bayerischen Rigi“

nehmer dann in zwei Gruppen unterteilt. Herr Langer erzählte, dass der Legende nach das Kloster von Tassilo III. gestiftet wurde, nachdem er bei einer Jagd eine Nacht im Rottwald verbringen musste. Es heißt, er hatte einen Traum in dem ihm der hl. Petrus über drei sich kreuzenden Quellen erschien. Als am nächsten Tag diese Quellen gefunden wurden, ließ er an der Stelle das Kloster zu Ehren des hl. Petrus errichten.

Bekannt ist das Kloster vor allem aufgrund der zahlreichen, aufwendigen Stuckarbeiten. Die Stuckateure und Baumeister aus Wessobrunn waren in ganz Europa geschätzt und bekannt und vor allem in der Zeit des Barocks und des Rokokos äußerst gefragt. Außerdem wurde hier lange Zeit das bekannte "Wessobrunner Gebet" aufbewahrt, welches als ältester erhaltener Text in deutscher Sprache gilt. Inzwischen wurde das Kloster an eine Unternehmerin verkauft, die dort unter anderem die Produktion ihrer Naturkosmetik einrichten möchte. Nach der Führung bestand für uns noch die Möglichkeit, das Klostergelände mitsamt den in der Legende erwähnten Quellen, der Tassilolinde und der Kirche zu erkunden. Einige fanden sich auch direkt wieder am Bus ein, wo wir uns bei einem gemütlichen Umtrunk an der frischen Luft auf die Heimreise vorbereiteten. Auf der Heimfahrt konnten wir bei entspannter Stimmung nochmal den gelungenen Tag Revue passieren lassen.

Bild 3:
links: Römerturm des Klosters
Wessobrunn; rechts: Bewun-
derung des Deckenstucks



Ich bedanke mich bei allen fleißigen Helfern, die mich bei der Vorbereitung so tatkräftig unterstützt haben, ganz besonders bei Frau Deuerling. Ein herzliches Dankeschön gilt auch Herrn Bauer, der uns einen hervorragenden Blick hinter die Kulissen dieses einzigartigen Bauvorhabens geben konnte. Ebenso danke ich Herrn Langer für die detailreichen Ausführungen rund um das Kloster Wessobrunn.

5.3 Antrittsvorlesung von Prof. Steven D. Glaser

Auf Vorschlag des Lehrstuhls für Zerstörungsfreie Prüfung und der Fakultät Bau Geo Umwelt wurde Prof. Steven D. Glaser zum „TUM Distinguished Affiliated Professor“ ernannt. Steve Glaser ist seit 1996 Professor an der University of California in Berkeley (USA), Dept. of Civil and Environmental Engineering, und seit 1997 Mitglied des Lawrence Berkeley National Laboratory. Seit 2001 ist er Mitglied des Intel Berkeley Laboratory und seit 2002 Leiter des Bereichs „Intelligent Infrastructure“ des „Center for Information Technology Research in Service to Society“ (CITRIS). Dieses Zentrum forciert den Systemgedanken im Bauingenieurwesen und bringt die konstruktiven Bauingenieurbereiche zusammen mit den Bereichen Infrastruktur, Geotechnik und Monitoring bzw. Zerstörungsfreie Prüfung. Prof. Glaser promovierte 1990 an der University of Texas in Austin im Bauingenieurwesen (Geotechnical Engineering). Von 1994 bis 1996 war er Assistent Professor für Zerstörungsfreie Prüfung an der Colorado School of Mines in Golden, Colorado. Seine Themen reichen vom „klassischen Bauingenieurwesen“ und der Ingenieurgeologie bzw. Geotechnik über die Zerstörungsfreie Prüfung und die Dauerüberwachung zu Themen aus den Bereichen Umwelt und Denkmalschutz sowie der Messtechnik und sogar der Medizintechnik. So entwickelte er Monitoringsysteme für die Erkennung und Ausdifferenzierung von Parkinson ebenso wie

für die Untersuchung der Umwelteinflüsse im Hinblick auf die Schneeschmelze in den kalifornischen Bergen („Intelligent Water Infrastructure“). Er interessiert sich für Bruchprozesse in Gestein ebenso wie für die Untersuchung von seismischen Vorgängen (Erdbeben) im Erdinneren sowie die Geothermie und die CO₂-Sequestrierung. Er entwickelt neue Datenverarbeitungsalgorithmen ebenso wie Miniatorsensoren für drahtlose Sensornetze. Zu seinen aktuell wichtigsten Arbeiten zählen die Entwicklung eines absolut kalibrierten Schallemissionsensors für die Messung kleinster Erschütterungen sowie die Weiterentwicklung von Miniatorsensorknoten für die Dauerüberwachung von Bauwerken und geologischen Strukturen. Er ist Mitglied im Expertenteam, welches die Golden Gate Brücke mit Miniatorsensoren ausgerüstet hat und wurde 2010 der erste TÜV Süd Gastprofessor unserer Universität und damit Fellow des Institute of Advanced Studies (IAS) der TU München.

Am 14. Oktober 2014 fand im feierlichen Rahmen des Vorhoelzer Forums am Stammgelände der TU München die Antrittsvorlesung von Prof. Glaser statt. Nach der Begrüßung durch den neuen Dekan der Fakultät Bau Geo Umwelt, Prof. Dr. Roland Pail, und einer Ansprache des Präsidenten Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Wolfgang Herrmann hielt Prof. Glaser einen Vortrag mit dem Titel „Wireless in the woods – building an intelligent water information system“. Der anschließende Sektempfang fand bei bestem Wetter auf der Terrasse des Vorhoelzer Forums statt.



Bild:
Prof. Glaser

5.4 Tag des Lehrstuhls am 10.01.2014

Zum zweiten Mal veranstaltete der Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung am 10.1.2014 einen „Tag des Lehrstuhls“. Eingeladen waren neben den cbm-Mitarbeitern, Diplomanden und Hiwis auch alle externen Doktoranden sowie die Studierenden im Menteeprogramm der Munich School of Engineering, die von Prof. Große betreut werden. Etwa 35 Personen verfolgten zunächst die Präsentationen aus den einzelnen Projektbereichen und nutzten anschließend die Gelegenheit, sich die Einrichtungen und ZfP-Geräte des Lehrstuhls anzusehen. Die Veranstaltung wurde durch ein Buffet ergänzt, was Möglichkeiten zur vertieften Diskussion über die Projekte und zur Vernetzung bot.

Bild 6:
Interessierte Zuhörer folgen der
Vorstellung der Forschungs-
arbeiten.



Bild 7:
Der ZfP-Lehrstuhl
präsentiert sein Labor.





Bild:
Die Läufer des cbm sind
namentlich gekennzeichnet.

5.5 Firmenlauf 2bRUN

Am 15.07.2014 startete eine große Gruppe der TU München beim Münchener Firmenlauf 2bRUN. Unter den vielen Tausend Startern befand sich auch eine 15-köpfige Truppe des cbm. Auf dem Foto fehlen Annette Franke, Dirk Lowke und Max Müller.

5.6 International Conference EuroCoalAsh 2014



EUROCOALASH 2014

Vom 13. – 15. Oktober fand im Oskar von Miller Forum in München die Internationale Konferenz EuroCoalAsh statt. Das cbm der TU München, Fachgebiet Gesteinshüttenkunde, war bei dieser Tagung Mitorganisator.

Der Tagung vorangestellt wurde ein Forschungsworkshop, der sich mit dem Thema „Dauerhaftigkeit von Flugaschebetonen“ auseinandersetzte. Ziel dieses Workshops war es junge Wissenschaftler zusammenzubringen, die sich in diesem Rahmen über laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben austauschen konnten und so ein europaweiter Wissenstransfer ermöglicht wurde. Einführende Worte zur Flugascheforschung sprach der Organisator Dr.-Ing. Hans-Joachim Feuerborn (ECOBA / VGB Power Tech). Die Vorträge des Workshops handelten von der Problematik eines Sulfatangriffs, chloridinduzierter Stahlkorrosion sowie einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) und den Möglichkeiten mit flugaschehaltigen Betonen diese Schadensfälle zu vermeiden. Darüber hinaus wurden mögliche Prüfzenarien erörtert. Weitere Vorträge handelten von der Beurteilung der Reaktivität von Flugaschen mittels Oberflächencharakterisierungen sowie den Einsatzgebieten kalkreiche Flugaschen. Die langjährigen Erfahrungen zu Flugaschebetonen im Hinblick auf eine schädigende AKR, die in den letzten 12 Jahren am cbm gesammelt wurden, wurden von Kai Fischer, M.Sc. und Dr.-Ing. Anne Dressler vorgestellt.

Anschließend an den Workshop begann die Tagung, die mit der Begrüßung durch Dipl.-Ing. Hubertus Dünschede (VGB Power Tech), Fernando Caldas-Vieira (Präsident der ECOBA) und Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz (cbm, TU München) eingeleitet wurde. Die Fachbeiträge überspannten das weite Feld der aktuellen Flugaschethematik sowohl in der Forschung als auch in der praktischen Anwendung. Sie handelten von der Reaktivität und der Aktivierung von Flugaschen, dem Einsatz in Zement, Beton, keramischen Produkten und Spezialbindemitteln. Zusätzlich wurden gesetzliche Bestimmungen verschiedener Länder erörtert. Auch zukünftige Untersuchungsmethoden sowie die Bewertung umweltrelevanter Aspekte flugaschehaltiger Produkte wurden besprochen.

In den Pausen fand die Poster Session statt, an der sich auch Kai Fischer, M.Sc., Ying Wang, M.Sc. und Dr.-Ing. Anne Dressler mit ihren jeweiligen Forschungsschwerpunkten beteiligten. Der gesellige Abend wurde im Augustiner Keller in München mit einem zünftigen bayrischen Essen und der dazugehörigen Musikunterhaltung ausgerichtet.

Zwischen den ca. 70 Teilnehmer aus 16 europäischen Staaten, aber auch aus der Türkei, Russland, Korea, Japan, Indien, Südafrika und den USA, die in Forschungsinstituten sowie der produzierenden und ausführenden Industrie beschäftigt sind, fand ein reger Austausch statt. Die Fachbeiträge sind in einem Tagungsband zusammengefasst verfügbar: EuroCoalAsh 2014, Conference Proceedings, ISBN 978-3-86875-805-4, weitere Infos unter www.eurocoalash.org.

6. Ehrungen

6.1 Gastprofessur für Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

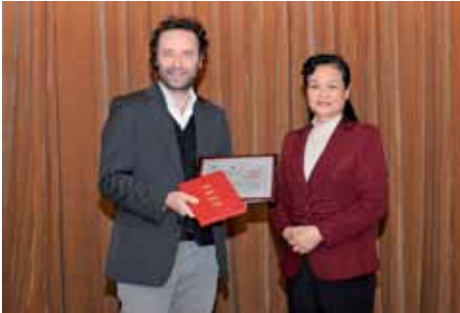


Bild:
Überreichung der Urkunde
durch Mrs. Yan Yao (Vice
President CBMA)

Am 27. Februar 2014 erhielt Herr Prof. Gehlen die Berufung zum Gastprofessor an die China Building Materials Academy in Peking. Die CBMA ist das größte Forschungs- und Entwicklungsinstitut in China im Bereich der anorganischen und nicht metallischen Baustoffe. Die Überreichung der Urkunde erfolgte im Rahmen eines Treffens zur gemeinsamen Forschung über das Transportverhalten und die Mechanismen von Chloridionen in zementgebundenen Baustoffen. Zur Forschergruppe gehören aus dem cbm auch Dipl.-Ing. Charlotte Thiel (AG Betontechnologie) und Dr.-Ing. Sylvia Keßler (AG Stahl und Korrosion) sowie Zhendi Wang, der seine Forschungsarbeit für mehrere Monate im Jahr 2014 im cbm vertiefte.



Bild:
C.Thiel (4. v. l.), C. Gehlen (6. v. l.), S. Keßler (5. v. r.),
Z. Wang (2. v. r.)

6.2 Dr. Dirk Lowke erhält den Georg-Burg-Preis

Mit dem Preis der Georg-Burg-Stiftung werden jährlich herausragende Promotions-, Master- oder Bachelorarbeiten an der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München ausgezeichnet. Der Preis wird im Rahmen des "Tag der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt" während des Festaktes überreicht. Herr Lowke wurde am 05. Juli 2014 für seine Dissertation "Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone - Optimierung auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen" gewürdigt.

Bild:
v.l.n.r. Dekan BGU G. Müller,
D. Lowke, Dr. Schmied,
Mitglied des Vorstandes der
Georg Burg-Stiftung (Foto: A.
Heddergott)



6.3 Lehrpreis für ZfP

Herr Benedikt Rauh vom Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung wurde am 18.7.2014 für die Übungen zur Vorlesung Materialwissenschaften II von der Fachschaft „Ingenieurwissenschaften“ an der Munich School of Engineering (MSE) der Lehrpreis „Top Teaching Trophy“ verliehen.

7. Berichte aus den Arbeitsgruppen

7.1 Arbeitsgruppenschwerpunkte

7.1.1. AG 1 Bindemittel und Zusatzstoffe

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

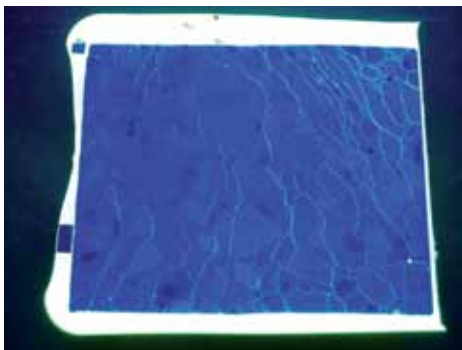


Bild 1:
geschädigter Betonbohrkern
mit fluoreszierendem Kunst-
harz imprägniert und unter
UV-Licht (links),
Glovebox für CO₂-freie Pro-
benbearbeitung (rechts)

Auch im Jahr 2014 wurden wieder zahlreiche Forschungsvorhaben zu den verschiedenen Schwerpunktthemen der Arbeitsgruppe bearbeitet.

In einem DFG-geförderten Forschungsprojekt wurde die Beschleunigung der Reaktionskinetik von Steinkohlenflugasche durch organische Zusätze und deren mechanische Aktivierung untersucht. Diese Thematik stellt eine Fortsetzung der Flugascheuntersuchungen zum Einfluss von verschiedenen, organischen Verbindungen auf das Löseverhalten an Flugaschegläsern dar. Weitergeführt wird ebenfalls ein DFG-gefördertes Forschungsprojekt zu den Mechanismen der Carbonatisierung von Zementstein unterschiedlicher Zusammensetzung unter erhöhtem Druck und überkritischen Bedingungen. Abgeschlossen wurde 2014 ein AiF-Forschungsvorhaben zu Gips-Zement-Puzzolan-Hüttensand-Bindemitteln mit Flugasche und REA-Gips. Hierbei wurden dauerhafte, gipsreiche Bindemittel mit für Zement üblichen Eigenschaften entwickelt, die gleichzeitig wirtschaftlich sind und die Umwelt in deutlich geringerem Maße beeinträchtigen als die herkömmlichen Portlandzemente.

Ein weiterer großer Themenkomplex in der Arbeitsgruppe 1 ist die Forschung zur Dauerhaftigkeit zementgebundener Baustoffe. Untersuchungen zu den Langzeitwirkungen flugaschehaltiger Betone auf den Sulfatwiderstand sowie auf eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) sowohl mit als auch ohne Tausalzeintrag wurden fortgesetzt. Ein weiteres Forschungsprojekt zur Thematik der AKR behandelte die Anpassung des 60°C-Betonversuchs als Performance-Prüfung für flugaschehaltige Betone und die Entwicklung eines Verständnisses für die in beschleunigenden Prüfverfahren ablaufenden Mechanismen. Zudem wurde ein DFG-Forschungsvorhaben zum Thema AKR abgeschlossen.

Schwerpunkt war hier das Verständnis der Mechanismen beim Eintrag von Tausalz auf die Löslichkeit von SiO_2 und dem Einfluss von Flugasche auf die Stabilisierung der C(-A)-S-H-Phasen bei einem externen Tausalzangriff zu vertiefen.

Eng mit der Forschung verknüpft sind auch die Bereiche der Materialprüfung, die die Arbeitsgruppe 1 bearbeitet. Neben einigen Zulassungsprüfungen von Zementen und der Überwachung von Flugasche, wurde auch die Klärung von Schadensursachen an Betonen oder die Lösung anwendungstechnischer Probleme bei Baustoffen behandelt. Einen großen Anteil in der Materialprüfung hat die Prüfung der Alkalireaktivität von Gesteinen und die Beurteilung der AKR-Empfindlichkeit von Betonen unter den Einwirkungen WS (feucht + Alkalien von außen + dynamische Belastung). Die Qualität der durchgeführten Laboruntersuchungen wird jährlich durch mehrere Vergleichsversuche mit anderen Prüflabors und -instituten überwacht und bestätigt. Auch in der Lehre werden sowohl die Grundlagen der hier angesiedelten Forschungsgebiete als auch die in den aktuellen Forschungsarbeiten entstandenen Ergebnisse den Studenten näher gebracht. Zum einen wird im Studiengang Bauingenieurwesen die Theorie gelehrt, zum anderen können die Studenten aktiv in Forschungsprojekten als studentische Hilfskräfte oder an ihren Seminar-, Bachelor oder Masterarbeiten mitarbeiten.

Im Oktober 2014 war das cbm der TU München Mitorganisator der Internationalen Tagung EuroCoalAsh sowie eines am Tag vorher ausgerichteten Forschungsworkshops zum Thema „Dauerhaftigkeit von Flugaschebeton“. An dieser Tagung an der sich sowohl Forschungsinstitute als auch die produzierende und ausführende Industrie austauschen konnte, waren ca. 70 Teilnehmer aus ganz Europa, aber auch dem asiatischen Raum, Südafrika und den USA vertreten. Mitarbeiter der Arbeitsgruppe 1 beteiligten sich mit Vortragsbeiträgen und an der Postersession.

7.1.2. AG 2 Betontechnologie

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

Forschung in der Fachgruppe „Betontechnologie“

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

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

Die Forschungsaktivitäten im Bereich der Dauerhaftigkeit von Beton fokussieren derzeit auf die wichtige Thematik der Carbonatisierung zementgebundener Baustoffe. Im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsvorhabens werden die Mechanismen näher beleuchtet. Auf Basis dieser Erkenntnisse sollen schließlich Empfehlungen für ein Schnellprüfverfahren, dass die in der Praxis ablaufenden Prozesse zeitraffend und präzise abbildet,

abgeleitet werden. Bislang ist unklar, weshalb die Erhöhung der CO_2 -Konzentration zu einer deutlich geringeren Beschleunigung des Carbonatisierungsfortschrittes führt, als dies auf Basis des erhöhten CO_2 -Partialdrucks zu erwarten wäre. Als Ursache werden in der Literatur neben einer veränderten Phasenbildung insbesondere durch die Carbonatisierungsreaktion veränderte Transporteigenschaften genannt.

Um die chemischen Einflüsse möglichst unabhängig von den Transporteigenschaften zu untersuchen, wurde u.a. die Probengröße auf Scheiben mit einem Durchmesser von 36 mm und einer Höhe von 3 mm minimiert. Diese Proben werden mit unterschiedlichen CO_2 -Konzentrationen und Drücken beaufschlagt. Zu verschiedenen Zeitpunkten wird die Veränderung des Phasenbestands und der Porenstruktur bestimmt. Hierbei wird auch die Gasdurchlässigkeit gemessen, die eine Charakterisierung der offenen Porosität ermöglicht. Um dies auch an den kleinen Scheiben durchführen zu können, wurde ein modifizierter Blasenähler (Fa. Testing) angeschafft, vgl. Abb. 1. Dieser ermöglicht die Messung der Permeabilität in Anlehnung an das DAfStb Heft 422 [*] .

[*] N. Bunke, „Prüfung von Beton - Empfehlung und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048,“ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 422, 1991.



Abbildung 1:
Permeabilitäts-Messgerät

Um die Carbonatisierung zu beschleunigen, sind den Methoden der Temperaturveränderung, der Anpassung der Probengeometrie und der Erhöhung der CO_2 -Konzentration Grenzen gesetzt. Um eine weitere Beschleunigung zu erreichen ohne die chemisch ablaufenden Prozesse zu verändern, werden in dem Forschungsvorhaben Proben mit verschiedenen CO_2/N_2 -Gasmischungen bei verschiedenen Drücken beaufschlagt. Um eine hohe Reproduzierbarkeit eines Schnellprüfverfahrens zu gewährleisten, ist der Ablauf unter definierten Randbedingungen wichtig. Daher wurde das bestehende Autoklavsystem modifiziert.

Neben dem Einbau eines druckresistenten Luftfeuchtemessers wurde ein CO_2 -Messgerät am Ausgang des Autoklaven zur Kontrolle des eingestellten CO_2 -Gehalts eingebaut. Zudem wurde ein Direktverdampfer (Fa. adrop) angeschafft, der zwischen Gasflasche und Autoklav angeschlossen wird und die Einspeisung eines Gasgemisches mit definierter relativer Luftfeuchte bei Drücken bis zu 10 bar ermöglicht.

Forschung in der Fachgruppe „Straßenbeton“

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur akustischen Optimierung von Betonfahrbahndecken mit Grindingtextur wurde auf Grundlage von Laborversuchen und Simulationsrechnungen eine Erprobungsstrecke gebaut. In Brandenburg wurden auf der A 12 (km 34,100 bis 35,000 Fahrtrichtung Berlin) auf einem 900 m langen Abschnitt drei verschiedene Oberbetone eingebaut und jeweils drei Grindingvarianten texturiert. Es ergaben sich somit neun

Texturabschnitte mit einer Länge von jeweils 100 m. Fotos der Grindingtexturen sind in Abb. 1-3 am Beispiel eines Oberbetons dargestellt.

Abbildung 1-3:
Fotos der Grindingtexturen



Die gewählten Texturgeometrien sollen Aufschluss über deren Einfluss auf die Lärmmin-
derungseigenschaften sowie die Griffigkeit der Fahrbahndecke geben. Des Weiteren wird
untersucht, wie sich die Oberflächeneigenschaften in Abhängigkeit der Textur und der Be-
tonzusammensetzung im Laufe der Zeit verändern.

7.1.3. AG 3 Stahl und Korrosion

Die Aufgabengebiete der Arbeitsgruppe 3 „Stahl und Korrosion“ bestehen unverändert in
der Forschung und Materialprüfung im Themenbereich Bewehrungen und deren Dauerhaf-
tigkeit im Beton. Personelle Veränderungen haben sich durch das Ausscheiden von Herrn
Dipl.-Ing. Marc Zintel ergeben. Verstärkt wird das Team im Stahllabor durch Herrn Grgic.
Herr Zhendi Wang, Associated Professor am CBMA, China Building Materials Academy, in
Peking besuchte unsere Arbeitsgruppe für 6 Monate als Gastwissenschaftler.

Im Bereich der Forschung steht neben dem Werkstoff Stahl und dessen Schädigung durch
Korrosion nun auch die Glasfaserbewehrung im Mittelpunkt. 2014 wurde mit der Bear-
beitung des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens zum Thema „GFK-Vorspannung“
begonnen. Das Vorhaben wird aus Bundesmitteln gefördert und mit dem Münchner In-
genieurbüro matrices engineering GmbH in Kooperation durchgeführt. Zwei laufende For-
schungsprojekte fokussieren die Korrosion der Stahlbewehrung. Zum einen werden die In-
standsetzungsvarianten von gerissenen und chloridexponierten Stahlbetonen untersucht.
Es soll die Frage beantwortet werden, wie hoch darf der Chloridgehalt im gerissenen Be-
ton vor einer Beschichtung maximal sein, damit keine standsicherheitsrelevante Korrosi-
on ausgelöst wird und kann ein bereits initiiertes Korrosionsprozess durch Austrocknen
des Beton zum Stillstand kommen. Im zweiten Projekt wird das Korrosionsschutzpotential
epoxidharzbeschichteter Bewehrung in Beton untersucht. Hauptfaktoren für die Korrosi-
onsschutzwirkung sind die etwaige Dichtigkeit der Beschichtung gegen einen anliegenden
Elektrolyten (z.B. Beton) sowie die Anzahl und Größe herstellungs- bzw. baustellenbeding-
ter Fehlstellen. Dieses Forschungsprojekt steht kurz vor dem Abschluss und die bisherigen
Ergebnisse deuten auf eine erhebliche Lebensdauerverlängerung beim Einsatz von ECR
im Vergleich zu unbeschichtetem Betonstahl hin. Das DFG-Verbundforschungsvorhaben
„Korrosionsermüdung“ wurde im Herbst 2014 erfolgreich abgeschlossen. Die Ergebnisse
werden in der Fachpresse veröffentlicht.

Im Bereich der wissenschaftlichen Materialprüfung wurde 2014 unter den maßgebenden
Beiträgen und Vorarbeiten von Dr.-Ing. Andreas Volkwein nach langer Bewilligungsfrist die
Zulassungserweiterung des GFK-Bewehrungsstabs ComBAR® (Durchmesser 8, 12, 16,
20, 25 mm) erreicht.

Die Aktivitäten im Bereich der Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Betonstahl- und Spannstahlprodukten wurden in bewährter Qualität und mit hohem Engagement fortgeführt. Durch eine umfassende Modernisierung der Zugprüfmaschine Zwick 600 konnten das Leistungsspektrum erweitert und die Leistungsfähigkeit in diesem Bereich verbessert werden. Erhebliche Anstrengungen wurden auch zur Verbesserung des Arbeitsschutzes unternommen. So wurden u.a. alle statischen und dynamischen Zugprüfmaschinen mit einem Prüfraumschutz ausgerüstet. Weitere Modernisierungen sind geplant, um die technische Ausstattung der Labore auf dem aktuellen Stand zu halten und weiterzuentwickeln.

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.

Unsere Geräteausstattung konnten wir in diesem Jahr um einen Elementanalyser EA 4000 von Analytik Jena erweitern. Vorrangige Motivation hierzu war die stetig steigende Nachfrage an TOC-Bestimmungen (TOC = „total organic carbon“, also der Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff). Vor allem bei Kalksteinmehlen zur Bestätigung der II-Qualität ist dies eine analytische Herausforderung, der wir nun mit dem neuen Gerät deutlich besser gewachsen sind. Zusätzlich ermöglicht uns der EA 4000 die Bestimmung des Gesamt-Kohlenstoffes und des elementaren Kohlenstoffes. Aber auch die Quantifizierung verschiedener Schwefelspezies und organisch gebundenes Chlor sind möglich. Und das ganze direkt aus der Feststoffprobe mit einem automatischen Probengeber.



Bild:
EA 4000

Leider ergaben sich auch in diesem Jahr wieder personelle Änderungen in der Gruppe. So hat uns Herr Tobias Gutberlet nach 5 ½ Jahren als wissenschaftlicher Mitarbeiter verlassen und steht jetzt kurz vor seiner Dissertation. Im Frühjahr konnten wir Frau Sabrina Schwindl als wissenschaftliche Hilfskraft für uns gewinnen. Sie hatte an der LMU Chemie studiert und mit dem Master abgeschlossen. Sie beschäftigte sich verstärkt mit der Laser Ablations-ICP-MS und sollte auf diesem Gebiet evtl. später eine Promotion beginnen. Leider musste sie aus gesundheitlichen Gründen ihr Engagement bei uns im Herbst wieder beenden. Wir wünschen ihr für ihre Zukunft alles Gute. Entsprechend dem jährlichen Rhythmus hat uns die angehende Chemielaborantin Vivienne Burkhard nach Abschluss ihres ersten Ausbildungsjahres im September Richtung Chemiedepartment in Garching verlassen. An ihrer Stelle begann nun Karolina Koch ihre 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.

Gleich zwei Forschungsprojekte mussten in diesem Jahr zum Abschluss gebracht werden. Die Untersuchung der Zementhydratation mit quasielastischer Neutronenstreuung (QENS) am FRM II in Garching bilden die Grundlage für die Dissertation von Tobias Gutberlet. Als zweites wurden die Untersuchungen der korrodierten Schicht auf Zementsteinen nach einem Säureangriff nach dreijähriger Laufzeit abgeschlossen, wobei wir hier weiteres großes Forschungspotential sehen und deshalb einen Fortsetzungsantrag gestellt haben.

Die Lehre umfasste im Sommersemester wieder den Teil der chemische Analytik des Praktikums „Analytik und Prüftechnik“ für die Baustoffingenieurvertiefer bzw. Masterstudenten und im Wintersemester die „Bauchemie“ zur Baustoffkunde Vorlesung des Studiengangs „Bachelor Bauingenieurwesen“. Beim Bauingenieur-Praktikum „Werkstoffe im Bauwesen“ im Sommersemester und dessen Umstellung auf „eLearning“ hatten wir die Aufgabe, das Thema Kunststoffe abzudecken. Hierzu gehörte die Gestaltung des Internetauftritts als auch die völlige Neugestaltung des Laborteils. Hier hat sich Frau Schwindl stark engagiert, so dass die Praktika und auch die abschließenden Parcours-Prüfungen reibungslos vonstattengingen.

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. Westner). 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 Performance-

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 Erhöhung des Oberbeckens am Pumpspeicherwerk Waldeck II beauftragt. Die Asphaltarbeiten erstreckten sich über den Zeitraum von September bis Dezember und wurden vor Ort intensiv überwacht, die Untersuchung der anfallenden Proben erfolgte im Labor in Pasing.

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

Im abgelaufenen Jahr stellten in der Fachgruppe Bitumen und Abdichtungen die vom Bundesverkehrsminister im Rahmen des ARS 11/2012 geforderten „Bindemittelprüfungen im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit“ den absoluten Tätigkeitsschwerpunkt dar. Der gegenüber dem Vorjahr weiter angestiegene 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 AG6 ist die Entwicklung bzw. Verbesserung geeigneter Zerstörungsfreier Prüfverfahren von Faserverbundwerkstoffen. In der Luft- und Raumfahrt sowie im Automobilsektor stieg der Marktanteil von Faserverbundwerkstoffen in den letzten Jahren enorm, was zu neuen Herausforderungen in der Qualitätssicherung und Kontrolle dieser Werkstoffe und Bauteile führt.

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

2014 wurde die Kooperation mit den Museen in München vertieft, vor allem mit dem Deutschen Museum und der Pinakothek der Moderne (Neue Sammlung). Zerstörungsfreie Prüfmethode wurden gemeinsam mit dem Fachgebiet Audio-Signalverarbeitung für die Schädigungsanalyse an Rotorblättern (s.u.) eingesetzt. In Kooperation mit dem Deutschen Museum München wurden verschiedene Objekte zerstörungsfrei analysiert und der Lehrstuhl hat auch bei Sanierungsmaßnahmen im Museum geholfen. Prof. Große wurde in diesem Zusammenhang zum Beauftragten der Fakultät Bau-Geo-Umwelt für Kooperationen mit dem Museum ernannt.

Bild:
Gemeinsame Begehung des
Turms des Deutschen Muse-
ums mit Frau Dr. Pamplona
und Herrn Dr. Prietze.



Auch die bestehende Kooperation mit Kollegen der Medizin aus dem Klinikum rechts der Isar wurde intensiviert (Klinik für Orthopädie und Sportorthopädie, Priv.-Doz. Burkhardt). Die Analyse der Bruchprozesse am Oberschenkelknochen (Femur) und die Messung der Dicke von humanem Knorpelgewebe waren Forschungsziele. In diesem Zusammenhang nimmt Prof. Große als Beauftragter der Fakultät Bau-Geo-Umwelt für die interdisziplinäre Forschung mit dem Klinikum rechts der Isar an den entsprechenden Workshops und Sitzungen teil.

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, Audi und IABG geht mittlerweile deutlich über die Inhalte des Projektes MALzfp (s. Forschungsvorhaben) hinaus.

Innerhalb der TU München ist der Lehrstuhl sehr gut vernetzt. So existiert (neben den Kooperationen mit den Kollegen der beiden „eigenen“ Fakultäten BGU und Maschinenwesen)

ein reger Austausch mit anderen Fakultäten wie dem Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft (Prof. Emmerling, Architektur), dem Fachgebiet Audio-Signalverarbeitung (Prof. Seeber, Elektrotechnik), der Holzforschung München (Prof. Van de Kuilen, Wissenschaftszentrum Weihenstephan) und dem IMETUM (Lehrstuhl für Biomedizinische Physik, Prof. Pfeiffer, Physik, und Fachgebiet Biomechanik, Prof. Lieleg, MW).

Auch 2014 war das Medieninteresse an den Arbeiten der AG6 wieder recht groß. So erschienen in den Printmedien Beiträge in „Stern“ (Ausgabe 14, März 2014), in „P.M. – Fragen und Antworten“ (Ausgabe 4, April 2014) und in „Die Zeit – Campus“ (Dezember 2014). Im Hörfunk war ein Beitrag auf SWR2 (Selbsteilung von Beton, 11.5.2014) und im Fernsehen ein Beitrag auf BR alpha „Campus“ am 12.5.2014 zur Prüfung von Rotorblättern von Windenergieanlagen. Ein weiterer Filmbeitrag für die Sendung BBC Horizon ist bereits abgedreht und wird Mitte 2015 weltweit zu sehen sein. Zudem wurde Ende des Jahres eine Presseerklärung zum Projekt Healcon veröffentlicht.

2014 konnte sich die Arbeitsgruppe mit dem Diplom-Ingenieur (Maschinenbau) Philipp Jatzlau verstärken, während auf der anderen Seite die wissenschaftlichen Mitarbeiter Herr Dipl.-Ing. Ronald Richter und Herr Dipl.-Ing. Benedikt Rauh ausschieden.

7.2 Abgeschlossene Forschungsvorhaben

AG Bindemittel und Zusatzstoffe

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

Bearbeiter: Dr.-Ing. A. Dressler, K. Fischer, M.Sc.

Förderer: DFG

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, die Wirkung von externen Alkalien, insbesondere in Form von NaCl, auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton besser zu verstehen. Dabei sollte der Einfluss der Bindemittelzusammensetzung (Zement mit Flugasche und Metakaolin als Betonzusatzstoffe) und damit der Einfluss einer veränderten Porenlösung auf Gesteinskörnungen (Borosilicatglas, Grauwacke, Opalsandstein, Flint, Diabas, Granit) untersucht werden. Es sollte in besonderem Maße der Einfluss des Aluminiums aus den Zementen, den Zusatzstoffen und den Gesteinen als Partner für die Alkali- und Siliziumbindung im Bindemittel als auch an der reaktiven Gesteinskörnung betrachtet werden.

Das Arbeitsprogramm umfasste umfangreiche Untersuchungen an Betonen, Zementsteinen und Gesteinskörnungen. Dabei wurde der Einfluss von NaCl auf die Zusammensetzung der Hydratphasen, der Porenlösung und schließlich auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) mit reaktiver Gesteinskörnung in Abhängigkeit von Bindemittelzusammensetzung und NaCl-Konzentration untersucht. Chemische und mineralogische Untersuchungen des Bindemittels, der Gesteinskörnung und der Porenlösung wurden mit phänomenologischen Untersuchungen, wie die Dehnreaktionen am Beton, kombiniert. Damit konnten die Einflüsse der einzelnen Betonkomponenten auf die Schadreaktion ermittelt werden. Ziel der gesonderten Betrachtung war es, die Mechanismen, die jeweils bei den einzelnen Betonkomponenten wirken, voneinander zu trennen.

Durch den Eintrag von NaCl in das Betongefüge kommt es bekanntermaßen zu Schäden durch eine verstärkte Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Dies äußert sich vor allem an hohen Rissmengen und -breiten, der in NaCl gelagerten Probekörper mit synthetischem Borosilicatglas. Dies konnte sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch nachgewiesen werden. Darüber hinaus wurde mittels REM/EDX die Zusammensetzung der entstandenen Alkali-Kieselsäure-Gele bestimmt. Nach einer einjährigen Lagerung zeigen die entstandenen Alkali-Kieselsäure-Gele in Betonen mit synthetischem Borosilicatglas, dass in Gegenwart von NaCl Gele mit höheren Natriumgehalten gebildet werden. Es wird angenommen, dass diese Veränderung der Gelzusammensetzung mit einer erhöhten Quelfähigkeit der Gele einher geht. Durch den Zusatz von Flugasche bilden sich hingegen AK-Gele mit verminderter Quelfähigkeit.

Löseversuche an Gesteinskörnungen, die in künstlichen Porenlösungen mit und ohne NaCl gelagert wurden, lieferten folgende Ergebnisse. Opalsandstein (niedrigste Kristallinität) reagierte erwartungsgemäß am intensivsten, was sich visuell in Form einer makro- und mikroskopischen Gelbildung sowie einer mikroskopischen Korrosion des Gefüges mit seinen eingelagerten biogenen SiO_2 -Aggregaten (u.a. Schwammnadeln) äußerte. Aus jenen Erscheinungen ließen sich die deutlichen Zunahmen an aus Opalsandstein gelöstem Silicium und Aluminium in den Lagerungslösungen ableiten. Eine gleichzeitige Abnahme der K^+ - und OH^- -Konzentration in den Lösungen resultierte aus der ausgeprägten Bildung von AK-Gele auf der Gesteinsoberfläche (Abbildung 1). Auch die Löseversuche mit Flint, Grauwacke und

Borosilicatglas zeigen erhöhte Siliciumkonzentrationen in Lösungen, die NaCl enthielten. Feinbetonprismen mit Borosilicatglas, die gleichartig gelagert wurden, weisen, wie bereits angesprochen, intensive AKR-Schäden auf, die ebenfalls mit deutlich höheren Gehalten an gelöstem Silizium in der Betonporenlösung einhergingen. Aus den Ergebnissen ließ sich ableiten, dass in Gegenwart von NaCl nicht die Alkalität der Porenlösung den dominierenden Einfluss auf das Maß der SiO_2 -Löslichkeit ausübt, sondern eher das Vorhandensein von NaCl. Zum einen wird infolge hoher Ionenstärken die Löslichkeit von SiO_2 erhöht. Zum anderen zeigen Modellierungen mit dem hydrogeochemischen Programm PHREEQC [1] die Bildung eines wässrigen NaHSiO_3^- -

Komplexes, dessen Gehalt mit steigender NaCl-Konzentration in der Lösung ebenfalls ansteigt. Trotz geringerer OH^- -Konzentrationen löst sich in Gegenwart von NaCl mehr SiO_2 , als in Lösungen ohne NaCl mit höheren OH^- -Konzentrationen.

Anhand von Untersuchungen an hydratisierten, pulverisierten Zementsteinen, die ebenfalls in künstlichen Porenlösungen mit verschiedenen NaCl-Konzentrationen gelagert wurden, konnten ebenfalls einige vielversprechende Ergebnisse erzielt werden. Es zeigte sich, dass mit steigender NaCl-Konzentration der Lagerungslösung die OH^- -Konzentration der jeweiligen Mischung deutlich absinkt. Dies liegt an einer Freisetzung von SO_4^{2-} -Ionen und hängt mit den Löse- bzw. Umwandlungsprozessen des Ettringits zu Friedel'schem Salz zusammen. Bei Einwirkung von NaCl wandelt sich Ettringit (Aft) zu Friedel'schem Salz um.

Abbildung 1:
Lagerung der Gesteinskörnung
in künstlichen Porenlösungen
(links) und AK-Gelbildung
auf der Oberfläche eines
Opalsandsteins nach 91 d
Beanspruchung (rechts)



Dadurch werden SO_4^{2-} -Ionen in die Porenlösung abgegeben und es bildet sich Portlandit. Beide Effekte verringern die OH^- -Konzentration der Porenlösung. Wirkt NaCl auf die AFm-Phasen des Zementsteins ein, kann es je nach Phasenbestand auch zu einer Abspaltung von weiterem Sulfat, aber keiner direkten Beeinflussung der OH^- -Konzentration kommen, oder aber auch dazu, dass OH^- -Ionen freigesetzt werden. Somit beeinflusst die jeweilige Phasenzusammensetzung des verwendeten Zementklinkers die Basizität der Porenlösung bei einem Eintrag von NaCl individuell. Bei der Umbildung der relevanten Phasen sind in jedem Fall Chloridionen beteiligt. Natriumionen tragen zu diesen Reaktionen dagegen nicht bei und werden hierbei auch nicht gebunden, sondern können von den C-S-H-Phasen eingebaut werden.

Durch den Einsatz von Flugasche und Metakaolin wird der Alkaligehalt der Porenlösung durch Verdünnungseffekte, aber auch durch die Einbindung von Alkalien in die Reaktionsprodukte der puzzolanischen Reaktion (C-S-H- und C-A-S-H-Phasen), verringert. Zusätzlich wird der Gesamtaluminiumgehalt im Bindemittel angehoben. Dies hat neben der Bildung Al-haltiger Phasen zur Folge, dass auch die Al-Konzentration der Porenlösung gegenüber einem Bindemittel aus reinem Portlandzement erhöht ist. Nach bisherigem Stand der Kenntnis sind aluminiumhaltige Hydratphasen im Zementstein maßgebend an einer Chloridbindung beteiligt [2]. Welchen Einfluss der Eintrag von NaCl auf die aluminiumhaltigen C-A-S-H-Phasen hat, ist jedoch nicht bekannt.

Die Bildung von Friedel'schem Salz scheint bei einem Eintrag von NaCl in die Bindemittelmatrix die primär ablaufende Reaktion zu sein. Stehen nicht ausreichend Al-haltige Phasen (AFm, Aft) im Bindemittel für die Bildung des Friedel'schen Salzes zur Verfügung, konnte entgegen der bisherigen Meinung [3] in diesem Forschungsprojekt gezeigt werden, dass auch Aluminium aus den C-A-S-H-Phasen gelöst wird. Die silicatischen Ketten brechen auf, Aluminium wird frei und die Kettenlängen verkürzen sich nachweislich (Abbildung 2). Das Al/Si-Verhältnis dieser C-A-S-H-Phasen sinkt. Ein ähnlicher Effekt konnte auch in neueren Untersuchungen beim Sulfatangriff beobachtet werden [4, 5]. Der Eintrag von NaCl wirkt sich somit nicht nur auf das C/S-Verhältnis [6, 7] der C-A-S-H-Phase aus, sondern auch auf das Al/Si-Verhältnis.

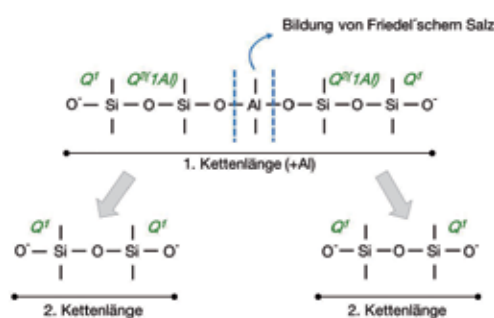


Abbildung 2:
Veränderungen des $\text{Q}^1/\text{Q}^2(1\text{Al})$ -
Verhältnisses und der Ketten-
länge infolge der Bildung von
Friedel'schem Salz; 29Si-NMR

Strukturelle Veränderungen der C-A-S-H-Phasen wirken sich direkt auf die Bindefähigkeit von Alkalien und damit auf die Schädigung von Beton durch eine AKR aus. Die Alkalibindefähigkeit der C-A-S-H-Phasen wird mit dem Einsatz puzzolanischer Zusatzstoffe, wie Flugasche oder Metakaolin, erhöht. Der Austausch von vierwertigem Silicium durch dreiwertiges Aluminium ist aus strukturellen Gründen nur bis zu einem bestimmten Grad möglich. Für den Ladungsausgleich benötigen C-A-S-H-Phasen monovalente Kationen (Na^+ , K^+). Dadurch werden gegenüber Betonen mit ausschließlich Portlandzement als Bindemittel diese Ionen aus der Porenlösung entfernt. Nimmt aber der Al-Gehalt in C-A-S-H infolge eines NaCl-Angriffs ab, können bereits eingebundene Alkalien wieder freigesetzt werden und die AKR verstärken. Dies ist vermutlich hier bei reinen Zementbindemitteln der Fall. Liegt im Bindemittel eine Aluminiumquelle, wie Flugasche oder Metakaolin vor, kann der in Abbildung 2 beschriebene Effekt eines Alkaliangriffs auf die C-A-S-H-Phasen verringert oder sogar ausgeschlossen werden.

Ein Eintrag von NaCl wirkt sich somit auf alle Al-haltigen Phasen des Zementsteins aus. Kontrollierender Faktor ist hierbei die Verfügbarkeit an Aluminium. Zusatzstoffe mit sehr hohen Aluminiumgehalten (z.B. Metakaolin) können das Al/Si-Verhältnis der C-A-S-H-Phasen stabilisieren bzw. während des NaCl-Eintrags durch eine alkalische Anregung des Metakaolins sogar erhöhen. Es ist zu erwarten, dass bei vollständiger Reaktion des Zusatzstoffes dieser Effekt abbricht. Bei zeitlich andauerndem NaCl-Eintrag werden vermutlich dann auch diese C-A-S-H-Phasen angegriffen.

Neben einer Probenlagerung der hydratisierten Zementleime in künstlicher Porenlösung bei 20 °C, wurde auch eine Lagerung bei 2 °C vorgenommen, um winterliche Bedingungen nachzustellen. Maßgebender Faktor ist vor allem die höhere Stabilität von Ettringit [8] bei geringen Temperaturen. Infolge dessen werden bei 2 °C weniger Sulfationen in die Lösung freigesetzt. Dies geht einher mit einer, im Vergleich zur 20 °C-Lagerung, etwas erhöhten OH⁻-Konzentration. Somit liegen gerade im Winterhalbjahr Bedingungen in der Porenlösung vor, die eine AKR begünstigen. Dem gegenüber laufen chemische Reaktionen bei niedrigen Temperaturen generell langsamer ab, was die AKR wiederum bremst. Welcher dieser beiden gegenläufigen Faktoren bezüglich einer schädigenden AKR überwiegt, konnte im Rahmen dieses Vorhabens nicht gänzlich geklärt werden.

In diesem Forschungsprojekt konnten die wesentlichen Erkenntnisse aus den Untersuchungen am hydratisierten Zementstein und an den Gesteinskörnungen erzielt werden. Ein Übertrag dieser Ergebnisse auf Beton konnte bisher nur beim Einsatz der sehr reaktiven Modellgesteinskörnung aus Borosilicatglas erfolgen. Die natürlichen, dichten Gesteine (v.a. Grauwacke) zeigen zum aktuellen Zeitpunkt noch keine bewertbaren, makroskopisch auftretenden Reaktionen infolge AKR, auch nicht in Gegenwart von NaCl. Eine umfassende, abschließende Interpretation der Gesamtergebnisse konnte daher noch nicht gezogen werden.

1. D.L. Parkhurst, C.A.J. Appelo: User's guide to PHREEQC (version 2) - a computer program for speciation, reaction-path, 1D-transport, and inverse geochemical calculations, 1999, US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259. 312.
2. A.K.Suryavanshi, J.D. Scantlebury, S.B. Lyon: Mechanism of Friedel's salt formation in cements rich in tricalcium aluminate, Cement and Concrete Research, 1996, 26, 717-727.
3. H.F.W. Taylor, R.S. Gollup: Some chemical and microstructural aspects of concrete durability. Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems, 1997, E&FN Spon: London, 177-184.
4. W. Müllauer, R.E. Beddoe, D. Heinz.: Sulfate attack on concrete - solution concentration and phase stability. in Concrete in Aggressive Aqueous Environments - Performance, Testing and Modeling, RILEM Publications S.A.R.L., 2009, Toulouse, Frankreich.
5. W. Müllauer, et al.: Mechanisms of sulfate attack for plain and fly ash cements at different storage temperatures and sulfate concentrations, International Congress on Durability of Concrete, 2012, Trondheim, Norwegen.
6. P. Gégout, E. Revertégat, G. Moine: Action of chloride ions on hydrated cement pastes: influence of the cement type and long time effect of the concentration of chlorides. Cement and Concrete Research, 1992, 22, 451-457.
7. D. Sugiyama: Chemical alteration of calcium silicate hydrate (C-S-H) in sodium chloride solution. Cement and Concrete Research, 2008, 38, 1270-1275.
8. R. Buhler, H.-J. Kuzel: Über den Einbau von Cr³⁺ und Fe³⁺ in Ettringit. Zement, Kalk, Gips, 1971, 2, 83-85.

7.2.2 Gips-Zement-Puzzolan-Hüttensand-Bindemittel

Bearbeiter: Ying Wang, M.Sc.

Förderer: AiF

Bei der Baustoffproduktion wird zunehmend auf die CO₂-Emission geachtet. Im Rahmen dieses Projektes wurden Untersuchungen an Bindemittelmischungen, die hauptsächlich aus sekundären Rohstoffen zusammengesetzt sind, durchgeführt. Dabei wurden die aus REA-Gips hergestellten

α -Halbhydrate, β -Halbhydrate und Anhydrite als Sulfatbinder, zwei Flugaschen verschiedener Feinheiten und Mikrosilica als puzzolanische Bestandteile sowie Hüttensandmehl als latent hydraulisches Bindemittel verwendet. Im Vergleich zu Portlandzement stellen solche Bindemittelmischungen in Hinblick auf den CO₂-Ausstoß einen vielversprechenden Ansatz dar. Ziel dieser Forschungsarbeit war es, Gips-Zement-Puzzolan- (GZP), bzw. Gips-Zement-Puzzolan-Hüttensand-Bindemittel (GZPH) mit guter Wasser- und Volumenbeständigkeit zu entwickeln. Anhand der Ergebnisse wurde festgestellt, dass, obwohl die Bindemittelmischungen einen Massenanteil von 50 % REA-Gips (α -Halbhydrat, β -Halbhydrat oder Anhydrit) enthalten, diese eine wesentlich bessere Wasserbeständigkeit als eine Referenzprobe aus reinem Gips zeigten (Abb. 1).

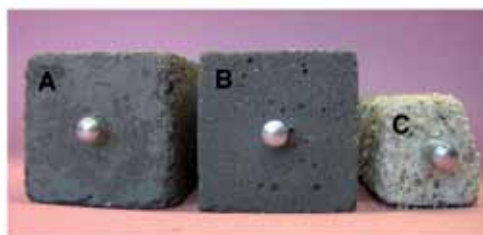


Abbildung 1:
Mörtelprismen nach langer Wasserlagerung bei 20 °C.
A: GZP (w/b 0,5) nach 360 Tagen
B: GZP (w/b 0,3) nach 360 Tagen
C: α -Halbhydrat (w/b 0,3) nach 270 Tagen

Während der Wasserlagerung nahmen die Festigkeiten von GZP- und GZPH-Proben ständig zu. Die unter Wasser gelagerten Pasten- und Mörtelproben mit GZP- oder GZPH-Bindemitteln konnten eine ähnlich hohe Festigkeit wie die an der Luft erhärteten Proben

Druckfestigkeit

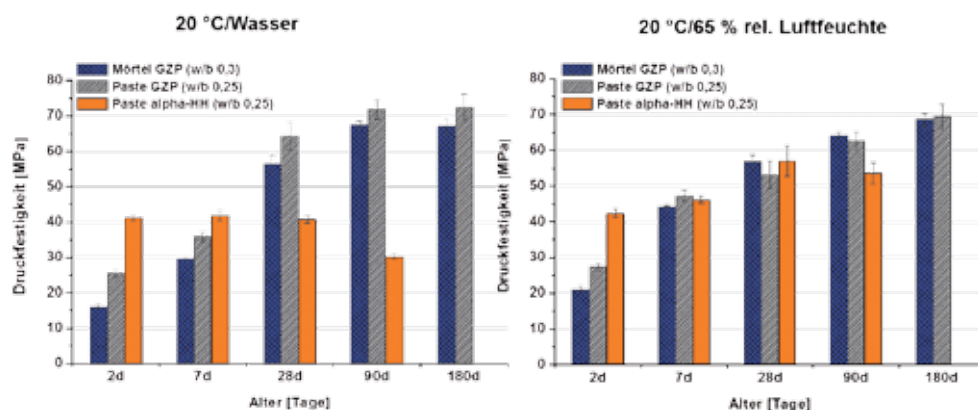


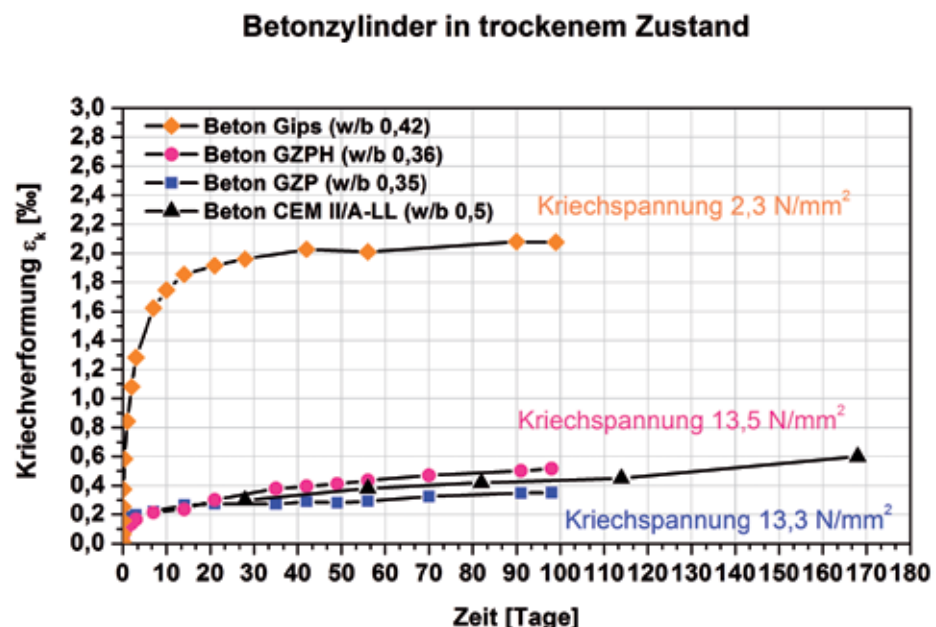
Abbildung 2:
Vergleich der Druckfestigkeitsentwicklung der Mörtel GZP (w/b 0,3), Paste GZP (w/b 0,25) und Paste α -Halbhydrat (w/b 0,25) unter Wasser bei 20 °C (links) und im Klimaraum bei 20 °C/65 % rel. Luftfeuchte (rechts)

erzielen (ein Beispiel siehe Abb. 2). Im Gegensatz dazu sinkt die Festigkeit von Proben mit reinem α -Halbhydrat nach einer langen Wasserlagerung stark ab.

Um die Leistungsfähigkeit der GZP- und GZPH-Bindemittelmischungen praxisnah zu untersuchen, wurden Betone mit einem Bindemittelgehalt von 350 kg/m³ und einem w/b-Wert von 0,35 (GZP), bzw. 0,36 (GZPH) hergestellt. Diese Betone erreichten nach 28 d Wasserlagerung Festigkeiten von 31,5 MPa (GZP), bzw. 38 MPa (GZPH). Die dreimonatigen Kriechversuche haben ergeben, dass die GZP- und GZPH-Betone unter Dauerlast eine deutlich geringere Verformung als der Vergleichsbeton mit reinem α -Halbhydrat, aber ein ähnliches Verhalten wie der Referenzbeton mit Portlandkalksteinzement zeigten (Abb. 3).

Abbildung 3:
Vergleich der Kriechverformung
von Beton Gips, Beton GZPH,
Beton GZP und Beton CEM
II/A-LL (Zementgehalt 320 kg/
m³) 1 im Klimaraum bei 20
°C/65 % rel. Luftfeuchte

¹VDZ, Cement International
2014, 12, 79-85.



Des Weiteren wurde durch eine Ökobilanzierung festgestellt, dass die Auswirkungen auf die Umwelt bei der Herstellung von Betonen mit GZP- bzw. GZPH-Bindemittel in fast allen Kategorien geringer sind als die bei der Herstellung von Betonen mit Portlandkalksteinzement. Die Wirkungskategorie Treibhauseffekt kann auf ein Drittel reduziert werden.

Mit den gewonnen Erkenntnissen aus den umfangreichen Untersuchungen könnte die Anwendung von Gips im Außenbereich erweitert werden. Damit eröffnen sich dem Baustoff Gips neue Einsatzgebiete.

7.2.3 Variierte Vorlagerungszeiten und deren Auswirkungen auf flugaschehaltige Betone im 40 °C- und 60 °C-Betonversuch

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

Im abgeschlossenen Forschungsvorhaben VGB-Projekt 329 [1] wurden flugaschehaltige Betone mit Grauwacke mittels 60 °C-Betonversuch gemäß Alkali-Richtlinie [2] geprüft, wobei die Dehnungen in der Prüfung umso geringer ausgefallen sind, je kürzer die Vorlagerungszeit war, woraus wiederum eine falsche Beurteilung der Betone hinsichtlich ihrer

Alkaliempfindlichkeit resultiert. Die Ergebnisse daraus zeigen, dass vor der Beanspruchung im Prüfklima (60 °C / 100 % r. F.) eine Vorlagerung von mindestens 28 Tagen notwendig ist, um die Betone zuverlässig einstufen zu können.

Basierend auf diesem Aspekt, wurden in diesem Forschungsvorhaben identisch zusammengesetzte Betone mit Grauwacke mit und ohne Flugasche zwei verschiedenen Lagerungsregimen ausgesetzt, die dem regulärem 60 °C-Betonversuch und einem 60 °C-Betonversuch mit 28-tägiger Vorlagerung entsprachen. An ausgewählten Lagerungszeitpunkten wurden die Porenlösungszusammensetzungen und die Porengrößenverteilung analysiert.

Anhand der Ergebnisse kann nachgewiesen werden, dass durch die Anwendung des regulären 60 °C-Betonversuchs eine praxisferne Entwicklung der Porenlösungszusammensetzung und des Porengefüges stattfindet. Entsprechend erfolgt eine Reduzierung des pH-Wertes und der Kaliumkonzentration in der Porenlösung, wodurch die SiO_2 -Löslichkeit aus der alkalireaktiven Grauwacke verringert wird. Zusätzlich resultiert aus einer beschleunigten puzzolanischen Reaktion der Flugasche eine wesentliche Abnahme der Kapillarporenanteile im Beton, wodurch ein Transport der AKR-forcierenden Komponenten (v.a. Feuchtigkeit, gelöste Alkalien und Si-Spezies) gemindert wird. Beide Prozesse, die Veränderung der Porenlösungszusammensetzung und der Porengrößenverteilung, wirken der Bildung quellfähiger Alkali-Kieselsäure-Gele entgegen und verursachen demzufolge geringere Dehnungen in flugaschehaltigem Beton infolge einer AKR. Dementgegen bewirkt die Vorlagerung von 28 Tagen, dass eine praxisferne Beschleunigung der puzzolanischen Reaktion nicht einsetzt und durch den Einbau von Alkalien in frühzeitig gebildete C-S-H-Phasen, ein Teil des AKR-Potentials nicht konsumiert wird. Dadurch steigen, einer praxisüblichen Betonalterung entsprechend, die Alkalikonzentrationen sowie der pH-Wert der Porenlösung an und es bildet sich ein Porengefüge mit höheren Kapillarporenanteilen aus.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens belegen damit, dass durch eine 28-tägige Vorlagerung Prüfarfakte durch eine beschleunigte praxisferne Reaktion der Flugasche vermieden werden und dadurch eine sichere Beurteilung flugaschehaltiger Betonrezepturen auf ihren Widerstand gegenüber einer AKR möglich ist.

Im zweiten Teil des Forschungsvorhabens werden flugaschehaltige Betone mit EIII-OF Material (Kies mit Opalsandstein und Flint) bis zu 3 Jahre in der Nebelkammer (40 °C / 100 r. F.) sowie im Freien gelagert, wobei die Betone vor der Nebelkammerbeanspruchung 1, 28 und 91 Tage vorgelagert wurden. Der Hintergrund in dieser Vorgehensweise beruht auf Forschungsergebnissen aus dem abgeschlossenen VGB-Projekt Nr. 300 [3], in dem flugaschehaltigen Betone im Freilager nach 1 bis 2 Jahren Risse am Würfel aufwiesen, wohingegen in der Nebelkammerlagerung keine Schäden festzustellen waren.

Durch Herstellung und Lagerung identisch zusammengesetzter Betone sollte durch die Vorlagerung, eine beschleunigte puzzolanische Reaktion durch eine verfrühte Einlagerung in die Nebelkammer unterbunden werden. Die Untersuchungsergebnisse zeigen jedoch, dass gegenwärtig in allen Betonen mit Flugasche keine Schäden infolge einer AKR durch die Beanspruchung in der Nebelkammer entstanden sind. Demgegenüber treten – analog zum VGB-Projekt Nr. 300 [3] – im Freilager nach mehr als einem Jahr Risse in allen flugaschehaltigen Proben auf. Demnach kann aus den variierten Vorlagerungsarten bisher kein signifikanter Einfluss auf das Expansionsverhalten flugaschehaltiger Betone in der Nebelkammer abgeleitet werden. Durch die weitere Beanspruchung bei 40 °C und 100 % r. F. bis zu 3 Jahren, können zu späteren Lagerungszeitpunkten möglicherweise noch Einflüsse der

Vorlagerungszeit auf das Dehnungsverhalten der Betone mit Flugasche abgeleitet werden. Aufgrund einer fehlenden mikroskopischen Schadenscharakterisierung am freigelagerten Beton, ist ein naheliegender Schaden infolge einer AKR zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht definitiv nachweisbar.

- [1] Heinz, D., Urbonas, L., Dressler, A., Müllauer W. (2011): Erarbeitung eines Performance-Prüfverfahrens auf Alkali-Kieselsäure Reaktion (AKR) bei Einsatz von Steinkohlenflugasche (SFA) in Beton – Variation von Vorlagerungszeiten und Erarbeitung von Kriterien. VGB-Vorhaben Nr. 329. Forschungsbericht TU München
- [2] DAfStb-Richtlinie - Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Beuth Verlag, Berlin. 2007. p. 46
- [3] Heinz, D., Urbonas, L., Dressler, A. (2010): AKR - Vermeidung durch Flugasche - Langzeitlagerung. VGB-Vorhaben Nr. 300. Forschungsbericht TU München

AG Betontechnologie

7.2.4 Lärmarmes Betonsteinpflaster

Bearbeiter: F. Duran, D. Lowke
Förderer: BMVI / bast

Fahrbahnbeläge aus Betonsteinen stellen insbesondere im innerstädtischen Bereich eine etablierte Alternative zu Beton- und Asphaltbelägen dar, da sie einfache und schnelle Bauvorgänge ermöglichen und ästhetisch einen hohen Wert bieten. Obwohl sie überwiegend in bewohnten Bereichen zum Einsatz kommen, standen ihre lärmtechnischen Eigenschaften bislang nicht im Fokus der Produktentwicklung. Am Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München wurde im Rahmen eines Verbund-Forschungsprojekts das Ziel verfolgt, lärmindernde Eigenschaften durch ein offenporiges Betongefüge im Pflasterstein zu erreichen. Das hinsichtlich Lärminderung zu optimierende offene Gefüge soll den Schall aus dem Reifen-Fahrbahn-Kontakt sowie aus anderen Quellen des Fahrzeuges absorbieren.

Zur Entwicklung des lärmarmen offenporigen Pflastersteins wurden die Untersuchungen in 3 Arbeitspakete (AP) gegliedert. Zu Beginn wurden Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss der Porenstruktur auf die Schallabsorption ungebundener Partikelpackungen durchgeführt (AP1). Die in den Grundlagenuntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend schrittweise auf zementgebundene Pflastersteine übertragen (AP 2). Dazu wurden



Bild 1:
Zweischichtig-offenporiger
Betonpflasterstein

im Labor ein- und zweischichtige Pflastersteine hergestellt (Bild 1), wobei der Hohlraumgehalt gezielt durch Variation von Leimgehalt, Leimkonsistenz und Sandanteil verändert wurde. Weiterhin wurde der Einfluss von Polymersuspensionen, Silicastaub, Gesteinskörnungsart und w/z-Wert untersucht. Neben den Schallabsorptionseigenschaften wurde insbesondere der Frost-Tausalz-Widerstand bestimmt. Alle untersuchten betontechnologischen Variationen wiesen einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf.

Um die gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis zu übertragen, wurden abschließend Pflastersteine mit den im Labor entwickelten Betonzusammensetzungen großmaßstäblich in einem Betonwerk hergestellt (AP 3). Dabei zeigte sich, dass mit den im Labor entwickelten und optimierten Betonen auch im Werk zweischichtig-offenporige Betonpflastersteine mit guten Schallabsorptions- und Dauerhaftigkeitseigenschaften hergestellt werden können. Bei optimierter Betonzusammensetzung wiesen die Betonpflastersteine Schallabsorptionsgrade zwischen 0,55 und 0,82 bei hohen Frost-Tausalz-Widerständen mit Abwitterungen im CDF-Test zwischen 83 und 294 g/m² nach 34 Frost-Tau-Wechseln auf.

Mit den im Werk hergestellten Steinen stellte der Projektpartner SF-Kooperation in der Stadt Melle einen 500 m² großen Demonstrator auf einer Anwohnerstraße her, Bild 2. Die offenporigen Betonpflastersteine wiesen dabei gute Gebrauchseigenschaften, wie eine hohe Kantenfestigkeit, sowie eine hohe Präzision beim Spalten auf. Anschließend statistische Vorbeifahrtsmessungen (SPB-Messungen) durch den Verbundpartner Müller-BBM konnten zudem eine deutlich reduzierte Schallemission nachgewiesen werden. Die Ergebnisse des Demonstrators ergeben einen Vergleichswert zum DStrO-Wert von -7,6 dB(A).



Bild 2:
Einsatz der offenporigen Betonpflastersteinen in einer öffentlichen Verkehrsfläche (Foto: SF Kooperation, Bremen)

7.2.5 Anwendungsorientierte Optimierung und Klassifizierung der rheologischen Eigenschaften von UHPC

Bearbeiter: T. Kränkel, D. Lowke, O. Mazanec

Förderer: DFG (Vorhaben GE 1973/8, in Zusammenarbeit der Universität Kassel SCHM 1589/12)

Ausgangsfragen und Zielsetzung

Ultrahochfester Beton (UHPC) ist ein High-Tech-Werkstoff. Als solcher stellt er hohe Anforderungen an die Konzeption, Herstellung und Verarbeitung. Er zeichnet sich durch sehr hohe Zement-, Fließmittel- und Zusatzstoffgehalte sowie einen niedrigen Wassermenge-Zementwert (w/z-Wert) aus. Jeder Ausgangsstoff hat Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften des UHPC, wodurch die Qualität der Verarbeitung und folglich die lokalen mechanischen Eigenschaften des Bauteils erheblich beeinflusst werden. So können infolge unzureichender Verarbeitungseigenschaften Hohlräume, Fasersedimentationen oder unregelmäßige Faserverteilungen auftreten. Zudem ist UHPC aufgrund des besonders hohen volumetrischen Feststoffgehalts recht hochviskos. Er fließt und entlüftet dadurch in der Schalung häufig nur unzureichend.

Für den Praxiseinsatz ist es unabdingbar, das komplexe Zusammenspiel der Ausgangsstoffe und dessen Auswirkungen auf das Fließverhalten von UHPC zu verstehen. Nur so ist es möglich, den Betonentwurf individuell an die jeweiligen Bauteile und Herstellbedingungen zielsicher anzupassen. Ziel der Untersuchungen am Centrum Baustoffe und Materialprüfung

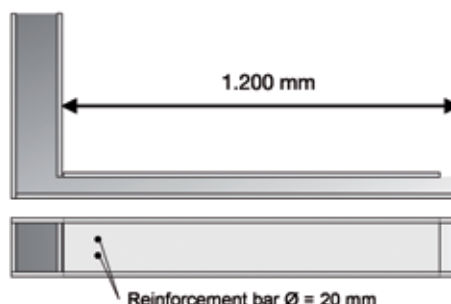


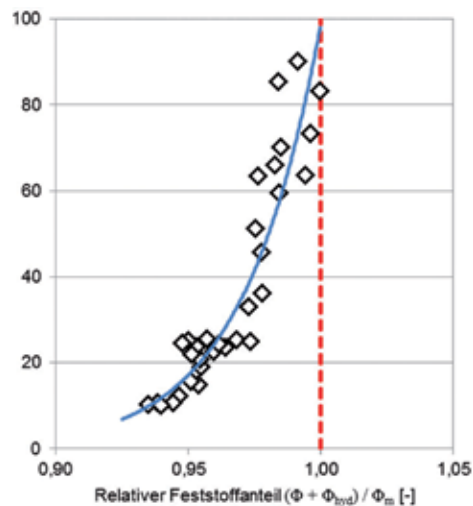
Bild 3:
Beispiel für eine der für die Formfüllungsversuche eingesetzten Modellschalungen

war es, die maßgeblichen Mechanismen zur Steuerung von Viskosität und Fließgrenze von UHPC sowie deren zeitliche Entwicklung (Thixotropie) zu klären. Darauf aufbauend wurde ein Klassifizierungssystem entwickelt, das es ermöglicht, die Verarbeitungseigenschaften der UHPC für eine ausreichende Formfüllung im Entwurfsprozess festzulegen, in der Eigungsprüfung einzustellen und bei der Herstellung zu überwachen. Dafür wurden rheologische Untersuchungen an den UHPC mit Formfüllungsversuchen in praxisnahen L-förmigen Modellschalungen (Bild 3) kombiniert.

Betontechnologische Einflüsse auf die Viskosität und Thixotropie

In einem ersten Schritt konnte gezeigt werden, wie die rheologischen Eigenschaftskennwerte Viskosität und Thixotropie, und damit die Verarbeitungseigenschaften eines UHPC, zielsicher durch betontechnologische Maßnahmen sowie die Fließmittelstruktur gesteuert werden können.

Bild 4:
Einfluss des relativen Feststoffanteils $(\Phi + \Phi_{\text{hyd}}) / \Phi_m$ auf die plastische Viskosität μ von UHPC mit Variationen in Zusatzstoffart, -feinheit und -gehalt



Demnach stellt die Variation des relativen Feststoffanteils $(\Phi + \Phi_{\text{hyd}}) / \Phi_m$ durch Änderung von Art, Feinheit und Gehalt der Zusatzstoffe ein wertvolles Mittel dar, um die plastische Viskosität von UHPC zu reduzieren und somit seine Verarbeitungseigenschaften zu verbessern, Bild 4. Für eine Reduzierung der plastischen Viskosität bei konstantem Wasser/Feststoff-Verhältnis (bzw. w/b-Wert) lassen sich zwei Strategien ableiten:

- ⇒ Reduzierung des tatsächlichen Feststoffanteils Φ_{eff} durch Reduzierung des chemisch gebundenen Wassers Φ_{hyd} mit zunehmender Substitution des Zements durch inerte Zusatzstoffe und
- ⇒ Erhöhung der maximalen Packungsdichte der Feststoffe Φ_m durch Einsatz von im Vergleich zum Zement größeren bzw. feineren Zusatzstoffen.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Thixotropie gezielt durch den Feststoffgehalt, die maximale Packungsdichte, den Fließmittelgehalt und die Struktur des Fließmittels gesteuert werden kann. Demnach sinkt die Thixotropie mit abnehmendem Feststoffgehalt, mit zunehmender maximaler Packungsdichte, mit zunehmender Fließmitteladsorption sowie bei Verwendung von Fließmitteln hoher Molmasse. Eine Besonderheit ultrahochfester Betone stellt dabei die Dominanz der Fließmitteladsorption gegenüber dem Feststoffgehalt bei sehr hohen Feststoffgehalten (sehr geringen w/z-Werten) dar.

Einfluss der rheologischen Kenngrößen auf die Verarbeitungseigenschaften und das Formfüllungsvermögen

In den anschließenden Untersuchungen wurde der Einfluss der rheologischen Kenngrößen auf die Verarbeitungseigenschaften und das Formfüllungsvermögen quantifiziert. Es konnte gezeigt werden, dass sich das Formfüllungsvermögen der UHPC mit zunehmender dynamischer Fließgrenze τ_{0D} reduziert, Bild 5a. So verringerten sich mit dynamischer Fließgrenze τ_{0D} die gemessenen bzw. berechneten Fließstrecken (FS bzw. FS_{calc}) in den Modellschalungen L.25 bis L.75.

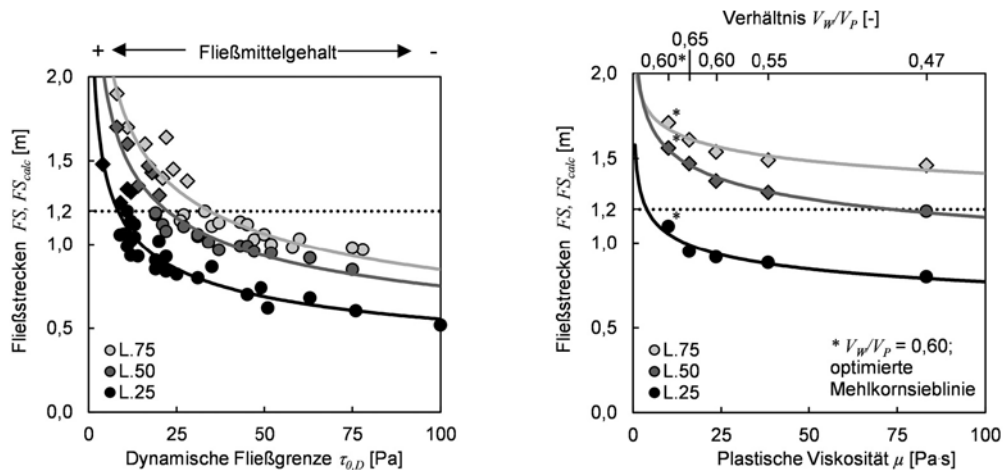


Bild 5:
Formfüllung der Modellschalungen mit einer lichten Höhe der Fließöffnung von 25 mm (L.25) bis 75 mm (L.75) in Abhängigkeit der
a) dynamischen Fließgrenze $\tau_{0,D}$ und
b) plastischen Viskosität μ

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass das Formfüllungsvermögen auch mit zunehmender plastischer Viskosität μ reduziert wird, Bild 5b. Die plastische Viskosität steht jedoch nicht im direkten kausalen Zusammenhang mit dem Formfüllungsvermögen. Ursächlich für dieses Verhalten ist vielmehr der thixotrope Strukturaufbau der UHPC während der Fließbewegung.

Im Hinblick auf die praxisgerechte Bewertung der Verarbeitungseigenschaften konnte darüber hinaus ein direkter Zusammenhang der rheologischen Kennwerte dynamische Fließgrenze $\tau_{0,D}$ und plastische Viskosität μ mit den in praxistauglichen Verarbeitbarkeitsversuchen ermittelten Kennwerten Setzfließmaß SF und Fließzeit t_{500} nachgewiesen werden, Bild 6. Dies ist insbesondere für die baupraktische Anbindung der gewonnenen Erkenntnisse von Belang.

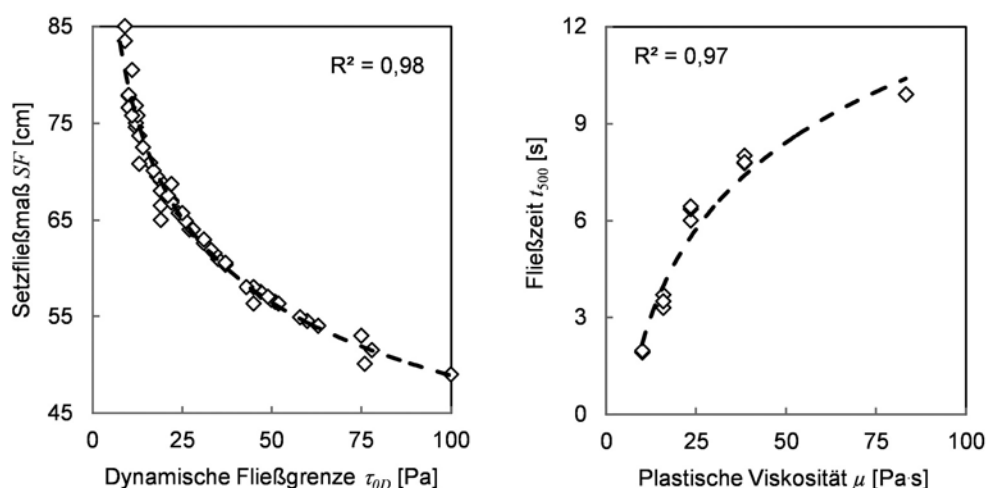
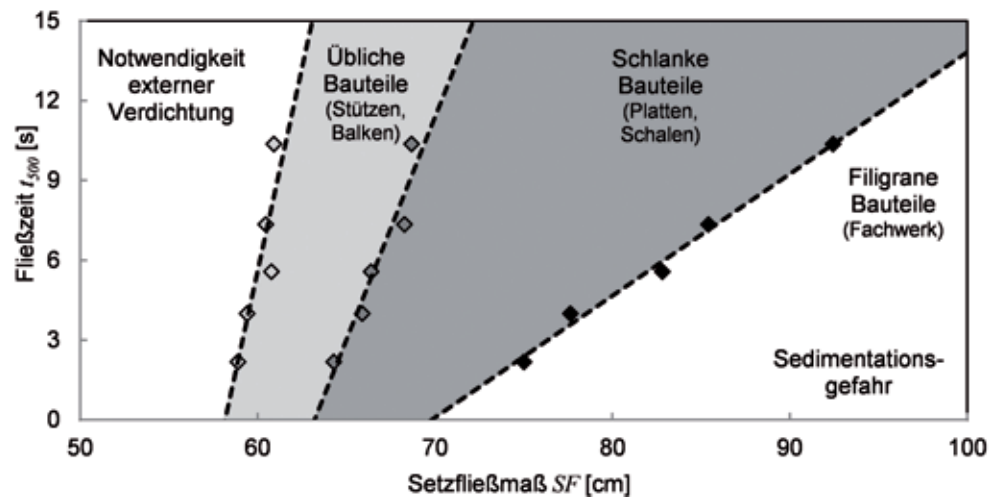


Bild 6:
Zusammenhang zwischen
a) der dynamischen Fließgrenze $\tau_{0,D}$ und dem Setzfließmaß SF
sowie b) der plastischen Viskosität μ und der Fließzeit t_{500}

Praxisgerechte Bewertung des Formfüllungsvermögens von UHPC

Aus der Kombination aller Untersuchungsergebnisse wurden schließlich Mindestanforderungen an die Verarbeitungseigenschaften der UHPC - Viskosität und Fließgrenze - zur

Bild 7:
Mindestanforderungen an die Verarbeitungseigenschaften (SF , t_{500}) von UHPC in Abhängigkeit der Bauteilklasse.



Sicherstellung einer ausreichenden Formfüllung in Abhängigkeit von drei definierten Bauteilklassen abgeleitet, Bild 7. Erwähnenswert ist insbesondere, dass bei der Bewertung auch die thixotropen Eigenschaften Berücksichtigung finden. So steigt mit zunehmender Fließzeit (Viskosität) eines UHPC die Anforderung an das Mindest-Setzfließmaß (max. Fließgrenze), um vollständige Formfüllung zu gewährleisten.

AG Stahl und Korrosion

7.2.6 Ermüdungsverhalten von Betonstahl unter Korrosionsbedingungen

Bearbeiter: Dr.-Ing. Kai Osterminski, Dipl.-Ing. Sylvia Keßler, Dipl.-Ing. Falk Meyer,
Dr.-Ing. Andreas Volkwein

Förderer: DFG

Das Ziel des Verbundforschungsvorhabens war es, eine wissenschaftliche Basis für das Dauerschwingverhalten von Betonstahl unter Korrosionsbeanspruchung zu schaffen. Hierfür wurden zahlreiche Untersuchungen mit dem Verbundpartner der Universität Stuttgart durchgeführt. Im Einzelnen waren die nachfolgenden Fragestellungen zu beantworten:

o Eigenspannungen

Der Betonstabstahl wird von der Schmelze über sequentielle Walzvorgänge, der Öl- bzw. Wasserkühlstrecke bis hin zum finalen Anlassen des Werkstoffs in seiner Gefügeausbildung stark beeinflusst. Es ist anzunehmen, dass dabei auch Eigenspannungen entstehen. Diese dürften das Dauerschwingverhalten beeinflussen und wurden daher näher untersucht.

o Anriss und Rissfortschritt (Universität Stuttgart)

Das Versagen infolge Ermüdung kann in zwei grundsätzliche Prozesse unterteilt werden: Zeit bis zum Anriss und Risswachstum (Rastlinienentstehung: Risseinleitung und Rissausbreitung). Messmethoden wurden entwickelt, die eine gezielte Beschreibung des Versagensmodus ermöglichen.

o Oberflächengestalt

Arbeiten aus den 1960er und 1970er Jahren haben die zentrale Bedeutung der Oberflächengeometrie für die Kerbspannungsausprägung und folglich das Dauerschwingverhalten von Betonstabstahl herausgestellt. Eine Bewertung des Korrosionseinflusses kann nur

unter vorheriger Quantifizierung des Einflusses der Oberflächengestalt vorgenommen werden. Hierfür wurde ein Laser-Linien-Scan Messgerät entwickelt, welches eine hochauflösende Abbildung des Betonstahls erlaubt.

o **Korrosion von Betonstahl in Lösung (Universität Stuttgart)**

Die Korrosion von Betonstahl beeinflusst dessen Robustheit bei Ermüdungsbeanspruchung elementar. Anhand gezielter Laborversuche mit unterschiedlich korrosiven Medien wurde das Ermüdungsverhalten quantifiziert.

o **Korrosion von Betonstahl in gerissenem Beton**

Diese Fragestellung führt die Arbeiten zur Einwirkung von Lösungen der Universität Stuttgart weiter aus. Dabei stand die realistische Belastungs- und Beanspruchungssituation von einbetoniertem Betonstahl im Fokus.

Die Eigenspannungsverteilungen, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens festgestellt wurden, widerlegen die allgemeine Annahme, dass am Randbereich des Betonstahls eine Druckvorbelastung infolge der Martensitanreicherungen besteht. Es deutet einiges darauf hin, dass die Bedeutung des Walzvorgangs für die Entstehung der Eigenspannung bedeutsamer ist, als die des Abkühlens. Sowohl die Größenordnung von 20 35 N/mm² Zugspannung, die sich im Randbereich zeigt, als auch der Gradient (und die daraus resultierende Scherspannung), der sich ausbildet, zeigen, dass die Eigenspannung als zentraler Punkt für das Dauerschwingverhalten berücksichtigt werden muss, Abb. 1 und 2. Diese Spannungen überhöhen die Oberspannung im Dauerschwingversuch um z.T. mehr als 10% und verändern somit das eingeprägte Lastregime elementar. Hinzu kommen die Unterschiede zwischen den hier untersuchten Herstellwerken. Es ist zu vermuten, dass ein Teil der Streuungen, die bei den Ergebnissen von Dauerschwingversuchen auftreten, auf den Einfluss des Eigenspannungszustands zurückzuführen ist. Um die Ergebnisse weiter abzusichern, ist dringend geraten, gezielte Untersuchungen an Proben anderer Hersteller durchzuführen.

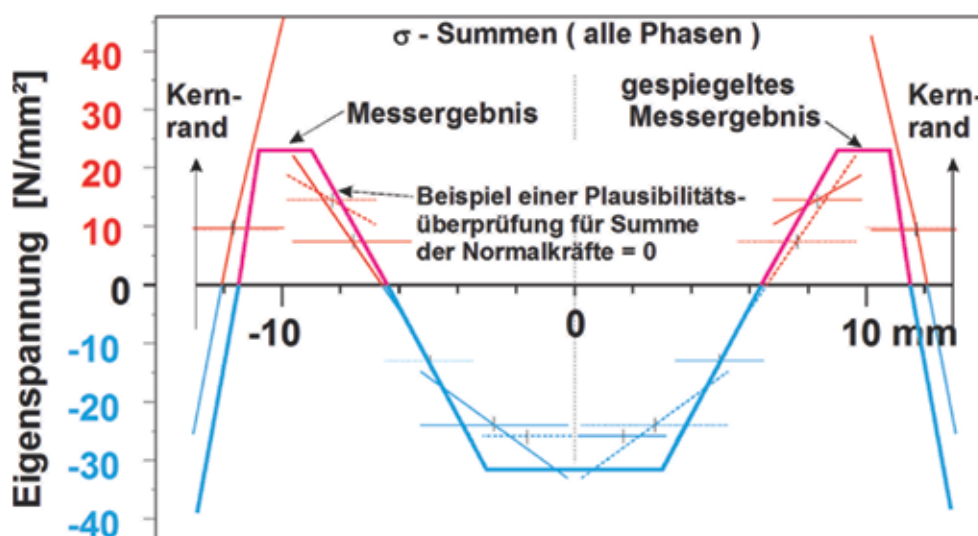
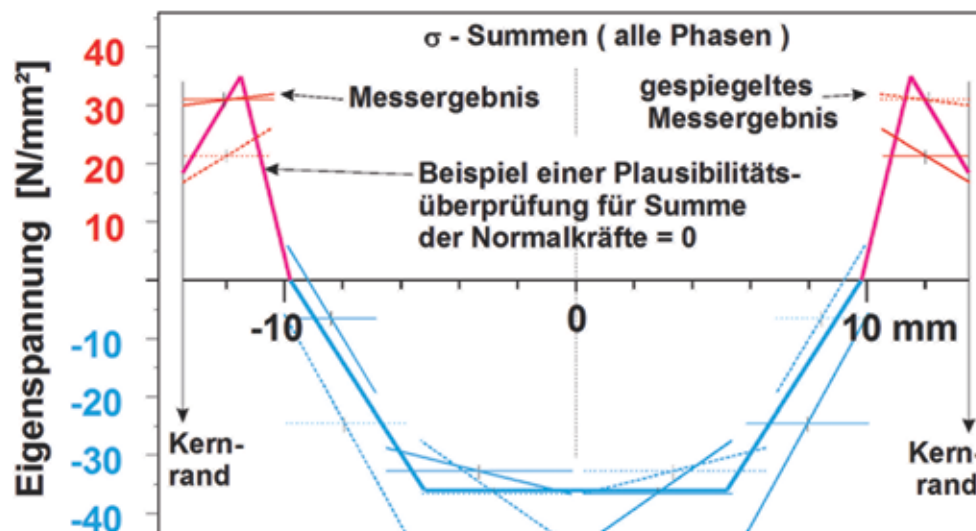


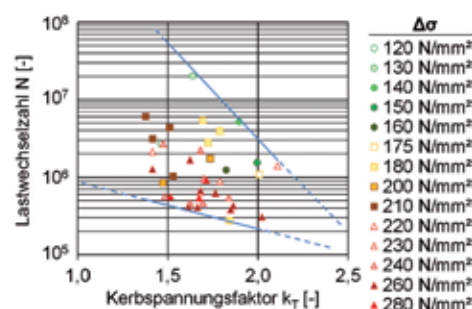
Abbildung 1:
Eigenspannungsverteilung,
Durchmesser 28 mm, Werk A,
Mitte der Walzenstandzeit

Abbildung 2:
Eigenspannungsverteilung
Durchmesser 28 mm, Werk B,
Mitte der Walzenstandzeit

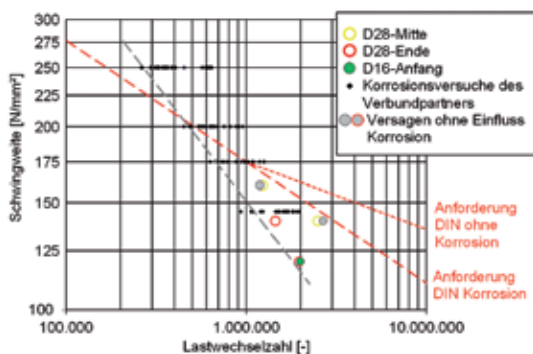


Im Rahmen der Untersuchungen des Oberflächengeometrieinflusses ist es gelungen, einen rechnerischen Bezug zwischen Oberflächengeometrie und der erreichbaren Lastwechselzahl in Abhängigkeit der Schwingweite zu ermitteln, Abb. 3. Ein Modell aus den 1970er Jahren wurde mit den hier produzierten Ergebnissen bestätigt. Die Modelleingangsgrößen wurden statistisch quantifiziert und können nun für eine Modellierung in Ansatz gebracht werden. Unter Ansatz der in der Norm verankerten Sicherheiten konnte nachgewiesen werden, dass bei dem hier untersuchten Material mit einer erhöhten Versagenswahrscheinlichkeit gerechnet werden muss. Da hierfür mögliche Einflüsse der unterschiedlichen Durchmesser die Streuungen bedingen können, sollten weitere Versuche in ausreichend hoher Zahl durchgeführt werden, um getrennt nach Durchmesser und Schwingweite bewerten zu können. Da der Einfluss des Herstellvorgangs diese Ergebnisse noch überlagert, kann ein höherer Wissensstand über eventuelle Eigenspannungen und deren Ursprung hilfreich sein.

Abbildung 3:
Einfluss des Kerbspannungsfaktors auf die erreichte Lastwechselzahl für Durchmesser 16 und 28 mm



Die Ergebnisse der Dauerschwingversuche unter kombinierter Einwirkung der Korrosion (in Lösung und in gerissenem Beton) des Betonstahls deuten an, dass der Bemessungsansatz der EN 1992 nicht auf der konservativen Seite liegt, Abb. 4. Zunächst beeinflusst die Korrosion die Stelle an der Stahloberfläche, von der aus der Ermüdungsbruch ausgeht. Handelt es sich um einen flächigen Angriff der Korrosion, müsste ein ähnlicher Einfluss festzustellen sein wie bei der Oberflächendegradation infolge Walzenverschleiß. Bei der Lochfraßkorrosion ist vermutlich die Geometrie der Korrosionsstelle (Tiefe und Breite der Narbe) ein entscheidender Faktor. Die Entwicklung der Narbe ist ein stark zeitabhängiger Prozess. Die Umlagerung des Eigenspannungszustands aufgrund der Korrosion ist ein weiterer Einflussfaktor. Diese offenen Punkte sind insbesondere im Hinblick auf den derzeit unsicheren Bemessungsansatz der Norm anhand weiterführender Untersuchungen zu quantifizieren.



Tab. 1: Ergebnisüberblick, Abb. 3

Schwingweite [N/mm ²]	Lastwechselzahl [·10 ⁶]	Symbol in Abb.3 [-]
120	1,215	●
120	1,238	○
140	2,668	●
140	1,451	○
140	2,490	○
160	1,956	○
160	1,996	●

Abbildung 4 (links):
Ergebnisse der Dauerschwingversuche unter kombinierter
Einwirkung der Korrosion im
Riss

Tabelle 1 (rechts):
Ergebnisüberblick, Abb. 3

AG Chemie

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

Bearbeiter: Tobias Gutberlet M. Sc.

Förderer: DFG

Die entscheidenden mechanischen und chemischen Eigenschaften des Betons werden bekanntlich durch die Phasen und Porengefüge, die während der Erhärtung des Zements entstehen, bestimmt. Eine gezielte Optimierung der mechanischen und chemischen Eigenschaften hin zu einem „high-tech“-Beton ist nur mit Hilfe von Grundkenntnissen über die Entstehung des Mikrogefüges möglich. Daher war die Analyse der Strukturbildung in Zementstein und dabei vor allem die Wasserbindung während der ersten 24 Stunden der Hydratation des Zements das Ziel dieses Projektes. Weil die Festigkeit des Betons primär auf C-S-H-Phasen (Calciumsilicathydrate) aus der Hydratation der Hauptklinkerphase C_3S (Tricalciumsilicat) zurückzuführen ist, wurde die Entwicklung der Struktur und Zusammensetzung von C S H bei der Hydratation von Mischungen aus C_3S und Silicastaub, als häufiger Bestandteil von Hochleistungsbetonen, untersucht. Zu diesem Zweck wurde die quasi-elastische Neutronenstreuung (QENS) zum ersten Mal im Bauwesen in Deutschland eingesetzt, um in situ die Bindung des Mischwassers in Zeitschritten von 15 Minuten während der Hydratation zu verfolgen. Die hohe Intensität von Neutronen am weltführenden

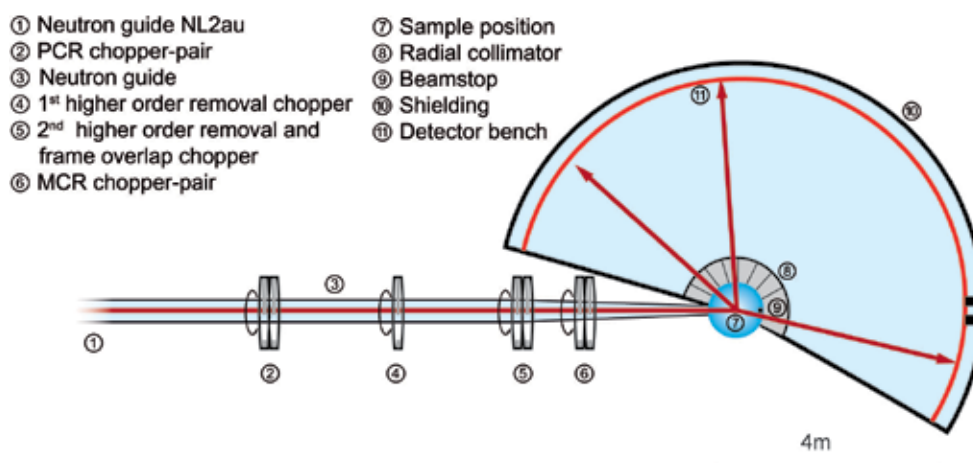


Abbildung 1:
Schematischer Aufbau des
Flugzeitspektrometers (TOF-
TOF). Ein monochromatischer
Neutronenstrahl der mecha-
nisch durch eine Reihe von
schnellrotierenden Chopper-
scheiben erzeugt wird, wird
auf eine Probe gelenkt. Die
Intensität der gestreuten Neu-
tronen wird durch He-Zählrohre,
die kreisförmig bei Streuwinkel-
n zwischen -30° und 140
° angeordnet sind, registriert.
An jedem Detektor wird auch
die an der Probe übertragene
Energie über die Flugzeit der
Neutronen bestimmt. Siehe
[http://www.mlz-garching.de/
toftof](http://www.mlz-garching.de/toftof).

QENS-Spektrometer der Forschungs-Neutronenquelle am Heinz Maier-Leibnitz Zentrum in Garching hat neue Erkenntnisse zum Verhalten des Mischwassers vor allem während der anfänglichen Ruhephase der Betonhydratation ermöglicht.

Die Entwicklung der aufgenommenen QENS-Spektra während der Hydratation von C_3S ist in Abb. 1, rechts, dargestellt. Jedes QENS-Spektrum enthält Beiträge von Peaks unterschiedlicher Breite, die bei einer Energieänderung von 0 meV liegen. Durch die Entfaltung der Spektren können die Anteile von freiem Wasser (d.h. nicht reagiert), chemisch gebundenem Wasser (d.h. in C-S-H und Portlandit) und physikalisch gebundenem Wasser (d.h. in kleinen Gelporen bzw. Früh-C-S-H) berechnet werden. Die Zunahme der Intensität am Ende der Ruhephase nach ca. fünf Stunden in Abb. 1, rechts, kennzeichnet die Erhöhung des Anteils von chemisch gebundenem Wasser in der Wachstumsphase.

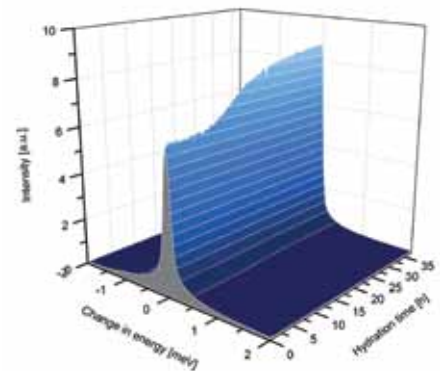


Abbildung 1:
Rechts: QENS-Spektren aufgenommen während der Hydratation von C_3S , w/b = 0,48.

Ein sehr interessanter und unerwarteter Effekt zeigte sich in den QENS-Messungen innerhalb der ersten Stunde nach Wasserzugabe. Es konnte erstmals eine deutliche Bildung von physikalisch gebundenem Wasser in der Ruhephase bei kaum vorhandenem chemisch gebundenem Wasser beobachtet werden. Abb. 2, links, zeigt die Entwicklung des Anteils von chemisch gebundenem Wasser während der ersten 30 Stunden der Hydratation von C_3S . Obwohl die Bindung von Wasser in den ersten fünf Stunden vernachlässigbar ist erreicht der Anteil des physikalisch gebundenen Wasser (Abb. 2, rechts) einen Wert von ca. 8%. Dieser frühe Anstieg des physikalisch gebundenen Wassers wird dem Wasser in einer metastabilen Zwischenphase (Früh-C-S-H) mit sehr großer spezifischer Oberfläche (ca. 800 m²/g) zugeschrieben. Eine detaillierte Diskussion und Schlussfolgerung ist in T. Gutberlet et al. Cem. Concr. Res. 51 (2013) 1048-108 zu finden.

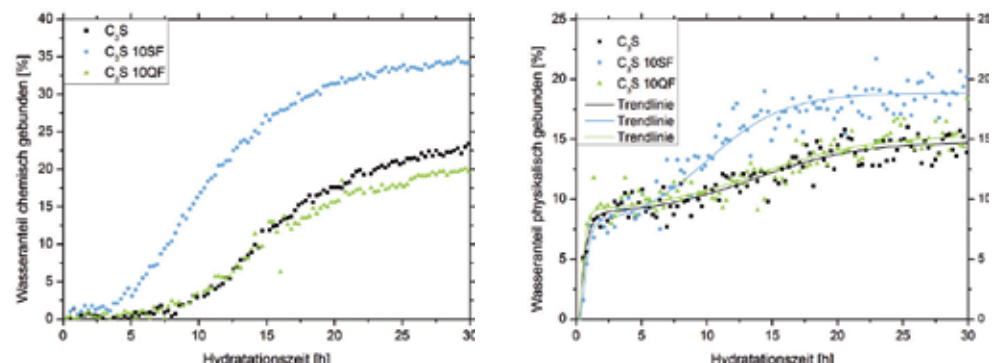


Abbildung 2:
Links: Entwicklung chemisch gebundenen Wassers in den Mischungen C_3S , C_3S mit 10 M.-% Quarzmehl (10QF) und C_3S mit 10 M.-% Silicastaub (10SF) jeweils bei w/b 0,48. Rechts: Entsprechende Entwicklung des physikalisch gebundenen Wassers

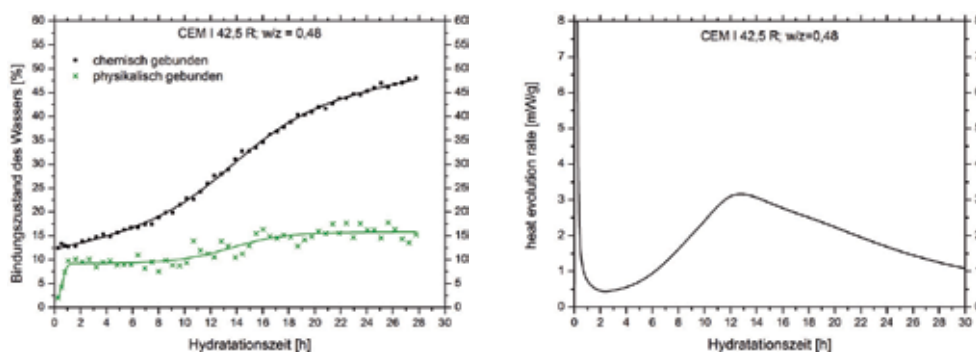
Ein hoher Anteil von physikalisch gebundenem Wasser am Anfang der Induktionsphase wurde ebenfalls für Bindemittelmischungen mit 10% Silicastaub (SF) bzw. 10% Quarzmehl festgestellt.

Abb. 2, links, verdeutlicht auch der beschleunigende Effekt des Silicastaubs auf die Hydratationsreaktion, d.h. eine Verkürzung der Ruheperiode. Nach der Ruheperiode werden in

der Wachstumsphase die Anteile von sowohl chemisch als auch physikalisch gebundenem Wasser durch den Silicastaub deutlich erhöht.

Die Polymerisation der C-S-H-Phasen während der Hydratation wurde auch mit ^{29}Si MAS NMR untersucht. Bei reinem C_3S wird in der Wachstumsphase (bis 15 h) mehr Q^2 als Q^1 gebildet, folglich bildet sich im Mittel ein eher „langkettiges“ C-S-H aus (z.B. nach 7 h Kettenlänge $\approx 6,2$ Silicattetraeder). Durch die Zugabe von Silicastaub kehrt sich das Verhältnis der Signalintensität von Q^1 (Silicattetraeder am Kettenanfang) zu Q^2 (verbrückende Silicattetraeder) um und es bildet sich „kurzkettiges“ C-S-H (nach 7 h $\approx 3,7$ Silicattetraeder). Der Austausch von C_3S durch Silicastaub führt zu einer wesentlichen Änderung der Struktur von C-S-H am Anfang der Hydratation (Wachstumsphase). Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten kann die verfügbare Gesamtoberfläche der Feststoffe und/oder unterschiedliches Lösungsverhalten von C_3S sein. Dies wirkt auch beschleunigend auf die C-S-H-Bildung.

Physikalisch gebundenes Wasser wurde auch bei der Hydratation eines Portlandzements (CEM I 42,5 R) mit QENS direkt nach Wasserzugabe beobachtet (Abb. 3, links). Jedoch ist der Anteil des chemisch gebundenen Wassers in der Induktionsperiode deutlich höher als bei der Hydratation von C_3S . Dies wird durch die Bildung von Ettringit neben dem Früh-C-S-H erklärt.



7.2.8 Grundlagen des Betonsäurewiderstands - Einfluss der korrodierten Schicht

Bearbeiter: Tobias Gutberlet M. Sc., Dr. rer. nat H. Hilbig
Förderer: DFG

Die Lebensdauer von Betonbauteilen in Industrie und Landwirtschaft kann durch den lösenden Angriff von aggressiven Medien erheblich reduziert werden. Die Korrosionsrate wird hauptsächlich durch die Diffusion von Säurespezies durch die korrodierte Schicht zum noch unbeschädigten Beton bestimmt.

Die Forschungsarbeit dieses Vorhabens hat sich mit den Änderungen der Phasen des Zementsteins während des Säureangriffs, die zur Bildung der Korrosionsschicht führen, befasst und wie dies durch den pH-Wert und Art der Säure sowie Zusatzstoffe beeinflusst wird. Zementsteinproben aus CEM I 42,5 R mit verschiedenen Anteilen an Zusatzstoffen wurden 91 Tage luftdicht vorgelagert und anschließend 28 Tage in Salz-, Schwefel-, Essig- bzw. Zitronensäure gelagert. Die gewählten Säuren stellen die Bandbreite des Säureangriffs in der Praxis dar, d.h. Mineralsäuren, gepufferte organische Säuren sowie Säuren mit und

Abbildung 1:
Autotitrator

ohne lösliche Calciumsalze. Ein Autotitrator (Abb. 1) wurde verwendet, um durch automatische Nachdosierung der jeweiligen Säure (pH 0) den pH-Wert der Mineralsäuren möglichst konstant zu halten.

Das Aussehen der Probeplatten nach 28 Tagen in HCl ist vom pH-Wert abhängig, Abb. 2. Bei pH 4 sind die Proben visuell ähnlich zu den unbehandelten Referenzproben, während bei pH 3 bräunliche Bereiche auf der Oberfläche erscheinen, welche wahrscheinlich aufgrund der Ausfällung von $\text{Fe}(\text{OH})_3$ entstehen. Die bei pH 2 gelagerte Probe ist deutlich heller.

Bei den organischen Säuren wurde der pH-Wert während der Lagerung in einem Standtest durch die Verwendung der entsprechenden Pufferlösung möglichst konstant gehalten.



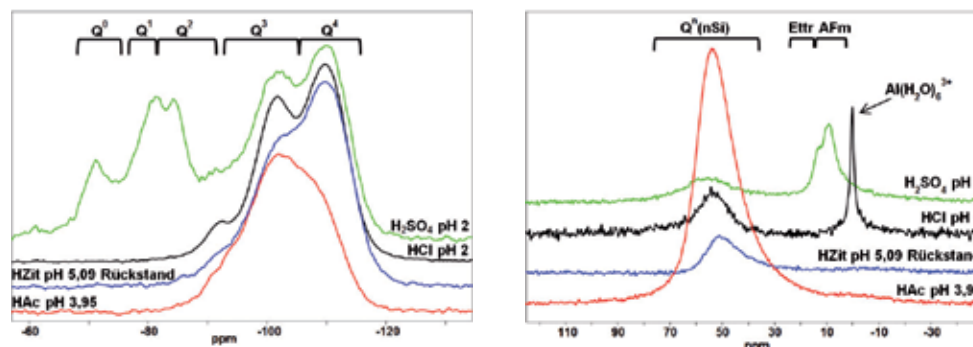
Abbildung 2:
Korrodierte Scheiben nach
28 d in HCl bei verschiedenen
pH-Werten.



Nach der Lagerung wurden die Scheiben für Untersuchungen mit ^{29}Si - und ^{27}Al -NMR sowie Röntgenbeugung in Isopropanol feingemahlen und getrocknet. Für die chemische Analyse (ICP-OES) wurde ein Lithiummetaboratschmelzaufschluss mit anschließender Salpetersäurebehandlung durchgeführt. So konnte der Feststoff vollständig in Lösung gebracht werden. Die Lagerungslösungen wurden ebenfalls mit ICP-OES analysiert, um die Stoffbilanzen zu kontrollieren.

Vergleicht man die Korrosionsprodukte aus den Lagerungen in den verschiedenen Säuren (vgl. Abb. 3), so ist ersichtlich, dass die Zusammensetzung der Korrosionsprodukte von

Abbildung 3:
Vergleich der Korrosionspro-
dukte der Mischung mit 10%
Metakaolin: links ^{29}Si -NMR,
rechts: ^{27}Al -NMR (HZit = Zitrö-
nensäure, HAc = Essigsäure;
HCl = Salzsäure, H_2SO_4 =
Schwefelsäure)



verschiedenen Faktoren beeinflusst werden: pH-Wert, Dichtigkeit/Diffusion, Zeit, Art und Menge der Zusatzstoffe, Art der Säure. Die Korrosion führt offensichtlich immer zu einer mehr oder weniger starken Vernetzung der Silikate in Richtung dreidimensionales Netzwerk. Dabei ist es momentan noch nicht geklärt, inwiefern der Vernetzungsgrad vom pH-Wert gesteuert ist oder nur eine Zeitabhängigkeit darstellt. Die Menge an eingebautem Al und Fe hängt nur zum Teil von den eingesetzten Zusatzstoffen ab, starken Einfluss hat hier die Art der Säure, wie das am Beispiel der Essigsäure deutlich wurde.

Mikrohärte

Anhand der Härte der Proben nach Säurelagerung kann der Abrasionswiderstand der korrodierten Schicht bei den verschiedenen pH Werten und Mischungen qualitativ verglichen werden. Aufgrund des Korrosionsverlaufes wurden nicht nur an den Scheibenoberflächen gemessen, sondern auch tiefenabhängig an Schnittflächen. Im Rahmen einer Masterarbeit wurden eine pH-Abhängigkeit und eine Tiefenabhängigkeit der gemessenen Härten festgestellt (siehe Abb. 9). Um einen repräsentativen Wert jeden Bereiches zu bekommen sind mindestens fünf Messungen je Bereich notwendig. Somit erhöhte sich die Anzahl je Scheibe auf 15. In der Masterarbeit wurden somit nur ein Teil der Proben bearbeitet. Interessanterweise zeigte sich, dass die bei pH 2 stattgefundenene starke Vernetzung des Korrosionsprodukts zu einer höheren Härte geführt hat, als dies bei den bei pH 3 entstandenen Korrosionsprodukt der Fall war. Weitere Details und Korrelationen mit den anderen Messmethoden werden in der laufenden Masterarbeit erwartet.

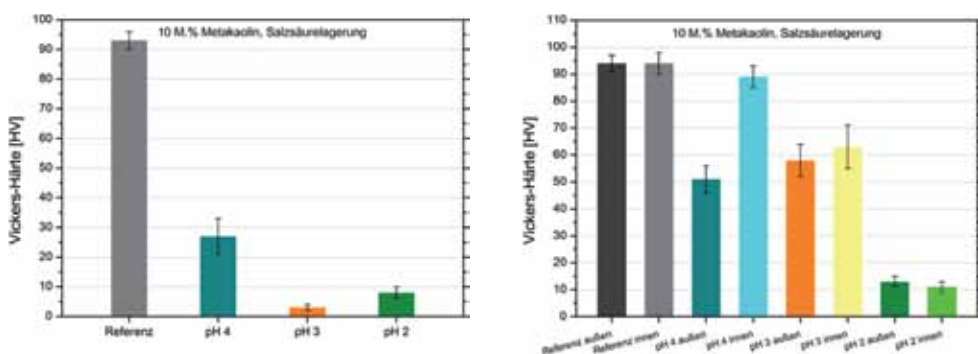


Abbildung 9: Vickers-Härten der Mischung mit 10 M.% Metakaolin vor und nach Säurelagerung, gemessen auf der Scheibenoberfläche (links) und über die Dicke der Scheiben (rechts).

LA ICP MS

Zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzungen der Schichten wurde die Laserablations-ICP-MS (LA-ICP-MS) eingesetzt, die es ermöglicht, orts aufgelöst Elementverteilungen zu ermitteln. Im Rahmen der Masterarbeit von Herrn Rommel (siehe Kap. 4.2.7.) wurden von ausgewählten Mischungen und Säuren jeweils eine Scheibe 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.

Es wurden zu erwartende Ergebnisse bestätigt, wie z.B. die Auslaugung von Calcium, aber auch neue Erkenntnisse gewonnen. So zeigte sich bereits bei HCl pH 4 eine komplette Durchdringung der Probe mit Chloridionen, wohingegen Schwefel (Sulfat) bei H₂SO₄ pH 2 den größtenteils noch intakten Kern nicht erreicht. Des Weiteren besteht die korrodierte Schicht bei beiden Säuren hauptsächlich aus Silizium mit Anteilen an Eisen und je nach pH-Wert unterschiedlichen Mengen Aluminium. Das Verhalten des Eisens (wahrscheinlich Eisenhydroxid) unterscheidet sich säureabhängig. Bei HCl befinden sich vier eisenhaltige

Schichten mitten im korrodierten Material (Abb.10, pH 2), bei H_2SO_4 wandert je eine mit der Korrosionsfront. Das resultierende Silikatgerüst wird mit Gips aus der Reaktion des freigesetzten Calciums und dem Sulfat der Säure ausgefüllt und, zumindest im Fall der hüttensandhaltigen Probe, ausgeweitet.

In Summe haben die Untersuchungen nicht nur zur Charakterisierung der eigentlichen Korrosionsprodukte beigetragen. Es konnte auch gezeigt werden, dass bei höheren pH-Werten, obwohl augenscheinlich kaum angegriffen, doch deutliche Änderungen in der Struktur der Phasen auch im Innenbereich der Proben erfolgt sind, je nach Säure sehr unterschiedlich, und dass diese auch zur Verringerung der Härte geführt haben. Details werden gerade in „Cement and Concrete Research“ veröffentlicht.

AG Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine

7.2.9 Entwicklung von Prozessvarianten und einer neuartigen Aufbereitungstechnik zur reproduzierbaren Herstellung von definierten Festkörpern für den Bau von Asphaltdeckschichten mit akustisch optimaler Textur mit künstlicher Gesteinskörnung (Elektroofenschlacken)

Bearbeiter: Ltd.Akad.Dir. Dr.-Ing. Thomas Wörner, Olga Kazakova, M.Sc.

Förderer: AG Bundesanstalt für Straßenwesen, Auftrag Nr. FE 06.092/2010/DRB

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Möglichkeit geschaffen, Körnungen aus Elektroofenschlacke (EOS-Körnungen) so herzustellen, dass sie eine gleichbleibende Qualität aufweisen und in der Folge in lärmoptimierten Asphaltdeckschichten eingesetzt werden können. Die Anforderungen an die Qualität der Gesteinskörnung zur Herstellung der lärmoptimierten Asphaltdeckschichten sind sehr hoch. So hat beispielsweise neben der Festigkeit und dem Polierwiderstand auch die Kornform für die Ausbildung der erforderlichen dauerhaften Oberflächenstruktur eine große Bedeutung. Folgerichtig wurden für das vorliegende Forschungsvorhaben die Kompetenzen der Max Aicher GmbH (MAH) als Produzent und Aufbereiter von Elektroofenschlacke und des Centrums Baustoffe und Materialprüfung der TU München für die bautechnische Bewertung der Elektroofenschlacke und für die Konzeption der lärmindernden Asphalte gebündelt.

Nach umfangreichen Prüfungen unterschiedlich aufbereiteter Elektroofenschlacken konnte unter Berücksichtigung der Verfahrensweise in einem neuen Schlackenbeet eine Aufbereitungskonstellation gefunden werden, mit der diese Grundanforderung erfüllt werden kann. Nach Laborversuchen an PMA, PA und SMA konnten mit den final hergestellten Elektroofenschlacken Erstprüfungen für den Bau von Versuchsfeldern erstellt werden. Nach dem Bau der Versuchsfelder im Bereich eines Mitarbeiterparkplatzes auf dem Betriebsgelände der Annahütte im Hammerau wurden Bohrkerne und Asphaltmischgutproben für die abschließenden Laboruntersuchungen entnommen. Bei diesen Untersuchungen zeigten sich die Versuchsvarianten als weitgehend den konventionellen Asphalten vergleichbar, das tatsächliche Gebrauchsverhalten muss vor Ort in regelmäßigen Begehungen überwacht werden.

Bei den Akustikmessungen durch Müller BBM ergaben sich die in nachfolgender Abbildung wiedergegebenen Messwerte. Die mit den unter Verwendung von Elektroofenschlacke hergestellten Asphalttschichten zeigen sehr gute Lärminderungen, bei den angestellten Vergleichen liegen sie nahezu so günstig wie zweischichtige offenporige Asphalte und güns-

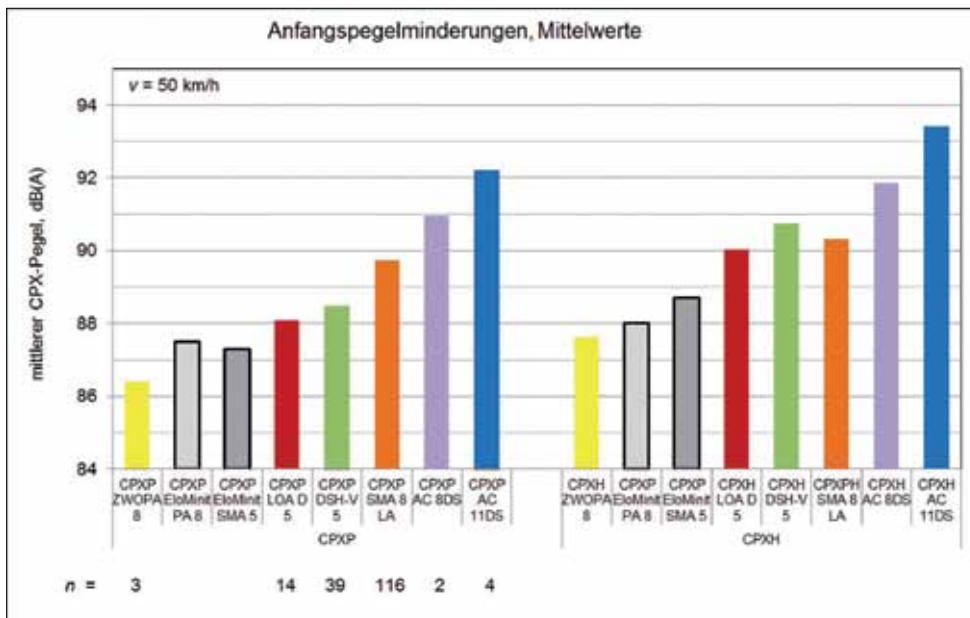


Abb. 1: Vergleich unterschiedlicher Beläge.

tiger als die ansonsten eingesetzten lärmindernden Asphaltvarianten. Die gefundenen Ergebnisse gilt es durch weitere Probefelder zu untermauern, bevor eine endgültige Aussage getroffen werden kann.

AG Zerstörungsfreie Prüfung

7.2.10 Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der Betonabplatzungen bei Brandversuchen

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Ronald Richter

Partner: Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig GmbH)

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

Die Beständigkeit von Beton und Brandschutzkonstruktionen bei Tunnelbrandbeanspruchungen ist für neue und bestehende Tunnel von hoher Bedeutung. Die Beurteilung erfolgt durch experimentelle Prüfungen, die sehr aufwendig und daher teuer sind. Daher war es wichtig, aus Untersuchungen des Brandverhaltes von Beton möglichst viele belastbare Daten und damit nützliche Informationen zur Verfügung stellen zu können. Eine Information über die zeitliche Entwicklung dieser Abplatzungen und deren Tiefen erreicht man durch konventionelle Messtechnik nicht. Deswegen wurde im Projekt die Entwicklung und Zusammenstellung von Messtechnik und Analysesoftware für die Detektion der Entstehung und des Schädigungsverlaufes von Abplatzungen bei Beton unter Brandbeanspruchung vorangetrieben. Dies ermöglicht nun eine verbesserte Informationsgewinnung und Dokumentation von experimentellen Brandversuchen. Die Messtechnik wurde an die Prüfstände der MFPA Leipzig GmbH angepasst und durch automatisierte Auswertungsprogramme eine wirtschaftliche und robuste Anwendbarkeit erreicht.

7.3 Laufende Forschungsvorhaben

AG Bindemittel und Zusatzstoffe

7.3.1 Wirkung von Additiven auf die Lösungsmechanismen von Flugaschen in zementären Systemen

(Fortsetzung)

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

7.3.2 Einsatz von Flugasche im Beton zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion - Langzeitverhalten

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

7.3.3 AKR-Vermeidung durch Flugasche bei Alkalieintrag von außen - Langzeitlagerung

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

7.3.4 Wirkung von höheren Flugaschegehalten auf den Sulfatwiderstand von Beton – Langzeitlagerung

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

AG Betontechnologie

7.3.5 Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton-Auslagerungsversuch

Bearbeiter: Dipl.-Ing. C. Thiel
Förderer: AiF/FTB

7.3.6 Schalen aus gradierten Betonfertigteilen

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

7.3.7 Einfluss von CO₂-Druck und Betonfeuchtegehalt auf das Porengefüge des Betons während der Carbonatisierung

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

7.3.8 Simulation der Beanspruchung von Betonfahrbahndecken

Bearbeiter: Dr.-Ing. A. Spengler
Förderer: BMVI / bast

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

Bearbeiter: Dipl.-Ing. T. Kränkel
Förderer: HILTI AG/ fischerwerke GmbH

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

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

AG Stahl und Korrosion

7.3.11 Beurteilung der Korrosionsschutzwirkung bei Betonstahl, der mit Epoxidharz pulverbeschichtet ist

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

7.3.12 Korrosionsverhalten von Stahl in Beton bei Instandsetzungsprinzip W-CI in gerissenem Beton

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

AG Chemie

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

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

AG Zerstörungsfreie Prüfung

7.3.14 MAIzfp: Kombinierte zerstörungsfreie Prüfmethoden zur Qualitätssicherung von Faserverbundwerkstoffen

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

7.3.15 HEALCON - Self-healing concrete to create durable and sustainable concrete structures

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

7.3.16 MEMIN – Multidisciplinary Experimental and Modeling Impact Research Network, Teil II

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

7.3.17 WindForS und EuroTech Universities

Bearbeiter: Prof. Christian Große
Förderer: Land Baden-Württemberg, Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst

7.4 Neue Forschungsvorhaben

AG Bindemittel und Zusatzstoffe

7.4.1 Carbonatisierung von zementgebundenen Baustoffen mit CO₂ unter erhöhtem Druck oder im überkritischen Zustand

Bearbeiter: Dr.-Ing. Liudvikas Urbonas

Förderer: DFG

Der Fortsetzungsantrag baut auf dem ersten Teil des Forschungsvorhabens auf. Aus den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen haben sich neue Fragen ergeben, die nun durch die weiteren Untersuchungen geklärt werden sollen, um eine zielgerichtete Nutzung der positiven Effekte der Carbonatisierung für die Herstellung von innovativen zementgebundenen Werkstoffen mit definierten Eigenschaften, die unmittelbar nach der Behandlung vorliegen, zu ermöglichen. Im ersten Förderungsabschnitt wurden Parameter wie Alkaligehalt, Ausgangsporosität (w/z-Wert) und Ausgangsfeuchte der Zementsteinproben sowie Behandlungsdruck und -dauer variiert. Zusätzlich wurde der Einfluss der Zusatzstoffe wie Hüttensand, Kalksteinmehl und Dolomitmehl auf den Carbonatisierungsvorgang und die Eigenschaften von carbonatisierten Zementsteinen untersucht. In der geplanten Fortsetzung der Forschungsarbeit sollen noch offene Fragen zu der Entwicklung von Phasen, Festigkeit und Volumen während der Beaufschlagung mit überkritischem CO₂, bzw. gasförmigem CO₂ unter erhöhtem Druck und in der Zeit nach der Beaufschlagung beantwortet werden. Dabei stehen die Feinheit und die mineralogische Zusammensetzung des Portlandzements (C₃A-, C₄AF-Gehalt, Na₂O-Äquivalent) im Vordergrund der Untersuchungen. Thermodynamische Berechnungen im System CO₂ (überkritisch, bzw. gasförmig, unterschiedliche Drücke) – Porenlösung – Phasen des Zementsteins werden weitere Kenntnisse über die Mechanismen der Carbonatisierung unter unterschiedlichen Bedingungen liefern.

Eine der möglichen zukünftigen praktischen Anwendungen ist die Behandlung von haufwerksporigen oder porositäten, zementgebundenen Fertigteilen, wie z.B. zementgebundenen Brandschutzplatten oder Wandbauplatten. Hier soll insbesondere auch die Kontaktzone zwischen einer möglichen und in industriellen Produkten bereits heute angewendeten Glasfaserbewehrung und der Zementsteinmatrix untersucht werden, um den Einfluss der Carbonatisierung auf das Verbundverhalten und die Wirksamkeit der Faserbewehrung klären zu können.

AG Betontechnologie

7.4.2 Additive Fertigung frei geformter Betonbauteile durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen

Bearbeiter: D. Weger, M.Sc., Dr.-Ing. D. Lowke

Förderer: DFG – Im Rahmen des SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“

Bionisch inspirierte, formoptimierte Konstruktionselemente können mit herkömmlichen Fertigungsverfahren oft nur mit großem Aufwand hergestellt werden. Hier bieten additive Fertigungsverfahren (3D-Drucken) mit der ihnen eigenen großen geometrischen Freiheit eine vielversprechende Alternative. Während jedoch die additiven Fertigungsverfahren heute in vielen Bereichen der Produktion zum Stand der Technik gezählt werden können, wurde ihr Einsatz im Bauwesen bislang nur in wenigen Forschungsprojekten thematisiert.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, einen neuen Weg für den Einsatz der additiven Fertigungsverfahren beim Bauen mit Beton zu zeigen. Hierbei sollen insbesondere die Grundlagen für ein Verfahren zur Herstellung von frei geformten Betonbauteilen und die dafür geeigneten Werkstoffe geschaffen werden. Bei dem Fertigungsverfahren „Selektives Binden“ handelt es sich um ein Verfahren des 3D-Druckens im engeren Sinn, bei dem dünne Schichten eines schüttbaren Materials durch lokales Einbringen eines fließfähigen Materials selektiv gebunden werden, so dass Schicht für Schicht der zuvor am Computer modellierte Festkörper entsteht. Es sollen zwei Verfahrensvarianten untersucht werden:

I) Beim „Nassdrucken“ werden zur Herstellung des Betonbauteils Schichten aus feiner Gesteinskörnung ausgebracht und durch gezieltes Einbringen eines Bindemittels selektiv gebunden.

II) Bei der „Selektiven Aktivierung“ wird ein Gemisch von Gesteinskörnung und Bindemittelpulver ausgebracht und der Hydrationsprozess durch Einbringen von Wasser aktiviert, Bild 1.

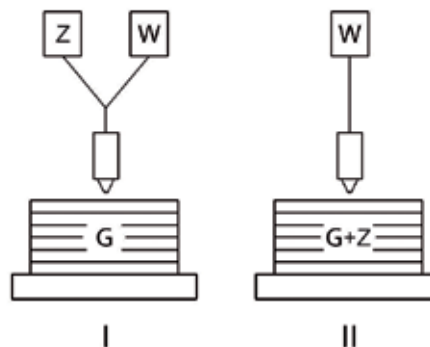


Bild 1
Verfahrensvarianten Selektives Binden: I: Nassdrucken; II: Selektive Aktivierung; (Z) Zement, (W) Wasser, (G) Gesteinskörnung (Grafik: Klaudius Henke)



Bild:
Geschnittener Probekörper aus Vorversuchen

Bei den bekannten Forschungsarbeiten zur additiven Fertigung von Bauteilen aus Beton kamen bisher nur Extrusionsverfahren zum Einsatz. Diese haben den erheblichen Nachteil, dass Überhänge nur bedingt machbar sind, was die geometrische Freiheit stark einschränkt. Bei dem einen bekannten Projekt zum Einsatz des selektiven Bindens zur Fertigung von Konstruktionselementen kommt als Bindemittel kein Portlandzement zum Einsatz. Jedoch gerade letzteres Verfahren hat aufgrund der damit erzielbaren geometrischen Freiheit großes Potential für einen Einsatz im Bauwesen.

Um zusätzlich an den enormen Erfahrungsschatz im Betonbau hinsichtlich Festigkeits-, Verformungs- und Dauerhaftigkeitseigenschaften anknüpfen zu können und die Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien sicherzustellen, werden übliche Zemente auf Calciumsilikatbasis als Bindemittel verwendet. Die prinzipielle Machbarkeit des gewählten Ansatzes wurde in Vorversuchen nachgewiesen.

In diesem Forschungsvorhaben sollen grundlegende Forschungsarbeiten durchgeführt werden, um mit dem Verfahren des „Selektiven Bindens“ frei geformte Bauteile aus Beton mit hoher Auflösung, Formtreue, Festigkeit und Dauerhaftigkeit bei großer Baugeschwindigkeit realisieren zu können.

AG Stahl und Korrosion

7.4.3 Entwicklung eines Anforderungsprofils für glasfaserbewehrte Kunststoff (GFK) Vorspannung

Bearbeiter: Dr.-Ing. Kai Osterminski, Daniel Elner, B.Sc.
Förderer: BMWi (AiF)

Das Vorhaben „Entwicklung eines Anforderungsprofils für GFK-Vorspannung“, welches am cbm bearbeitet wird, widmet sich der Quantifizierung der maßgebenden Eigenschaften von GFK-Stäben und der Entwicklung von Anforderungsprofilen für den Einsatz als interne Vorspannungsstäbe. Beim Projektpartner werden Klemmverankerungen entwickelt, die im Rahmen von Bauteiluntersuchungen untersucht und darauf basierend weiterentwickelt werden.

Initial werden die ausgewählten GFK-Bewehrungsstäbe auf ihre mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Steifigkeit) hin untersucht. Dabei soll versucht werden, die Spannungs-Dehnungsbeziehung durch uniaxiale Zugversuche zu ermitteln. Aus Erfahrungen im Rahmen von Materialprüfungs-, Zulassungs- und Überwachungstätigkeit ist bekannt, dass GFK-Bewehrungsstäbe z.T. mit einem sogenannten „Besenbruch“ versagen. Aus diesem Grund wird die Spannungs-Dehnungsbeziehung zusätzlich unter Biegebeanspruchung ermittelt, bei der die relevanten Kenngrößen unter Produktion eines anderen Versagensmodus realistischer betrachtet werden können. Mit den bekannten mechanischen Kenngrößen kann die Entwicklung der Verankerungssysteme im Teilprojekt des Projektpartners unterstützt werden.

Im ersten Teil des cbm Teilprojekts werden die Verankerungselemente gemeinsam mit dem Projektpartner in einem Regelkreis entwickelt. Dabei sind im Konkreten die Punkte Herstellung und Untersuchung verschiedener Versionen der Verankerungselemente am cbm angesiedelt. Hierfür werden vereinfachte Kurzzeitversuche durchgeführt, bei denen unter gezielter Überlastung das Verankerungsverhalten und der Versagensmodus der untersuchten Variation ermittelt werden soll. Die Ergebnisse ermöglichen die Weiterentwicklung und schließlich die Entscheidung der optimalen Verankerungselemente/-materialien für die nachfolgenden Systemversuche.

Für die Untersuchung des Spannsystems mit Verankerung, Keil und Stab werden Ermüdungsversuche und Dauerstandversuche durchgeführt. Auf diese Weise können unter anderem zeitabhängige Spannkraftverluste, die zum Einen aus eventuellen Verformungen der Verankerungskomponenten und zum Anderen aus dem Verhalten des GFK-Stabes resultieren können, erfasst und für eine spätere Bemessung mit aufgenommen werden. Des Weiteren kann die Ermüdungsfestigkeit der einzelnen Systemkomponenten überprüft werden. Dauerstandversuche geben zudem Aufschluss über eventuelle Langzeiteffekte (z.B. Kriechen und Schwinden beim Beton), die die Tragfähigkeit der einzelnen Komponenten beeinflussen.

Für den Bauteilversuch wird ein Spannbetonbalken hergestellt. Das Verfüllmaterial für das Hüllrohr muss auf die besonderen Anforderungen des Glasfaserkompositmaterials abgestimmt werden. Ziel dieser Untersuchungen ist das Charakterisieren des Verhaltens des Vorspannungssystems unter kurzzeitiger Belastung in einem praxisnahen Versuchsaufbau. Dabei werden sowohl Bauteilverhalten (wie Durchbiegung, Lastwechselzahl, Rissbild) und Verankerungsverhalten (wie Keilschlupf, Rissbildung in Verankerungselementen) beobachtet.

tet als auch die relevanten Kenngrößen, die das Vorspannungssystem charakterisieren (wie z.B. Spannkraftverluste, Umlenkung, exzentrische Lage des Spannglieds im Hüllrohr) ermittelt.

Abschließend soll das Anforderungsprofil für GFK-Vorspannstäbe entwickelt werden, indem die erreichten Ergebnisse mit dem innovativen Vorspannsystem den Anforderungen an vorgespannte Bauteile gegenübergestellt werden.

AG Zerstörungsfreie Prüfung

7.4.3 COST TU1404

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

Der Lehrstuhl ist seit November 2014 Mitglied des Projektes COST TU1404 “Towards the next generation of standards for service life of cement-based materials and structures”, welches von der Europäischen Kommission gefördert wird. Es werden Grundlagen für eine moderne und zuverlässige Qualitätssicherung von Frischbeton gelegt. Der Projektkoordinator ist Prof. Azenha, University of Minho, Portugal. Hier wird der Lehrstuhl insbesondere in der Arbeitsgruppe WG 1 –Testing of cement based materials – mitarbeiten, die von Prof. Trtnik (IGMAT Building Materials Institute, Ljubljana, Slowenien) geleitet wird und sich zunächst mit Ringversuchen befassen wird, in denen die Eignung unterschiedlicher ZfP-Verfahren (u.a. Ultraschall) für die Frischbetonanalyse getestet wird.

7.5 Ausgewählte Materialprüfung

Wissenschaftliche Materialprüfung der AG Bindemittel und Zusatzstoffe

7.5.1 Aktivierung von Steinkohlenflugaschen

Bearbeiter: Linda Irbe, M.Sc.
Förderer: Dyckerhoff GmbH

Der Einsatz aktivierter Steinkohlenflugasche (SFA) kann zu einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit von flugaschehaltigen Mischzementen führen. Als Möglichkeiten einer Aktivierung kommen eine mechanische, eine chemische und schließlich eine Kombination von mechanischer und chemischer Vorbehandlung in Frage. Bei einer mechanischen Aktivierung durch Mahlung von SFA steigt die Reaktivität mit zunehmender Feinheit. Durch eine chemische Aktivierung kann ebenfalls eine Leistungssteigerung erfolgen. Hier sind vor allem Alkalien wirkungsvoll, da das Flugascheglas durch eine erhöhte Alkalität in der Porenlösung des Zementleims schneller in Lösung geht und damit intensiver reagiert. Die Zugabe an Alkalien ist jedoch aus Dauerhaftigkeitsgründen begrenzt. Auch Mahlhilfsmittel, insbesondere Triethanolamin (TEA), wirken sich positiv auf die Reaktivität von SFA in zementären Systemen aus.

Die Kombination von mechanischer und chemischer Vorbehandlung von SFA bringt Synergieeffekte mit sich. Je nach Art der Mahlung kommt es zu Mikrorissbildungen oder weiteren Veränderungen in der Struktur der Partikel. Hierdurch haben die eingesetzten chemischen Zusätze die Möglichkeit, eine größere Oberfläche zu benetzen und teilweise in Mikroris-

se einzudringen. Das Mahlhilfsmittel wirkt dabei günstig auf die Mahlwirkung und erhöht gleichzeitig die Reaktivität der SFA.

Am cbm wurde in Kooperation mit der Fa. Dyckerhoff GmbH eine weiterführende Studie zur Optimierung der mechano-chemischen Vorbehandlung von SFA durchgeführt. Die chemische Aktivierung erfolgte durch Zugabe einer wässrigen TEA-Lösung in Kombination mit alkalihaltigen Komponenten: NaOH, Na₂SO₄, etc., zu der SFA. Die Menge an Additivzugaben orientierte sich an folgenden allgemeinen Vorgaben: Na₂O-Äq. < 1,2 M.-%, Cl-Gehalt < 0,1 M.-%, SO₃-Gehalt < 4,0 M.-%. Die Dosierung von TEA wurde mit 0,02 M.-%, bezogen auf die SFA, gewählt. Anschließend wurde die chemisch vorbehandelte Flugasche gemahlen. Hierfür wurden zwei verschiedene Arten der Mahlung untersucht: die Mahlung in einer Scheibenschwingmühle und in einer Kugelmühle. Charakteristisch für die Scheibenschwingmühle sind hohe Scherkräfte, die auf das Mahlgut tribologisch einwirken. Während eines dynamischen Triboprozesses finden neben den physikalischen auch chemische Reaktionen statt, welche die strukturellen Eigenschaften des Mahlguts beeinflussen. Sie werden als tribo-chemische Reaktionen beschrieben. Bei der Mahlung mit der Kugelmühle wird die Mahlwirkung hauptsächlich durch die Zertrümmerung der Partikel erreicht, wobei auch hier zum Teil Scherkräfte auftreten. Hervorgerufen durch den mechanischen Energieeintrag, treten auf der Oberfläche und zum Teil auch im Inneren des Mahlguts physiko-chemische Reaktionen auf. Diese Art der Einwirkung auf das Mahlgut wird allgemein als die mechano-chemische Aktivierung definiert. Um die Wirkung der Aktivierungsmaßnahmen zu bewerten, wurden Mörtel mit 50 M.-% Zementaustausch durch SFA mit und ohne Vorbehandlung, hergestellt. Mit Hilfe der isothermen Wärmeflusskalorimetrie, Lasergranulometrie sowie der Bestimmung der Druck- und Biegezugfestigkeiten sollte der Einfluss der variablen Additivzugabe auf die Eigenschaften der mechano-chemisch aktivierten Bindemittel verdeutlicht werden. Generell scheint die Zugabe der Additive einen höheren Beitrag zur insgesamt erreichten Steigerung der Frühfestigkeiten zu liefern, als die in dieser Studie realisierte Mahlaktivierung. Die höchste Reaktivität der vorbehandelten Flugaschen wurde in den ersten zwei Tagen beobachtet, mitunter bedingt durch die schneller ablaufende Silikatreaktion während der Hauptphase der Zementhydratation.

In Bezug auf die Frühfestigkeitssteigerung brachte die durchgeführte Studie folgende Ergebnisse. Die Vorbehandlung der Flugaschen schon mit Hilfe der alleinigen Mahlung hat sich als eine effektive Maßnahme zur Erhöhung der Druckfestigkeiten gezeigt. Mit dem Zusatz von TEA, sowohl vor der Mahlung im Zuge der mechanischen Aktivierung, als auch nach der bereits erfolgten Mahlung als einen chemischen Aktivator, konnte ein weiterer Anstieg der Frühfestigkeiten beobachtet werden. Folglich geht der leistungssteigernde Beitrag von TEA über seine Rolle als ein Mahlhilfsmittel hinaus. Der höchste prozentuale Zuwachs an Frühfestigkeiten bis hin zu 70 % ließ sich durch die Zugabe von den Alkali-Additiven in Kombination mit der Mahlung erzielen.

Wissenschaftliche Materialprüfung der AG Betontechnologie

7.5.2 Untersuchungen zur Entwicklung der Druckfestigkeit von Beton im sehr jungen Alter – Eignung als Gleitbeton

Bearbeiter: Francisco Durán (Civil Eng.)

Förderer: Yara International ASA

Beton muss im mittel- und nordeuropäischen Raum nicht nur den niedrigen Temperaturen während des Betoneinbaus, sondern auch den Frost-Tau-Zyklen während der Lebensdauer des Bauwerks standhalten. So ist nicht nur die Betonherstellung den Umgebungsbedingungen anzupassen, sondern auch die Betonzusammensetzung so auszulegen, dass der Beton den Umwelteinwirkungen standhält.

Bei einer Frost-Tau-Exposition wird häufig ein Luftporenbildner als Betonzusatzmittel verwendet, um das kapillare Porensystem zu unterbrechen und weiteren Platz für das Gefrieren von Wasser im Beton zu schaffen und damit einen entsprechend hohen Frost-Tausalz-Widerstand zu gewährleisten. Ein Nachteil bei der Verwendung von Luftporenbildnern ist die damit verbundene Verringerung der Betondruckfestigkeit.

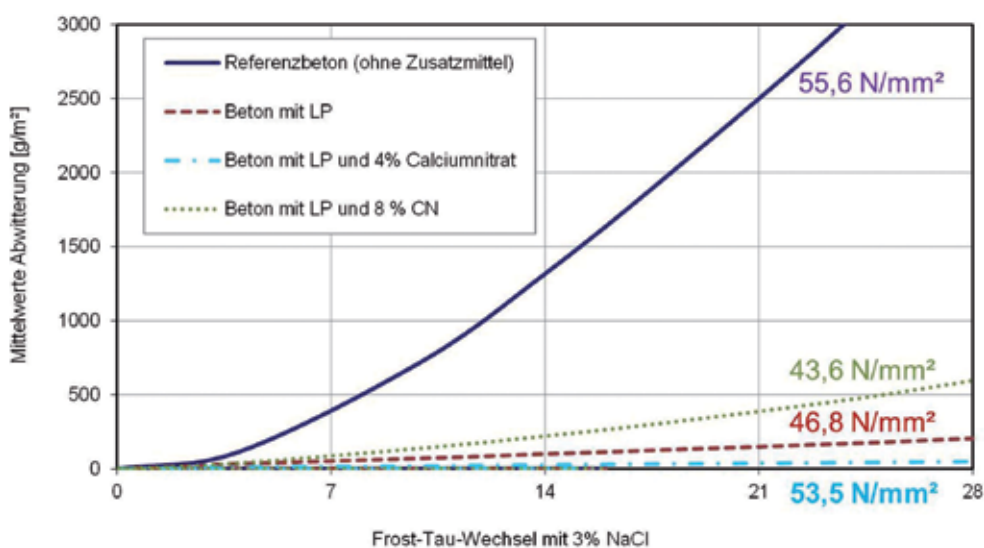


Abbildung 1:
Abwitterung der untersuchten
Betone

In Norwegen wird aufgrund häufig niedriger Temperaturen beim Betoneinbau zur Beschleunigung der Erstarrung häufig Calciumnitrat als Betonzusatzmittel verwendet. Bisher war nur unzureichend bekannt, ob bei gleichzeitiger Verwendung von Calciumnitrat und Luftporenbildnern frost-tausalz-beständige Betone hergestellt werden können und welchen Einfluss das Calciumnitrat in diesem Zusammenhang auf die Festigkeit des Betons hat. Die Firma Yara beauftragte die AG 2, den Frost-Tausalz-Widerstand von Betonen mit unterschiedlichen Calciumnitratgehalten und gleichzeitiger Verwendung eines Luftporenbildners zu untersuchen. Es konnte gezeigt werden, dass Calciumnitrat bei einer Dosierung von 4 M.-% (bezogen auf den Zementgehalt) dem Festigkeitsverlust aufgrund des Luftporenbildners ohne Verringerung der Dauerhaftigkeit entgegenwirken kann, vgl. Abb1.

AG Zerstörungsfreie Prüfung

7.5.3 Zerstörungsfreie Materialprüfung an Sportflugzeugen

Bearbeiter: Robin Groschup

Auftraggeber: Grob Aircraft (Verbundprojekt)

Im Rahmen der wissenschaftlichen Materialprüfung wurden von der AG6 gemeinsam mit der Firma Grob Aircraft AG in Tussenhausen (Landkreis Unterallgäu) ZfP-Verfahren für den Einsatz im Bereich der Materialprüfung von Faserverbundwerkstoffen erprobt. Die Arbeiten wurden finanziert über das Projekt AZIMUT (Automatisierung Zukunftsweisender Industrieller Methoden Und Technologien für CFRP-Rümpfe) der DLR. Im Rahmen des Unterauftrags wurden Verfahren wie die optisch angeregte Lock-In-Thermographie, Ultraschall-Phased-Array und Ultraschall-Impuls-Echo sowie BondMaster-Techniken erprobt und deren Tauglichkeit für die Untersuchung von Integralholmen für Sportflugzeuge bewertet.

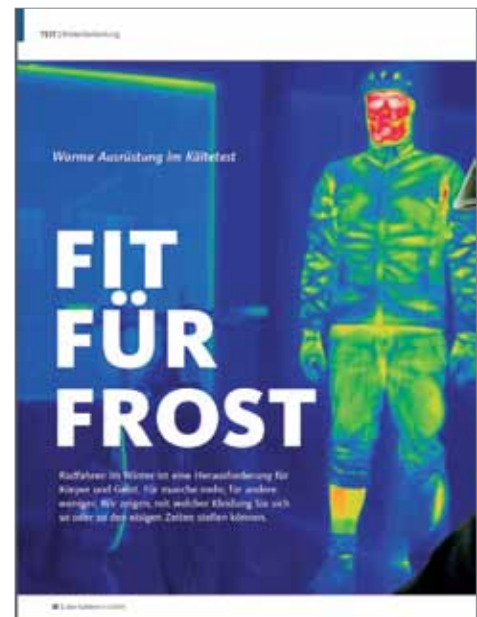
7.5.4 Wärmeflussthermographie an Radfahrerbekleidung

Bearbeiter: Sebastian Lotz

Auftraggeber: Bielefelder Verlag

Bild:
Titelbild zum Beitrag "Test
Winterbekleidung" in "aktiv
Radfahren" (11-12/2014)

Im Auftrag der Zeitschrift „aktiv Radfahren“ (Verlag BVA BikeMedia GmbH) wurden bei der Firma Globetrotter in München Messungen mit der passiven Infrarot-Thermographie an Radfahrerbekleidung durchgeführt. Bei einem Test von Wärmebekleidung für Radfahrer wurde geprüft, welche Kleidung sich für Kälte eignet. Dazu wurden komplette Winter-Sets von sechs Herstellern in eine Kältekammer unter Betriebsbedingungen (Ergometer) getestet. Temperaturen, Temperaturunterschiede und vor allem die Wärmebrücken wurden von einem AG6-Mitarbeiter mit einer Wärmebildkamera dokumentiert. Der Bericht wurde unter dem Titel „Fit für Frost“ in der Ausgabe 11/12 2014 der Zeitschrift veröffentlicht.



7.5.5 Prüfung der CFK-Türen des Airbus A350

Bearbeiter: Manuel Raith

Auftraggeber: Airbus Helicopters Deutschland

Im Rahmen eines Unterauftrages wurden mit zerstörungsfreien Prüftechniken Ermüdungsexperimente an Teilen einer neuen Tür für den Airbus A350 durchgeführt. Die Ermüdungsexperimente wurden vom Lehrstuhl für Leichtbau (LLB, Prof. Baier) und vom Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Werkstoffmechanik (Prof. Werner) durchgeführt. Ziel bei diesen anspruchsvollen Untersuchungen war die Beurteilung des Degradationsfortschritts mittels Ultraschall-Impuls-Echo-Techniken.

7.6 Faszination Forschung

Faszination Forschung ist das Wissenschaftsmagazin der Technischen Universität München. Es gewährt in halbjährlichem Turnus interessante Einblicke in die wissenschaftliche Welt unserer Universität. In der Ausgabe 14/2014 erschien folgender Artikel von Gitta Rohling. (Fotos: Werner Bachmeier)

„Wir sind die Informationslieferanten für Nachhaltigkeit.“

Christian Große entwickelt neue Technologien für zerstörungsfreie Prüfung und schaut mithilfe der verschiedensten Verfahren in Objekte hinein, um verborgene Schäden zu entdecken. Auf dieser Grundlage lassen sich die Qualität und Sicherheit von Bauwerken, von industriellen Produktionsprozessen und vielen weiteren Objekten erhöhen und die Ursachen für beobachtete Schäden ermitteln.

Zeitgleich in New York, London und Peking fand die Weltpremiere des BMW i3 statt. Das neue Fahrzeug zeichnet sich nicht nur durch seinen Elektroantrieb aus, sondern außerdem durch den Einsatz von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK). Damit setzt es den Trend weg von Metall hin zu Verbundwerkstoffen in der Automobilindustrie. Einer der Vorteile von Verbundwerkstoffen wie CFK: Im Gegensatz zu Metallbauteilen sieht man keine Brüche, Beulen oder Dellen. Dieses optische Plus hat aber auch eine Kehrseite, denn dass man keine Beschädigungen sieht, heißt nicht, dass es keine gibt. Sie können sogar die Funktionstüchtigkeit des Fahrzeugs beeinträchtigen.

Wenn es gilt, solche Schäden zu erkennen und zu messen, kommen Professor Christian Große und sein Team vom Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) ins Spiel. Sie können verborgene Fehler in Materialien, Bauteilen und Konstruktionen erkennen – wie auch in CFK-Bauteilen.

Was in der Automobilbranche für die Großserie neu ist, nämlich der Einsatz von CFK für die Karosserie, kennt die Flugzeugindustrie schon länger. Aber: CFK ist nicht gleich CFK, und Prüfverfahren lassen sich nicht ohne weiteres übertragen. In einem auf drei Jahre angelegten Projekt entwickeln Partner aus Industrie und Forschung daher Prüfverfahren zur Qualitätssicherung von Faserverbundwerkstoffen für die Automobilindustrie. „Das ist nicht trivial“, betont Große. Schließlich existieren mehrere Hundert Prüfverfahren. Viele stammen aus der Medizintechnik – wie Mikroskopie, Radiografie und Ultraschall – oder aus der Geophysik, etwa Geoelektrik, Magnetik, Seismik und Seismologie. „Bei diesem Projekt setzen wir als Referenzmessung die Computer-Tomografie (CT) ein“, sagt





Große. CFK-Bauteile, die Stößen ausgesetzt waren, werden in einen Computertomographen geschoben. Hier wird eine Vielzahl an Röntgenaufnahmen aufgenommen, aus verschiedenen Richtungen. Diese wertet ein Computer aus und macht so Beschädigungen sichtbar. Die Projektpartner vergleichen nun die Ergebnisse der verschiedenen Prüfverfahren mit denen aus der CT. „Die CT kann viel, ist aber kein Allheilmittel und vor allem sehr teuer, so-

dass sie sich nicht als standardisiertes Prüfverfahren in der Automobilindustrie eignet“, fügt Große hinzu. Schließlich ist das Ziel der Projektpartner, ökonomische ZfP-Verfahren in den Herstellungsprozess zu integrieren.

Alles ist messbar – von Kunstgegenständen über Rotorblätter bis hin zu Brücken

Die Entwicklung geeigneter Prüfverfahren für CFK ist nur eines der Themen, mit denen sich der Lehrstuhl für ZfP an der TUM beschäftigt. „Wir decken mit unseren Messungen einen sehr großen Bereich ab“, fasst Große zusammen. Schließlich ist die zerstörungsfreie Prüfung in den unterschiedlichsten Gebieten ein wichtiges Instrument, um die Qualität zu kontrollieren und zu sichern. Dazu gehört es, die Qualität von Automobilbauteilen im Herstellungsprozess zu sichern, Schäden an Rotorblättern einer Windenergieanlage zu entdecken oder die Lebensdauer von sicherheitsrelevanten Bauwerken wie Brücken, Tunnel, Hochhäusern und Fahrbahnen vorherzusagen. Von großer Bedeutung ist die zerstörungsfreie Prüfung zudem bei Objekten unseres kulturellen Erbes, beispielsweise um Aufschluss über den Schädigungsgrad von Kunstgegenständen zu geben. Auch in der Medizintechnik leisten die ZfP-Experten wichtige Unterstützung. So analysieren Große und sein Team gemeinsam mit Medizinern des Klinikums rechts der Isar, des Universitätsklinikums der TUM, wie der Oberschenkelhalsknochen bricht. Die Frage ist, ob der Bruch im Inneren des Knochens beginnt und nach außen wächst oder ob Mikrorisse in der Knochenschale – lateinisch Corticalis – für den Bruch verantwortlich sind. Wenn diese Frage einmal beantwortet ist, können Mediziner die Prophylaxe und Therapie verbessern und vielen Menschen Erleichterung verschaffen, die nach einem solchen Bruch an chronischen Schmerzen, Arthrose und Bewegungseinschränkungen leiden.



Eine Querschnittswissenschaft, die fasziniert und nachhaltig wirkt

Die Beispiele zeigen: Das Arbeitsgebiet der zerstörungsfreien Prüfung erfordert Kompetenzen in vielen Schlüsseldisziplinen wie den Materialwissenschaften, der Messtechnik und der Datenverarbeitung – und es ist höchst abwechslungsreich. So kommt es vor, dass Große morgens im Museum arbeitet, mittags eine Brücke begutachtet und nachmittags bei einem Automobilunternehmen eine Arbeitssitzung hat. Die TUM hat dieser Vielfalt Rechnung getragen und den Lehrstuhl als Joint Appointment in den Fakultäten Bauwesen und Maschinenbau angelegt.

Er selbst ist Geophysiker und hat zunächst die Erde untersucht – „zum Glück zerstörungsfrei“, schmunzelt er. Nach Promotion und Habilitation forschte er an der renommierten University of California in Berkeley zu Verfahren für die Bauwerksüberwachung. Er war stellvertretender und dann kommissarischer Direktor der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart und ist seit 2010 Inhaber des damals neu eingerichteten Lehrstuhls für Zerstörungsfreie Prüfung an der TUM. „Ich war schon immer an unterschiedlichen Forschungsgebieten interessiert“, sagt er. Deswegen faszinieren ihn Forscher früherer Jahrhunderte wie Galileo Galilei und Leonardo da Vinci. „Beide hatten nur wenige Informationen und kaum wissenschaftlichen Austausch. Erschwerend dazu kamen die religiösen und moralischen Zwänge – und dennoch haben beide wichtige Entdeckungen gemacht“, erklärt Große.

Was ihn an seinem eigenen Fachgebiet fasziniert? „Dass der Mensch selbst ein zerstörungsfreies Prüfungssystem ist.“ Große lächelt und erklärt: „Im Laufe der Evolution hat der Mensch eine gute Sensorik entwickelt, unsere Sinnesorgane sind wunderbare ZfP-Methoden.“ Ein Objekt kritisch beäugen, eine Keramik mit dem Fingerknöchel abklopfen oder eine Oberfläche mit der Fingerspitze abtasten – das sind zerstörungsfreie Prüfmethoden, die den Menschen seit Urzeiten selbstverständlich sind. Über Jahrhunderte waren solche einfachen Tests die einzige Möglichkeit, Bauteile bis zum Versagen oder eben bis zur Zerstörung zu untersuchen. Als aber im Zuge der Industrialisierung ab Mitte des 19. Jahrhunderts der Bedarf an Rohstoffen gewaltig anstieg, stand die Industrie plötzlich vor der Herausforderung, Material einzusparen und gleichzeitig die Sicherheit der Mitarbeiter zu gewährleisten. Das war der Startschuss für die intensive Entwicklung von Verfahren, ein Material zu prüfen, ohne es zu zerstören.

Heute sind ohne zerstörungsfreie Prüftechniken keine Gas- oder Ölversorgung, kein Start eines Flugzeuges, keine Herstellung eines Autos oder eines Zuges und kein Bau sicherheitsrelevanter Bauwerke wie Brücken, Tunnel, Hochhäuser und Fahrbahnen denkbar. „Als Informationslieferanten tragen wir zum nachhaltigen Schutz der Umwelt bei, die wir Menschen gestalten“, bringt es Große auf den Punkt. Denn auf der Grundlage der Messungen lassen sich Qualität und Sicherheit von Bauteilen und Bauwerken erhöhen, aber auch die Kosten-, Zeit- und Energieeffizienz von Produktionsprozessen positiv beeinflussen – wichtige Aspekte für den Industriestandort Deutschland, um sich gegen die Konkurrenz der Billiglöhländer durchzusetzen. Ein Beispiel ist die Aushärtung der Harzmatrix bei Faser-Werkstoff-Verbundmaterialien: Lässt sich dank zerstörungsfreier Prüftechnik der richtige Aushärtezeitpunkt bestimmen, kann der nächste Gussprozess schneller eingeleitet werden.

Von wegen Science Fiction: Große beweist das Gegenteil

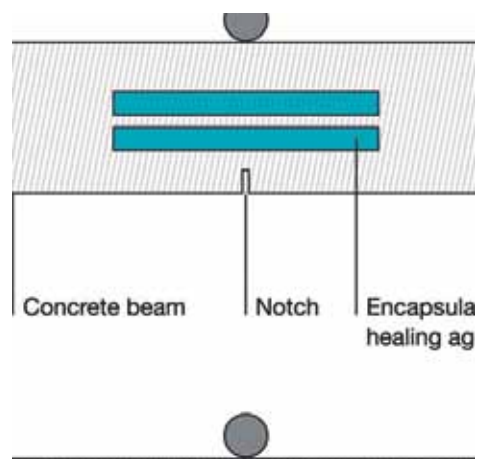
Das zeigen eindrucksvoll seine Forschungen rund um Beton – eines der wichtigsten Materialien der heutigen Zeit. Pro Jahr werden weltweit über 10 Milliarden Tonnen Beton hergestellt.



Mit dieser Menge ließen sich 100.000 zehngeschossige Bürogebäude inklusive Tiefgarage bauen – geht man davon aus, dass ein entsprechendes Gebäude aus 10.000 Tonnen Beton besteht. „Die Qualitätssicherung von Beton steckt aber noch in den Kinderschuhen“, so Große. Er und sein Team entwickeln moderne Ultraschall-techniken, um die Eigenschaften einer Betonmischung zu bestimmen. „Unser Ziel ist es, neue Bauwerke mit einer Art Geburts-

urkunde zu versehen, die alle Eigenschaften dokumentiert und die Instandhaltung später vereinfacht“, erklärt er.

Risse im Beton eines Bauwerks können dazu führen, dass Wasser und Salze eindringen. Sie setzen Korrosionsprozesse in Gang, die die darunter liegenden Stahlträger angreifen und damit die Bauwerke dauerhaft schädigen. Um die Ursache für einen Mangel zu finden, braucht man Erfahrungen – und Spürsinn. Den beweist Große bei einem weiteren wichtigen Projekt, in dem Beton erforscht wird, der sich selbst heilen kann. Große untersucht drei Selbstheilungsmechanismen, die von den Kollegen der Universitäten Gent und Delft entwickelt wurden. Einer dieser Mechanismen besteht aus Bakterien, die im Beton leben. Die meiste Zeit schlafen sie. Kommen sie mit Wasser in Kontakt, das durch Risse eindringt, „produzieren“ sie Calciumcarbonat, das dann wiederum die Risse flicken kann. Was sich wie Science Fiction anhört, scheint zu funktionieren. Der zweite Ansatz setzt auf sogenannte Hydrogele, die – wie Windeln – Feuchtigkeit aufsaugen, sich dabei ausdehnen und so die Risse stopfen. Die dritte Idee setzt auf winzige Glaskapseln, die mit Harz gefüllt sind, das freigesetzt wird, sobald Risse die Kapseln zerbrechen.



Selbstheilender Beton wäre vor allem für Bauwerke interessant, die häufig mit Salzen in Berührung kommen – beispielsweise Schutzwände an Autobahnen oder Gebäude in Meeresnähe. „Unsere Aufgabe ist es, zu beobachten, wie Risse entstehen und wie die Heilmittel freigesetzt werden – und abschließend die Effizienz der Heilung zu beurteilen“, sagt Große. Dafür haben er und sein Team verschiedene Verfahren entwickelt beziehungsweise weiter entwickelt – von der Schallemissionsanalyse für Laboruntersuchungen bis zu drahtlosen Sensorknoten für die Dauerüberwachung. In einer ersten Phase wurden die Mechanismen an kleinen Objekten getestet, nun

folgen Bauteile mit realen Abmessungen. In der dritten Phase werden Große und sein Team direkt am Bauwerk messen. Dafür müssen die Verfahren absolut robust und praxistauglich sein. Ein Beton mit Selbstheilungskräften wird teurer sein, hat aber viele Vorteile: Er kann die Lebensdauer eines Bauwerks erhöhen, Wartungsintervalle verringern – und bereits beim Bau lässt sich wegen seiner speziellen Eigenschaften Material einsparen.

Ob Beton, CFK oder bereits vorhandene Materialien: „Die Anforderungen an Sicherheit und Qualität steigen, und es sind immer wieder neue Prüfverfahren notwendig. Deswegen wird uns die Arbeit so schnell nicht ausgehen“, weiß Große.

8. Mitarbeit in Ausschüssen, Arbeitskreisen, Gremien und Fachkommissionen

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

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

Comité Européen de la Normalisation (CEN)

TC 104/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

fib (fédération internationale du béton)

Commission 8	„Structural Service Life Aspects“	Gehlen
TG 5.8	„Condition Control and assessment of reinforced concrete structures exposed to corrosive environment“	Gehlen**
TG 5.11	„Calibration of Code deemed to satisfy provisions for durability“	Gehlen**
TG 5.13	„Operational documents to support Service Life Design“	Gehlen
TG 8.7	„Code-type models for concrete behaviour“	Gehlen

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton / DAfStb

TA	„Betontechnik“	Gehlen/Heinz
	AG „Dauerhaftigkeitsbemessung“	Gehlen*
	Ad hoc Gruppe „Sulfatwiderstand“	Heinz*
	UA UHPC	Heinz/Lowke
	UA Alkali-Rili, AK3, AK1	Heinz
TA	„Bewehrung“	Osterminski
TA	„Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“	Gehlen
	(AK Rili SIB „Planung“ zur Überarbeitung der Richtlinie)	
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 062-03-13 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

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
Kommentierungs-Gruppe	„Asphaltstraßen“	Wörner*
Kommentierungs-Gruppe	„Gesteinskörnungen, ungebundene Bauweisen und Präzision“	Westiner

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

Meyer

Nationale Kontaktstelle NKS

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

DGZfP – Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung

FA	ZfP im Bauwesen, UA „Impakt-Echo“	Große
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Ultraschallprüfungen“	Große
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Feuchte“	Große
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Baugrunduntersuchungen“	Große
FA	Hochschullehrer ZfP	Große
FA	Schallemissionsprüfverfahren	Große
FA	Thermographie	Große

Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. - GFKORR

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

DGEG

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

Carbon Composites e.V.

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

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)	Gehlen
-----------------------------------	--------

Baustoffüberwachungs- und Zertifizierungsverein Bayern – BAYBÜV – e.V., LG	Neidinger*
--	------------

Bayzert	Wörner
---------	--------

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
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
MIT Massachusetts Institute of Technology; "Sustainability of Kuwait's Built Environment"	Große
Netherlands Organization for Scientific Research (NWO)	Gehlen/Heinz
Österreichische Forschungsförderungsges.mmbH, Wien, Österreich	Große/Heinz/Westiner
Studienstiftung des Deutschen Volkes, Bonn	Gehlen
Swiss National Science Foundation (SNF)	Gehlen

* = Obmann / ** = Chairman

9. Dissertationen

9.1 Laufende Dissertationen

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

Manuel Göbel, Dipl.-Ing. seit 01.10.2008	Beeinflussung der Glaslösungsmechanismen und der puzzolanischen Aktivität von Flugaschen durch organische Additive
Ying Wang, M.Sc. seit 01.07.2011	Hydratations- und Erhärtungsmechanismen der wasserbeständigen Bindemittelmischungen auf Gipsbasis
Kai Fischer, M.Sc. seit 15.05.2012	Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen in Beton unter beschleunigenden und praxisgerechten Bedingungen
Linda Irbe, M.Sc. seit 01.10.2013	Die Rolle des Aluminiums in C-A-S-H bei chemischem Angriff auf Beton

AG Betontechnologie (Betreuung Prof. C. Gehlen)

Jens Skarabis, Dipl.-Ing. seit 01.05.2006	Anwendung der Mikroindentation zur Beurteilung der Gefügeeigenschaften von Straßenbetonen
Thomas Kränkel, Dipl.-Ing. seit 15.04.2007	Nichtlinear viskoelastisches Deformationsverhalten von Verbunddübeln in Abhängigkeit der Belastungsdauer und -höhe
Charlotte Thiel, Dipl.-Ing. seit 01.04.2008	Einfluss von CO ₂ -Druck und Betonfeuchtegehalt auf das Porengefüge von Beton während der Carbonatisierung
Sandy Illguth, M.Sc. seit 01.05.2009	Faserbewehrter Feinkornbeton für filigrane Betonfertigbauteile

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

Sylvia Keßler, Dipl.-Ing. seit 01.02.2009	Zur Verwertbarkeit von Potentialfeldmessungen für die Zustandserfassung und -prognose von Stahlbetonbauteilen – Validierung und Einsatz im Lebensdauermanagement
Amir Rahimi, Dipl.-Ing. seit 01.05.2011	Semiprobabilistisches Modell zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken unter Chlorideinwirkung
Florian Hiemer, M.Sc. 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. Hydratation der Calciumsilikate
seit 01.02.2009

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

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

AG Zerstörungsfreie Prüfung (Betreuung Prof. C. Große)

Robin Groschup, Luftgekoppelte Impakt-Echo Verfahren
Dipl.-Geophys. zur zerstörungsfreien Untersuchung von Beton
seit 01.10.2011

Fabian Malm, M.Sc. Zerstörungsfreie Prüfung von Beton mit Selbstheilungsei-
seit 01.01.2013 genschaften

Manuel Raith, M.Sc. Zustandserfassung und Dauerüberwachung an
seit 01.01.2014 Windenergieanlagen zur optimierten Betriebsführung

9.2 Dissertation Fact Sheets

9.2.1 Durability of Surface Mortar of Concrete Pavement

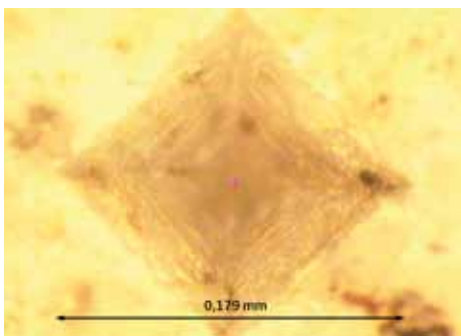


Name: Jens Skarabis
E-Mail: jens.skarabis@tum.de
Supervisor: Univ.-Prof. Christoph Gehlen
Chair of Materials Science and Testing
Started: 05/2006
Status: ongoing

The surface of concrete pavement may be textured by either removal of the surface mortar layer by brushing (exposed aggregate concrete) or drawing jute sacking (burlap) or a brush across the fresh concrete surface. Concrete pavement is textured to provide drainage of surface water and thus to improve skid resistance under wet conditions as well as to reduce noise emission. However, during service concrete pavement is subjected to the action of traffic and weather which results in the removal of the mortar between the large aggregate particles (exposed aggregate concrete) or mortar at the concrete surface (jute sacking) thus changing texture properties. This can lead to a loss of skid resistance and an increase in noise emission. The durability of the mortar in the near-surface region and thus the durability of the texture mainly depend on the composition of the concrete, i.e. binder, water/cement ratio, the type of sand etc., as well as the particular curing method chosen.

The objective of the thesis is the investigation of the effect of cement type, different additions and curing measures on the durability of the surface mortar of concrete pavement. Conclusions are to be drawn on the effect of the individual parameters on surface durability. Concrete specimens are produced with different compositions and cured using different methods. In the investigations, concrete specimens are subjected to a combined laboratory test cycle which simulates the effect of acid rain, mechanical action and freeze-thaw deicing salt attack in an accelerated manner. Changes in surface texture and loss of material by abrasion are determined and evaluated by scanning the surfaces three-dimensionally with a laser system.

The durability of concrete is based on the microstructure of the hardened binder paste. This is characterized by micro and nano indentation. At first, hardness tests are performed using different hardened binders cured using different regimes, Fig. 1.



Information is obtained on the effect of the different curing methods over depth. The investigations are extended to mortar and concrete specimens with different compositions in order to explain the different mechanisms responsible for durability.

Figure 1:
Hardness test for a hardened binder paste (applied load $F = 4 \text{ N}$)

9.2.2 Nonlinear viscoelastic deformation behaviour of bonded anchors at sustained loading conditions



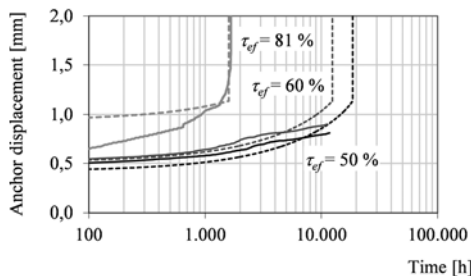
Name: Thomas Kränel
E-Mail: thomas.kraenkel@tum.de
Supervisor: Univ.-Prof. Christoph Gehlen
Chair of Materials Science and Testing
Started: 04/2007
Status: ongoing

Problem

Bonded anchors exhibit nonlinear viscoelastic material behaviour since polymer-based adhesives are used to guarantee the bond between the steel of the anchor and the surrounding concrete. When subjected to short-term load, the anchors respond stiff, under sustained load, nonlinear time-dependent deformation occurs, i.e. creep. While the short-term performance of bonded anchors has been intensively investigated, minor attention has been paid to their creep behaviour. At least since the fatal ceiling collapse in the Interstate 90 Connector Tunnel in Boston, Massachusetts it is well known that insufficient consideration of this nonlinear creep behaviour of bonded anchors can lead to unexpected failure under sustained load. Nevertheless, standards for testing the creep of bonded anchors exist for almost 20 years: there is so far no possibility to determine the real performance of bonded anchors under sustained loading conditions. The current standards use a pass/fail approach to assess the ability of bonded anchors to withstand sustained loads. This approach cannot predict the time-to-failure of bonded anchors in dependence of external (e.g. load level or temperature) and internal conditions (e.g. anchor dimensions or type of adhesive). However, knowledge of the time-to-failure is essential to estimate the real performance of bonded anchors in practice.

Aim & Approach

The focus of this work is on the development of a prediction-tool for the creep of bonded anchors. For this purpose a rheological model was invented. The model is based on the Burgers-model which is usually used for linear viscoelastic problems. To take the nonlinear behaviour of the bonded anchors into account, the Burgers-model has to be modified. In particular the input parameters for the elastic, plastic and viscous components of the model are to be extended by nonlinear constitutive equations with respect to the level and duration of the applied load. So the model enables the prediction of the stress-induced disproportionate increase of creep-displacement of the bonded anchors. The values of the product-specific input parameters for the rheological components can be experimentally determined by a series of tests on the bonded anchors itself. The further aim of the work is to enable the prediction of creep until failure as well as the time-to-failure. Therefore the model takes material degradation processes into account. A special degradation test was developed, consisting of a multi-repeated tension load-regime, to determine an input parameter for the model, which comprises the degradation induced loss of stiffness of the bonded anchors in dependence of the anchor displacement. Thus the model provides an opportunity to determine the creep failure as well as the time-to-failure of the bonded anchors as a measure of their real performance. It is therefore suitable for service-life prediction. Thus bonded anchors can be selected with regard to particular service-life requirements for a specified application in practice. Moreover, in conjunction with a monitoring system, which records the displacement of bonded anchors in an existing construction,



such a model could be used to predict the remaining time-to-failure in dependence of the current displacement.

Results

Figure 1 compare a variety of measured creep curves of a characteristic bonded anchor type with the related model predictions. Bond stresses t are give as effective percentages t_{ef} with regard to the average

short-term strength of the bonded anchor determined in tension tests. It is evident that the model reasonably predicts the nonlinear creep behaviour of the bonded anchor type. For bond stresses, relevant for practical application (Fig. 1, $t_{ef} = 50\%$), the difference between the measured and calculated creep curve is within the scatter of the measurement and is therefore insignificant. The measured and predicted creep curves at an effective bond stress of $t_{ef} = 60\%$ show that the model provides a conservative estimation, because up to the present time of measuring, failure has not occurred although this is predicted by the model. In addition the model provides an accurate prediction of the creep failure of the bonded anchor at high stress. The measured and predicted time-to-failure for effective bond stresses of $t_{ef} = 81\%$ are within the experimental repeatability.

Figure 1:
Measured and predicted creep curves of characteristic bonded anchors for an effective bond stress of 50 %, 60 %, 81 % and 83 % (with respect to the short-term strength); measured values are shown by the solid line (—), values predicted with the modified Burgers model are shown by the dashed line (---).

9.2.3 Effect of CO₂ partial pressure and moisture content on carbonation and the evolution of the pore structure of concrete



Name:	Charlotte Thiel
E-Mail:	charlotte.thiel@tum.de
Supervisor:	Univ.-Prof. Christoph Gehlen Chair of Materials Science and Testing
Started:	04/2008
Status:	ongoing

Introduction

To ensure the durability of reinforced concrete structures (rcs) probabilistic models are increasingly used. These models enable the service life prediction of rcs. However, the quality of the forecast depends significantly on the quality of the input values. In the case of carbonation induced corrosion, the carbonation resistance of concrete is the main influencing parameter. In order to determine this resistance, so-called accelerated tests are carried out with high (unrealistic) CO₂ concentrations. It remains unclear whether these high concentrations reflect the natural processes and forecast errors can be excluded. To develop future procedures with higher reliability, it is therefore necessary to deepen the knowledge about the mechanisms of carbonation.

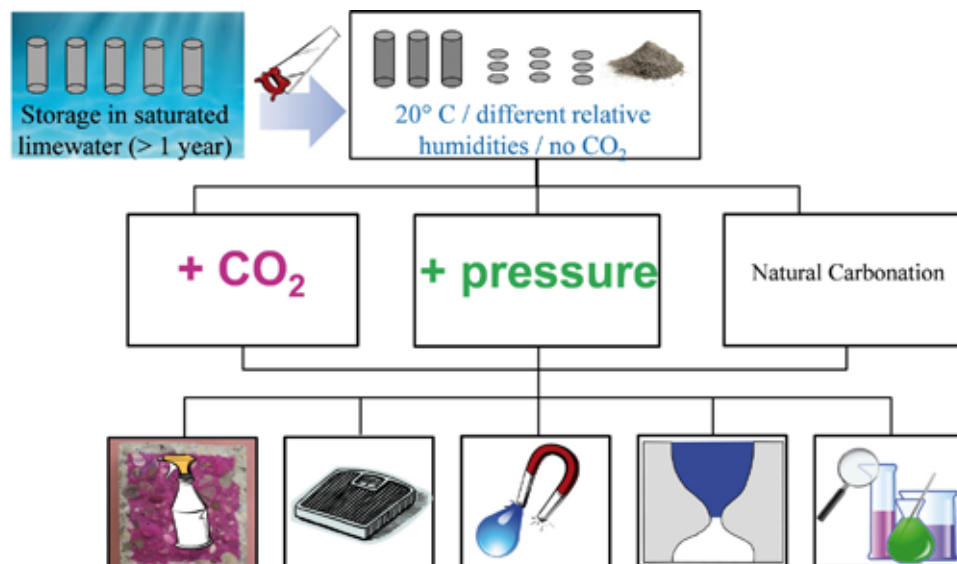
Research Objectives

This thesis focuses on the influence of CO₂ partial pressure at total pressures above 1 bar on physical and chemical changes in mortar and concrete specimens. Here, the moisture content, the phase formation, the pore structure and gas transport are of central importance.

Experimental Setup

Mortar specimens are preconditioned at different relative humidities and exposed to diffe-

Figure 1:
Experimental Setup



rent CO_2 concentrations at atmospheric and pressures up to 11 bar. Whereas diffusion is the main transport mechanism for CO_2 at atmospheric pressure, permeation dominates at increased pressures. The advantage is that permeation is significantly faster than diffusion. The depth resolved water content as well as the change in chemical phases and the evolution of carbonation are determined at different time intervals. In addition, changes in the pore structure are quantified. The results are compared to thermodynamic calculation.

Expected outcomes and contributions

The results will deepen the knowledge on the carbonation mechanisms. Based on this knowledge, recommendations for an accelerated test method that enables a fair differentiation of different cementitious materials in terms carbonation will be derived.

References

- [1] Thiel, C.; Beddoe, R.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Accelerated carbonation: Changes in Water Transport, Porosity and Phases of Mortar due to different CO_2 Pressures. Proceedings of The 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 2014, pp. 217-222.

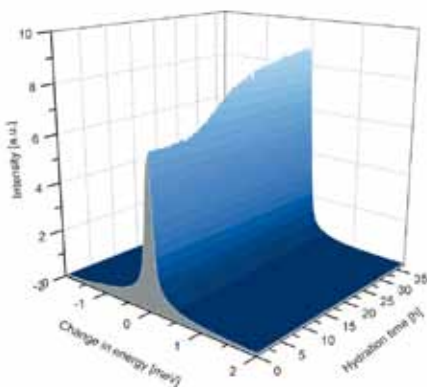
9.2.4 Development of C-S-H microstructure in Ultra High Performance Concrete with QENS, ^{29}Si -NMR and XRD



Name: Tobias Gutberlet
 E-Mail: tobias.gutberlet@tum.de
 Supervisor: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz
 Chair of Mineral Engineering
 Started: 02/2009
 Status: ongoing

Ultra High Performance Concrete (UHPC) is an innovative building material whose high strength is advantageous for future applications in highly filigree structural members and even as a replacement for steel building components.

The mechanical and chemical properties of UHPC are determined by the formation of the strength-giving amorphous calcium silicate hydrates (C-S-H) from the clinker phases, silica fume and water. For the optimization of UHPC performance, a scientific working knowledge of microstructure formation depending on temperature and composition is necessary. At present, the development of C-S-H microstructure and the bonding of water are not well understood. Therefore the quasi-elastic neutron scattering (QENS) instrument at the Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) in Garching is used to study the kinetics of water-bonding in the C_3S SiO_2 H_2O system with different compositions. Due to the very good energy resolution of the device, differentiation of structural water (chemically bound), interlayer/gel pore water (physically bound) and free water is possible. The change of signal form with increasing hydration time (see Fig. 1) indicates altering proportions of the different forms of water.



Parallel investigations are being performed with ^{29}Si -NMR (Nuclear Magnetic Resonance) spectroscopy and with XRD (X-Ray Diffraction). NMR results are needed to observe the structure development (polymerisation) of the silicates like mean chain length and degree of polymerisation. XRD is used to examine and quantify the formation of phases which form during the hydration process, like portlandite ($Ca(OH)_2$) and which are depleted, like C_3S .

Figure 1:
Quasi-elastic neutron scattering spectra for a $Ca_3SiO_5-H_2O$ system at 20°C in the first 36 hours of hydration.

The results of the two latter methods help to interpret the QENS results correctly and therefore understand the microstructure development and water bonding of C-S-H. This provides a basis for future investigations on the optimization of concrete composition and understanding the performance, durability and sustainability of concrete structural components.

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



Name:	Thomas Patzak
E-Mail:	thomas.patzak@tum.de
Supervisor:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen Chair of Materials Science and Testing
Started:	03/2012
Status:	ongoing

Every road user expects - implicitly - a road surface with good grip which ensures a sufficiently short stopping distance in wet conditions. The skid resistance indicates the effect of the texture (roughness) and material characteristics of the road surface on the tyre-road adhesion under determined conditions.

For the first time the Federal Minister of Transport specified requirements for the skid resistance of road surfaces in the Additional Technical Terms of Contract and Guidelines for

the Construction of Asphalt / Concrete Road Surfaces [1], which refer to the time of acceptance and the entire duration of the warranty period. The review of these requirements in the course of check tests is normally done by means of in situ measurements. However, this measuring method does currently not allow for any statements on the skid resistance development of different road surface materials prior to a construction project.

Several research projects confirmed that the Wehner/Schulze test method is suited for the skid resistance prognosis. Thus a laboratory test method is available for the construction industry and asphalt industry, which serves to forecast the skid resistance properties of the asphalt destined for use in construction projects in laboratory scale. Recently a work instruction [2] was prepared for the test method, which was integrated into the European standardisation process.

The Wehner/Schulze test method serves to gain insight into the skid resistance development of an asphalt surface until the end of its service life. In doing so, asphalt samples (drilled cores, test slabs) can directly be examined. Research work shows that the type of sample pretreatment has significant influence on the skid resistance development and the final skid resistance value. It must be clarified whether the surface characteristics and texture of the samples produced in the laboratory from identical asphalt are identical with those of the drilled cores from the roads not exposed to traffic and whether they produce the same final skid resistance values.

Figure 1:
skid resistance measurement –
Wehner/Schulze

In addition it must be examined how the asphalt samples produced in the laboratory are to be stressed (freeze-thaw changes, mechanical stress, outdoor storage tests) in order to get a surface characteristic similar to that of the road exposed to traffic after 2 to 3 years.



It is the aim of the research work to develop a practice-oriented sample pretreatment of the asphalt samples produced in the laboratory for the existing Wehner/Schulze test method, simulating the actual exposure of the road to the environment.

References

- [1] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, Ausgabe 2007, Fassung 2013 (ZTV Asphalt-StB 07/13)
- [2] EN 12697-49: Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 49: Determination of friction after polishing.

9.3 Beendete Dissertationen

9.3.1 Charakterisierung von Schädigungen in Gesteinen bei Impaktprozessen mit zerstörungsfreier Prüfung

Name: Dorothee Moser
E-Mail: dorothee.moser@tum.de
Beginn: 2010
Ende: 2014
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen (TU München)
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Christian Große (TU München)
Prof. Dr. rer. nat. Kurosch Thuro (TU München)
Prof. Dr. rer. nat. Franz Pfeiffer (TU München)

Zusammenfassung

Zerstörungsfreie Prüftechniken sind in vielen Bereichen ein wichtiges Hilfsmittel zur Analyse des Schädigungsgrades verschiedenster Materialien. Bei Impaktversuchen (schematischer Aufbau s. Abbildung 1) im Projekt MEMIN, die einen Meteoriteneinschlag nachstellen sollen, werden ebenfalls sichtbare, aber auch von außen nicht erkennbare Schädigungen im Gestein erzeugt. Verschiedene zerstörungsfreie Prüfmethoden wurden für die Erfassung und Beschreibung einer Schädigung in diesen Naturgesteinen angewendet. Um einen Vergleich zu Meteoriteneinschlägen auf der Erde herstellen zu können, wurden Naturgesteine als Zielgestein verwendet und verschiedene Materialien für das Projektil, unter anderem Meteoritengestein.

Die zerstörungsfreien Prüfverfahren sollen einen Einblick in die Schädigungszone unterhalb des entstandenen Kraters geben. Dazu wurden Messungen vor, während und nach dem Impaktexperiment durchgeführt. Während der Impaktversuche wurde die Schallemissionsanalyse (SEA) verwendet, um direkte Informationen über den Impakt und die daraus resultierende Rissausbreitung zu erhalten. Der Impaktort kann mit den hier verwendeten Programmen auf einige Millimeter genau rekonstruiert werden. Als Referenzort dient der Mittelpunkt des Kraters, der bei einem senkrechten Impakt direkt unterhalb des Impaktortes liegen sollte. Weiterhin werden die Laufzeitunterschiede der Kompressionswelle verwendet, um eine Information der Wellenausbreitung zu erhalten. Zum einen kann gezeigt werden, dass sich die Welle nahezu linear im Probekörper ausbreitet. Zum anderen können die Laufzeitunterschiede zur Bestimmung der Kompressionswellengeschwindigkeit verwendet werden. Die Ausbreitung der Welle ist auch für die numerischen Berechnungen im MEMIN-Projekt von Interesse.

Basierend auf der Ultraschallprüfung wurde die Ultraschall-Tomographie (UST) bei den vorhandenen Probekörpern angewendet. Durch das spezielle Verhalten der Ultraschallwelle bezüglich sehr kleiner Risse kann die Schädigungszone unterhalb der Impaktkrater in einer ausreichenden Auflösung dargestellt werden. Die Messergebnisse zeigen eine deutliche

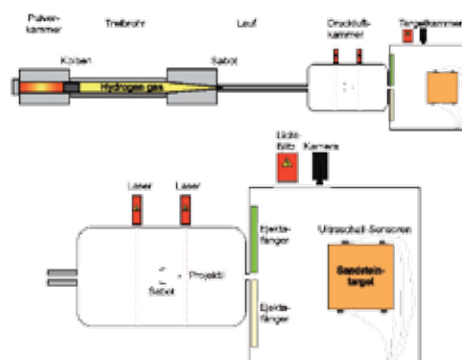
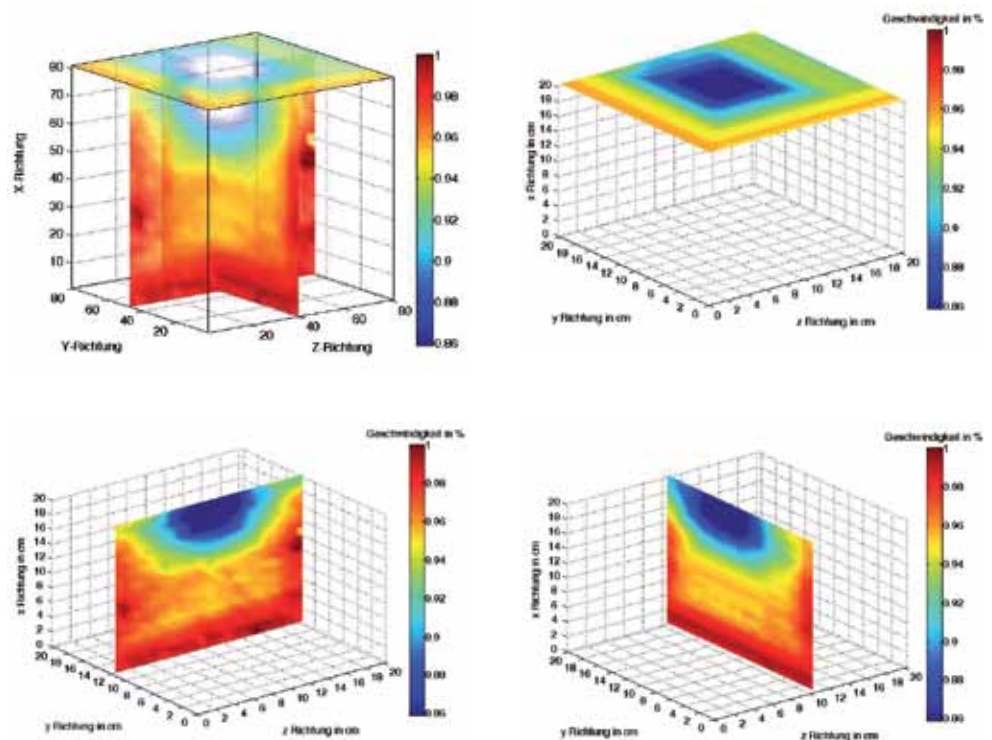


Abbildung 1:
Oben: Vereinfachter schematischer Überblick einer zweistufigen Leichtgaskanone. Unten: Experimenteller Aufbau der MEMIN Experimente in der Zerkammer. Jeweils von oben betrachtet und nicht skaliert (modifiziert nach Poelchau et al. [2013a]).

Geschwindigkeitsreduzierung im Bereich unterhalb der Kraterstruktur, sodass für jeden Probekörper eine entsprechende Schädigungszone definiert werden kann. Zum Beispiel kann die Schädigungszone beim Sandstein (für einen Impact mit 2,5 mm Stahlprojektil bei einer Geschwindigkeit von ~5000 m/s und einer Kantenlänge von 20 cm) in eine Tiefe von etwa 6 cm definiert werden (Abbildung 2).

Abbildung 2:
Sandstein A3 mit Impaktkrater.
Oben: 3D Ansicht mit Interpolationsschritten beschriftet (links), y-z-Ebene (rechts).
Unten: x-z-Ebene (links), x-y-Ebene (rechts). Alle Ebenen treffen sich im Kratermittelpunkt.



Mit den Daten der UST kann die Laufzeitgeschwindigkeit der Welle vom Impaktort zu den Sensoren, die bei der SEA verwendet werden, berechnet werden. Für jeden Sensorabstand kann damit das Ergebnis der SEA mit dem Ergebnis der UST verglichen werden. Beide Messungen zeigen trotz vorhandener Schichtung im Sandstein eine lineare Ausbreitung der Welle im Probekörper.

Ein weiteres Verfahren war die Modal- bzw. Schwingungsanalyse (SA) zur Ermittlung elastischer Parameter der Probekörper. Durch die Schädigung der Probekörper werden auch die elastischen Parameter des Probekörpers verändert. Diese Änderung spiegelt sich in den Frequenzen der Eigenschwingungsmoden des Probekörpers wieder. Mit der SA kann gezeigt werden, dass sich die elastischen Parameter durch Schädigungen im Probekörper verändern. Jedoch hat sich auch gezeigt, dass für die Anwendung dieser Prüfmethode die hier verwendete Geometrie der Impaktprobekörper ungeeignet ist. Die gemessenen Frequenzspitzen sind sehr klein und breit, weshalb die Frequenz nicht eindeutig zu identifizieren ist. Daneben zeigen die Daten einen hohen Rauschanteil. Messungen an einem Prisma haben Frequenzwerte mit einer klaren Spitze und hohen Energiewerten ergeben. Hinzu kommt, dass nur eine Aussage über den Durchschnitt der elastischen Parameter für den gesamten Probekörper ermittelt werden kann. Zusätzlich wurden Messungen an

verschiedenen Messsystemen mit Computer-Tomographie (CT) durchgeführt. Radiographische Messungen können bei den verwendeten Probekörpern eine Auflösung von knapp 60 µm erzeugen. Damit sind Risse in unmittelbarer Nähe des Kraters zu erkennen. Ein direkter Vergleich zu den Ergebnissen mit der UST kann nicht erstellt werden. Während die CT einzelne größere Risse zeigt, erfasst die UST eine Schädigungszone. Die durchgeführten Arbeiten ergaben, dass nicht alle ausgewählten Methoden gleichermaßen für die Auswertung der Schädigung unterhalb von Impaktkratern geeignet sind. Speziell für die hier durchgeführten Experimente ist die Schallemissionsanalyse zwar gut anwendbar, jedoch müssen die Daten noch weitreichender ausgewertet und diskutiert werden. Die Modalanalyse ist nur bedingt zielführend und muss durch weitere Messungen ergänzt werden. Die hohen Energien des Impaktes und die Geometrie der Probekörper führten zu unerwarteten Problemen bei den Prüfmethoden. Beide Methoden (Schallemissionsanalyse und Modalanalyse) sollten jedoch für andere Auswertungsmöglichkeiten in der fortlaufenden Studie beibehalten werden. Die Ultraschall-Tomographie hingegen zeigt bei den durch die Impakte erzeugten sehr feinen Rissstrukturen ein gutes Ergebnis und sollte daher auch für weitere Versuche angewendet werden. Auch die CT-Untersuchungen können an kleineren Proben ergänzend durchgeführt werden.



v.l. n.r.: F. Pfeiffer, C. Große,
D. Moser, K. Thuro, C. Gehlen
(Foto: C. Lietdke)

9.3.2 Experimental and Numerical Study on Reinforcement Corrosion in Cracked Concrete

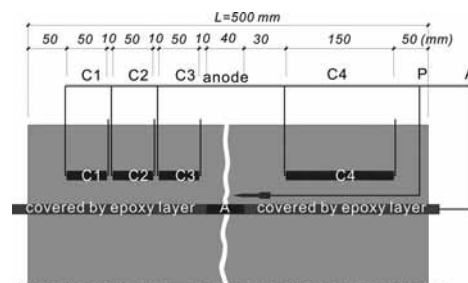


Name: Wei Tian
 E-Mail: tianwei13@gmail.com
 Beginn: 2008
 Ende: 2014
 Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz (TU München)
 Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl (i.R.)
 Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen (TU München)
 Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach (RWTH Aachen)

Concrete is the most commonly used building material, however, is not always crack free. When cracks occur, a preferable path for corrosion promoting substances (CO_2 , Cl^- ions, etc.) is created and corrosion might take place. For uncracked concrete the corrosion mechanism is clear and corrosion model is relatively mature. However, research on reinforcement corrosion in cracked concrete is rare. The motivation of this research is to reach a better understanding of the physical mechanisms underlying the deterioration process of reinforcement in cracked concrete subjected to cyclic chloride and to propose a reliable method for estimating these processes.

Laboratory tests were carried out on central cracked concrete beams, in which corrosion systems with single anode and multiple cathodes with different cover depth were arranged, Figure 1. The beams are subjected to both chloride/water wetting-drying cycle and natural exposures.

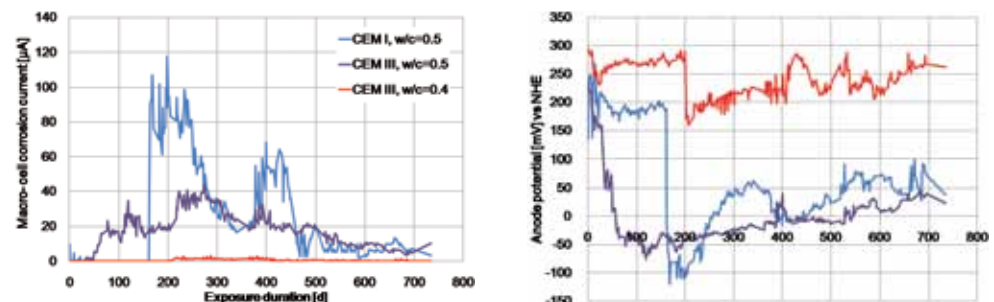
Figure 1
 Profile of corrosion system (anode with 4 cm length in the center cracked area, and cathodes C1-C3 with 5 cm length, C4 with 15 cm length)



Results indicate that the corrosion mechanism in cracked concrete is macro-cell corrosion which is mainly under concrete resistance control. The time development of corrosion rate is characterized as a three-phase process: the ascending phase, the descending phase and the equilibrium phase, Figure 2. The equilibrium corrosion state enables the prediction of the residual service life. An unconventional effect was observed in the laboratory tests: Corrosion intensity increased with

concrete cover depth. In order to confirm and explore this effect, numerical modelling on both the process of chloride/moisture penetration into cracked concrete and the simulation of corrosion state in propagation period was conducted.

Figure 2
 Corrosion current (left) and potential (right) of specimens in chloride cycle.



The mechanisms of chloride transportation into non-saturated cracked concrete is considered as diffusion coupled with convection with flowing moisture, associated with chloride binding which is described by Freundlich and Langmuir binding isotherms. Basic equations were built based on a modified Fick's second law and solved by Alternating Direction Implicit (ADI) finite difference method, which required boundary and initial conditions. To figure out the moisture evaporation rate in the crack, laboratory tests were carried out and a self-logarithmic relationship between evaporation rate and exposure duration was found. Main parameters for the numerical simulation (diffusion coefficients of chloride and relative humidity, chloride binding capacity and moisture capacity) were estimated by means of a factorial approach. The chloride/moisture penetration process was successfully simulated by the proposed model, Figure 3. The unconventional effect of the concrete cover that was observed in the experimental study was well explained.

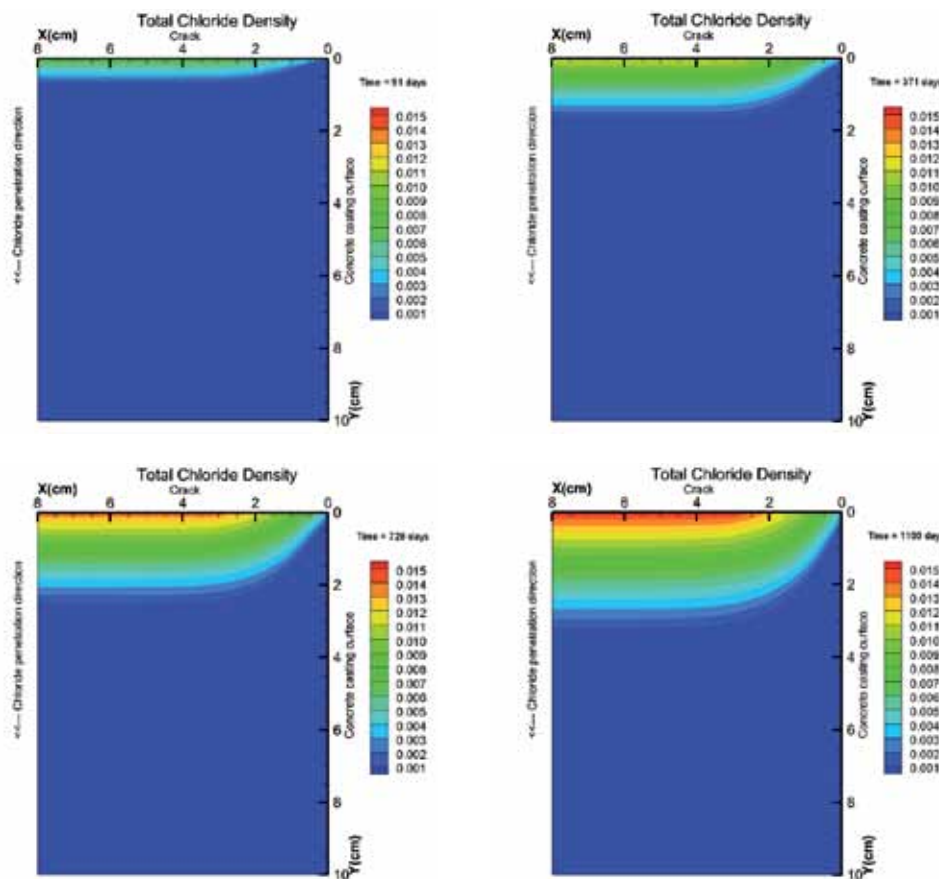


Figure 3
Contour plots of total chloride density C_t in concrete, CEM I, w/b 0.5, cement content 360 kg/m³, [g of Cl⁻/g of cement]

The numerical simulation of the corrosion state after depassivation was carried out with a self-developed FEM program 'MCRC' (Macro-cell Corrosion of Reinforcement in Concrete). Measured polarization curves were used as boundary conditions for the numerical modelling; a three-dimensional-location-dependent resistivity field was built to describe the electrolytic properties of the cracked beam. Corrosion potential and current density of both concrete and steel were obtained, Figure 4 and Figure 5. Corrosion in cracked concrete was confirmed as under concrete resistance control.

Figure 4
Contour plot of corrosion potentials, CEM I w/b 0.5 cement content 360, cover depth=5 cm, 3 years exposure duration.

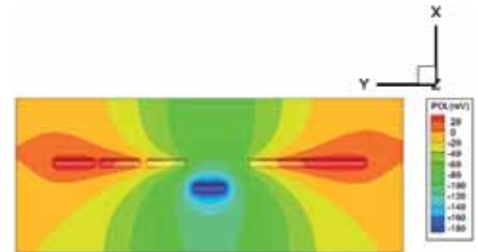
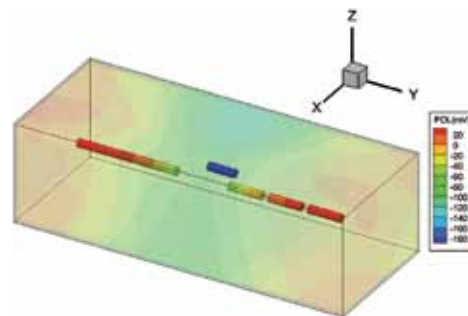
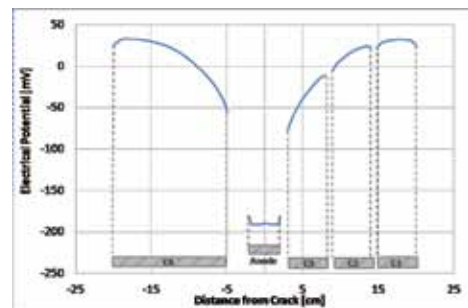


Figure 5
Calculated potential on electrodes, CEM I w/b 0.5 cement content 360, cover depth= 5 cm, 3 years exposure duration.



The accordance between the numerical and experimental results proved the validity of experiment results, meanwhile confirmed the efficiency of the numerical tools. Based on the chloride/moisture penetration model and the corrosion state model, both the initiation period and propagation period could be estimated.

Prof. Christoph Gehlen

Gehlen, C.:

Materialschädigungsmodelle und ihr Einfluss auf deskriptive Regeln aktueller und zukünftiger Normen.

2. Grazer Betonkolloquium, 2014, Nachhaltig Bauen mit Beton: Werkstoff und Konstruktion

Gehlen, C.; Duran, F.; Lowke, D.:

Lärmarmes Betonsteinpflaster mit offenporigem Betongefüge.

58. Betontage, Ulm, 18.-20.02.2014, BFT International, bauverlag, S. 40-41

Gehlen, C.; Kapteina, G.; Schießl-Pecka, A.; Mayer, T.:

Life cycle management demonstrated on the example of a parking garage.

Concrete in Australia Volume 40 (Issue 4), 2014, p. 42 - 49

Gehlen, C.; Kränkel, T.; Lowke, D.; Mazanec, O.:

Praxisorientierte Optimierung der rheologischen Eigenschaften von UHPC.

Panta Rhei – Rheologie des Frischbetons, 2014, 12. Münchener Baustoffseminar, 27.03.14, München

Breitenbücher, R.; Sievering, Chr.; Schießl, P.; Gehlen, C.; Mazanec, O.; Stark, J.; Ludwig, H.-M., Seyfarth, K.:

Rissbildung an Fahrbahndecken aus Beton – Auswirkungen von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR), Phase II.

Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Fachverlag NW im Carl Schünemann Verlag (Bremen) , 2014

Durán, F.; Lowke, D.; Männel, M.; Calis, C.; Gehlen, C.:

Optimal Pore Distribution of Porous Concrete Pavers Aggregate.

12th International Symposium On Concrete Roads, EU-PAVE, Sep. 23-26, 2014, Prague, Czech Republic

Franke, W.; Thiel, C.; Durán, F.; Gehlen, C.:

Effect of Calcium Nitrate on the Freeze-Thaw-Resistance of Concrete.

2nd International Congress on Durability of Concrete, Dec. 04-06, New Delhi, India

Glotzbach, Ch.; Lowke, D.; Kränkel, T.; Mazanec, O.;

Schmidt, M.; Gehlen, C.:

Anwendungsorientierte Optimierung und Klassifizierung der rheologischen Eigenschaften von UHPC - Optimiza-

tion and Classification of Rheological Properties of UHPC for its Application.

In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Fröhlich, S.; Thiemicke, J. (Hrsg.): Nachhaltiges Bauen mit Ultrahochfestem Beton - Sustainable Building with Ultra-High Performance Concrete. kassel university press GmbH, 2014, Heft 22, S. 355-362

Graubner, C.-A.; Bleyer, T.; Brunk, M.F.; Dreßen, T.; Fensterer, C.; Gehlen, C.; Haas, A.; Hanenberg, N.; Hauer, B.; Hegger, J.; Heusler, I. Keßler, S.; Mielecke, T.; Piehl, C.; Reinhardt, H.-W.; Roth, C.; Schießl, P.; Schneider, H.N.; Schwarte, J.; Sinnesbichler, H.; Wiens, U.; Zilch, K.:

Der Stadtbaustein im DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhaben "Nachhaltig Bauen mit Beton" – Dossier zu Nachhaltigkeitsuntersuchungen - Teilprojekt A. , Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb mit Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Heft 588, 2014

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

Zum Formfüllungsvermögen dünnwandiger Schalungen – Experiment und Simulation.

Panta Rhei – Rheologie des Frischbetons, 12. Münchener Baustoffseminar, 27.03.2014, München

Kessler, S.; Fischer, J.; Straub, D.; Gehlen, C.:

Updating of service-life prediction of reinforced concrete structures with potential mapping. Cement & Concrete Composites (47), 2014, pp 47-52

Kessler, S.; Gehlen, C.:

Estimation of the main factors influencing potential mapping. Concrete Solutions 2014, 5th International Conference on Concrete Repair, 01.-03.09.2014, Queen's University, Belfast, UK

Keßler, S.; Kanzler, D.; Gehlen, C.:

Evaluation of a potential mapping using POD. 12th International Probabilistic Workshop, 2014, pp 119-126

Kränkel, T.; Lowke, D.; Gehlen, C.:

Verdichtbarkeit und Stabilität Leichtverarbeitbarer Betone. Panta Rhei – Rheologie des Frischbetons, 2014/12. Münchener Baustoffseminar, S. 19-25

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

Efficiency of materials used for repair measures of concrete structures exposed to chlorides. 5th International

Conference on Concrete Repair – Concrete Solutions 2014, Queen's University, Belfast, Proc. pp. 439-448

Rahimi, A.; Gehlen, C.; Reschke, T.; Westendarp, A.:
Approaches for Modelling the Residual Service Life of Marine Concrete Structures. International Journal of Corrosion, 1. Qu., 2014

Thiel, C.; Beddoe, R.; Lowke, D.; Gehlen, C.:
Accelerated carbonation: changes in water transport, porosity and phases of mortar due to different CO₂ pressures. Proceedings of The 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 2014, pp. 217-222

Thiel, C.; Stengel, T.; Gehlen, C.:
Life cycle assessment (LCA) of road pavement materials. In: Pacheco-Torgal, F.; Cabeza, L. F.; Labrincha, J.; Giuntini, A. (Hrsg.): Eco-efficient construction and building materials: Life cycle assessment (LCA), eco-labelling and case studies. Woodhead Publishing Limited, 2014, S. 368 – 403

v. Greve-Dierfeld, S.; Gehlen, C.:
Performance based deemed-to-satisfy rules. The Fourth International fib-Congress 2014, Mumbai, Feb. 10-13, 2014

v. Greve-Dierfeld, S.; Gehlen, C.:
Benchmark for deemed-to-satisfy rules. The Fourth International fib-Congress 2014, Mumbai, Feb. 10-13, 2014

Zintel, M.; Angst, U.; Keßler, S.; Gehlen, C.:
Epoxidharzbeschichtete Bewehrung – Neue Erkenntnisse nach zwei Jahrzehnten Praxiserfahrung. Beton und Stahlbetonbau 109: 3-14

Prof. Christian Große

Grosse, C.:
Was ist eigentlich Zerstörungsfreie Prüfung? Forschung & Lehre (2), 2014, S. 124-125

Grosse, C.:
Wired and wireless structural health monitoring of bridges. 10th Japanese German Bridge Symposium, September 16 - 19, 2014, TUM

Große, C.:
Bauwerksdiagnose mit zerstörungsfreien Prüfverfahren:

Was wurde erreicht? - Woran fehlt es?
DGfZfP, Fachtagung Bauwerksdiagnose 2014, 13.-14.02.2014, Berlin

Große, C.:
Zerstörungsfreie Prüfmethode zur Beobachtung rheologischer Prozesse bei Frischbeton. Panta Rhei – Rheologie des Frischbetons, 12. Münchener Baustoffseminar, 27.03.2014, München

Große, C.; Malm, F.:
Betone mit Selbstheilungseigenschaften - Entwicklung und Prüfung. 58. Betontage, Ulm, 18.-20.02.2014, BFT International, bauerlag, S. 20-24

Groschup, R.; Große, C.U.:
Neue Ansätze zur Anwendung der Impakt-Echo-Methode. DGZfP-Jahrestagung, 26.-28.05.2014, Potsdam

Malm, F.; Grosse, C.:
Examination of Reinforced Concrete Beams with Self-Healing Properties by Acoustic Emission Analysis. 31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE), Sep 3-5, 2014, Dresden

Stark, F.; Grager, J.-C.; Grosse, C. U.:
Kombinierte Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von monolithischen CFK-Klebeverbindungen. DGZfP-Jahrestagung, 26.-28.05.2014, Potsdam

Wünnemann, K.; Grosse, C.; Güldemeister, N.; Moser, D.:
Numerical modeling and acoustic testing techniques at impact craters on a laboratory scale – what can we learn to better understand meteorite craters? 74. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 25.03.2014, Karlsruhe

Prof. Detlef Heinz

Heinz, D.:

Zemente und Zusatzstoffe – aktuelle Entwicklungen.
Panta Rhei - Rheologie des Frischbetons, cbm - Centrum Baustoffe und Materialprüfung, 12. Münchener Baustoffseminar, 27.03.2014

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

Eigenschaften ultra-hochfester Betone mit zementklinkerarmen Bindemittelsystemen - Properties of Ultra-High Performance Concrete with Low Cement Clinker Binder Systems.

In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Fröhlich, S.; Thiemicke, J. (Hrsg.): Nachhaltiges Bauen mit Ultrahochfestem Beton - Sustainable Building with Ultra-High Performance Concrete. kassel university press GmbH, 2014, S. 61-92

Dressler, A.; Urbonas, L.; Beddoe, R.E.; Gendvilas, R.; Heinz, D.:

Einfluss von NaCl auf pH-Wert der Porenlösung und Mineralphasen des Zementsteins bei verschiedenen Temperaturen.

GDCh-Tagung Bauchemie, 2014, Proc. S. 195 - 198

Dressler, A.; Urbonas, L.; Heinz, D.:

Avoiding damaging alkali silica reaction with fly ash – long term storage investigations. EuroCoalAsh 2014, Proc. S. 281 - 292

Dressler, A.; Urbonas, L.; Heinz, D.:

Influence of pozzolanic additives in concrete on the alkali-silica reaction with external alkali input (in russisch).

Cement and its Applications (russisch) 01/2014 (1), S. 118-122

Fischer, K.; Urbonas, L.; Heinz, D.:

AKR-Performance-Prüfung flugaschehaltiger Betone: Einfluss der Vorlagerung auf Porenlösung und Porengefüge. GDCh-Tagung Bauchemie, 06.-08.10.2014, Proc. S. 208 - 211

Fischer, K.; Urbonas, L.; Heinz, D.:

Susceptibility of Fly Ash Concrete to Damaging Alkali Silica Reaction - Performance Testing Conditions. EuroCoalAsh 2014, 13.-15.10.2014, Proc. S. 301-310

Fischer, K.; Worm, U.; Urbonas, L.; Heinz, D.:

Damaging ASR in Fly Ash Concrete Exposed to NaCl -

Concrete with Borosilicate Glass and Greywacke.

EuroCoalAsh 2014, 13.-15.10.2014, Proc. S. 293-300

Fischer, K.; Worm, U.; Urbonas, L.; Heinz, D.:

Einfluss von NaCl auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton – Modellversuche mit Borosilikatglas und Grauwacke bei 20°C.

GDCh-Tagung Bauchemie, 06.-08.10.2014, Proc. S. 204-207

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

Wasserbeständigkeit von auf REA-Gips basierten Multi-Komponenten-Bindemittelsystemen. 2. Weimarer Gipstagung, 26.-27.03.2014, Proc. S. 175-182

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

Use of coal fly ash to improve water resistance of gypsum-based binder systems. EuroCoalAsh 2014, 13.-15.10.2014, Proc. S. 323-330

AG 1 Bindemittel und Zusatzstoffe

Dressler, A.; Urbonas, L.; Beddoe, R.E.; Gendvilas, R.; Heinz, D.:

Einfluss von NaCl auf pH-Wert der Porenlösung und Mineralphasen des Zementsteins bei verschiedenen Temperaturen.

GDCh-Tagung Bauchemie, 2014, Proc. S. 195 - 198

Dressler, A.; Urbonas, L.; Heinz, D.:

Avoiding damaging alkali silica reaction with fly ash – long term storage investigations. EuroCoalAsh 2014, Proc. S. 281 - 292

Dressler, A.; Urbonas, L.; Heinz, D.:

Influence of pozzolanic additives in concrete on the alkali-silica reaction with external alkali input (in russisch).

Cement and its Applications (russisch) 01/2014 (1), S. 118-122

Fischer, K.; Urbonas, L.; Heinz, D.:

AKR-Performance-Prüfung flugaschehaltiger Betone: Einfluss der Vorlagerung auf Porenlösung und Porengefüge. GDCh-Tagung Bauchemie, 06.-08.10.2014, Proc. S. 208 - 211

Fischer, K.; Urbonas, L.; Heinz, D.:

Susceptibility of Fly Ash Concrete to Damaging Alkali Silica Reaction - Performance Testing Conditions.

EuroCoalAsh 2014, 13.-15.10.2014, Proc. S. 301-310

Fischer, K.; Worm, U.; Urbonas, L.; Heinz, D.:

Damaging ASR in Fly Ash Concrete Exposed to NaCl - Concrete with Borosilicate Glass and Greywacke.
EuroCoalAsh 2014, 13.-15.10.2014, Proc. S. 293-300

Fischer, K.; Worm, U.; Urbonas, L.; Heinz, D.:

Einfluss von NaCl auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton – Modellversuche mit Borosilikatglas und Grauwa-
cke bei 20°C.
GDCh-Tagung Bauchemie, 06.-08.10.2014, Proc. S. 204-
207

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

Eigenschaften ultra-hochfester Betone mit zementklin-
kerarmen Bindemittelsystemen - Properties of Ultra-High
Performance Concrete with Low Cement Clinker Binder
Systems.
In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Fröhlich, S.; Thiemicke, J.
(Hrsg.): Nachhaltiges Bauen mit Ultrahochfestem Beton
- Sustainable Building with Ultra-High Performance Con-
crete. kassel university press GmbH, 2014, S. 61-92

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

Application of Isomorphic Ca-Si Rocks for the Synthesis
of α -C₂S Hydrate. Material Science (Medziagotyra) Volu-
me 20 (Issue 3), 2014

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

Heat flow during hydration of a novel hydraulic binder.
The 11th European Symposium on Thermal Analysis and
Calorimetry, August 17-21, 2014, Finland

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

Tribochemical and thermal activation of α -C₂S hydrate as
precursor for cementitious binders. Journal of Thermal
Analysis and Calorimetry Volume 118 (Issue 2), 2014, pp
817-823

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

Wasserbeständigkeit von auf REA-Gips basierten Multi-
Komponenten-Bindemittelsystemen. 2. Weimarer Gipsta-
gung, 26.-27.03.2014, Proc. S. 175-182

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

Use of coal fly ash to improve water resistance of gyp-

sum-based binder systems. EuroCoalAsh 2014 , 13.-
15.10.2014, Proc. S. 323-330

AG 2 Betontechnologie

Durán, F.; Lowke, D.; Männel, M.; Calis, C.; Gehlen, C.:

Optimal Pore Distribution of Porous Concrete Pavers Ag-
gregate.
12th International Symposium On Concrete Roads, EU-
PAVE, Sep. 23-26, 2014, Prague, Czech Republic

Franke, W.; Thiel, C.; Durán, F.; Gehlen, C.:

Effect of Calcium Nitrate on the Freeze-Thaw-Resistance
of Concrete.
2nd International Congress on Durability of Concrete,
Dec. 04-06, New Delhi, India

Gehlen, C.; Duran, F.; Lowke, D.:

Lärmarmes Betonsteinpflaster mit offenporigem Betonge-
füge.
58. Betontage, bauverlag, 2014, S. 40-41

Gehlen, C.; Kränkel, T.; Lowke, D.; Mazanec, O.:

Praxisorientierte Optimierung der rheologischen Eigen-
schaften von UHPC.
Panta Rhei – Rheologie des Frischbetons, 2014, 12. Mün-
chener Baustoffseminar, 27.03.14, München

**Glotzbach, Ch.; Lowke, D.; Kränkel, T.; Mazanec, O.;
Schmidt, M.; Gehlen, C.:**

Anwendungsorientierte Optimierung und Klassifizierung
der rheologischen Eigenschaften von UHPC - Optimiza-
tion and Classification of Rheological Properties of UHPC
for its Application.

In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Fröhlich, S.; Thiemicke, J.
(Hrsg.): Nachhaltiges Bauen mit Ultrahochfestem Beton
- Sustainable Building with Ultra-High Performance Con-
crete. kassel university press GmbH, 2014, Heft 22, S.
355-362

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

Zum Formfüllungsvermögen dünnwandiger Schalungen –
Experiment und Simulation.
Panta Rhei – Rheologie des Frischbetons, 12. Münchener
Baustoffseminar, 27.03.2014, München

Kränkel, T.; Lowke, D.; Gehlen, C.:

Verdichtbarkeit und Stabilität Leichtverarbeitbarer Beto-

ne. Panta Rhei – Rheologie des Frischbetons, 2014/12. Münchener Baustoffseminar, S. 19-25

Lowke, D.:

Frischbetonrheologie - Von der Konsistenz zu den interpartikulären Wechselwirkungen.

Panta Rhei – Rheologie des Frischbetons, cbm - Centrum Baustoffe und Materialprüfung, 12. Münchener Baustoffseminar, 27.03.2014, München

Mazanec, O.; Lowke, D.; Schießl, P.:

Optimierung des Mischprozesses ultra-hochfester Betone - Optimization of mixing procedure for Ultra-High Performance Concrete. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Fröhlich, S.; Thiemicke, J. (Hrsg.): Nachhaltiges Bauen mit Ultrahochfestem Beton - Sustainable Building with Ultra-High Performance Concrete. kassel university press GmbH, 2014, S. 115-127

AG 3 Stahl und Korrosion

Graubner, C.-A.; Bleyer, T.; Brunk, M.F.; Dreßen, T.; Fensterer, C.; Gehlen, C.; Haas, A.; Hanenberg, N.; Hauer, B.; Hegger, J.; Heusler, I. Keßler, S.; Mielecke, T.; Piehl, C.; Reinhardt, H.-W.; Roth, C.; Schießl, P.; Schneider, H.N.; Schwarte, J.; Sinnesbichler, H.; Wiens, U.; Zilch, K.:

Der Stadtbaustein im DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhaben "Nachhaltig Bauen mit Beton" – Dossier zu Nachhaltigkeitsuntersuchungen - Teilprojekt A.

Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb mit Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Heft 588, 2014

Kessler, S.; Fischer, J.; Straub, D.; Gehlen, C.:

Updating of service-life prediction of reinforced concrete structures with potential mapping. Cement & Concrete Composites (47), 2014, pp 47-52

Kessler, S.; Gehlen, C.:

Estimation of the main factors influencing potential mapping. Concrete Solutions 2014, 5th International Conference on Concrete Repair, 01.-03.09.2014, Queen's University, Belfast, UK

Keßler, S.; Kanzler, D.; Gehlen, C.:

Evaluation of a potential mapping using POD. 12th International Probabilistic Workshop, 2014, pp 119-126

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

Efficiency of materials used for repair measures of concrete structures exposed to chlorides. 5th International Conference on Concrete Repair – Concrete Solutions 2014, Queen's University, pp. 439-448

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

Approaches for Modelling the Residual Service Life of Marine Concrete Structures. International Journal of Corrosion, 2014

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

Performance based deemed-to-satisfy rules.

The Fourth International fib-Congress 2014, Mumbai, Feb. 10-13, 2014

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

Benchmark for deemed-to-satisfy rules.

The Fourth International fib-Congress 2014, Mumbai, Feb. 10-13, 2014

Westendarp, A.; Rahimi, A.; Reschke, T.; Spörel, F.:

Betone für den Wasserbau – gestern, heute, morgen; Teil 1.

Beton (Heft 5), 2014, S. 178-181

Westendarp, A.; Rahimi, A.; Reschke, T.; Spörel, F.:

Betone für den Wasserbau – gestern, heute, morgen; Teil 2.

Beton (Heft 6), 2014, S. 224-229

Zintel, M.; Angst, U.; Keßler, S.; Gehlen, C.:

Epoxidharzbeschichtete Bewehrung – Neue Erkenntnisse nach zwei Jahrzehnten Praxiserfahrung. Beton und Stahlbetonbau Heft 1, 2014

AG 4 Chemie

Schwindl, S.; Rommel, M.; Gutberlet, T.; Beddoe, R.E.; Hilbig, H.:

Composition of hardened cement paste after exposure to acids with LA ICP MS.

12th European Workshop on Laser Ablation, EWLA 2014, Proc. P. 94

Vaitkevicius, V.; Šerelis, E.; Hilbig, H.:

The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. Construction and Building Materials 68, 2014, pp. 102-109

**Schwindl S.; Rommel M.; Gutberlet T.; Beddoe R.E.;
H. Hilbig:**

Untersuchung von säuregelagerten Zementsteinproben
mit LA ICP MS.

Tagung Bauchemie 2014 der GDCh-Fachgruppe Bau-
chemie, Kassel, 06.-08.10.2014

AG 6 Zerstörungsfreie Prüfung

Groschup, R.; Große, C.U.:

Neue Ansätze zur Anwendung der Impakt-Echo-Methode.
DGZfP-Jahrestagung, 26.-28.05.2014, Potsdam

Große, C.; Malm, F.:

Betone mit Selbstheilungseigenschaften - Entwicklung
und Prüfung.

58. Betontage, Ulm, 18.-20.02.2014, BFT International,
bauverlag, S. 20-24

Malm, F.; Grosse, C.:

Examination of Reinforced Concrete Beams with Self-
Healing Properties by Acoustic Emission Analysis.

31st Conference of the European Working Group on
Acoustic Emission (EWGAE), Sep 3-5, 2014, Dresden

Stark, F.; Grager, J.-C.; Grosse, C. U.:

Kombinierte Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von
monolithischen CFK-Klebeverbindungen.

DGZfP-Jahrestagung, 26.-28.05.2014, Potsdam

Wünnemann, K.; Grosse, C; Güldemeister, N.;

Moser, D.:

Numerical modeling and acoustic testing techniques at
impact craters on a laboratory scale – what can we learn
to better understand meteorite craters?

74. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Ge-
sellschaft, 25.03.2014, Karlsruhe

Beitrag zur Eurocoalash 2014, October 13 – 15, 2014, Munich

11.1 Avoiding Damaging Alkali Silica Reaction with Fly Ash – Long Term Storage Investigations

Anne Dressler, Liudvikas Urbonas, Detlef Heinz

Abstract

The alkali silica reaction (ASR) in concrete with reactive aggregate is a slow process under natural conditions. Accelerated laboratory test methods are used to estimate the susceptibility of aggregate and concrete to a damaging alkali silica reaction. Favourable results are obtained when fly ash is used in concrete made with reactive aggregate. However, accelerated test conditions affect the ASR mechanisms and the pozzolanic reaction. Thus the results of laboratory tests have to be confirmed by the behaviour of the same materials stored under natural conditions.

In this study, the long term effect of fly ash on damaging ASR in concrete with different compositions was investigated. Cements with different alkali contents were partially replaced by fly ash. Concrete cubes were exposed to natural outdoor weather for almost ten years. In another series of ongoing long term tests, the behaviour of similar concretes exposed to natural conditions and sodium chloride was investigated over a period of five years. The results of all the long term outdoor storage tests confirm the inhibiting effect of fly ash on damaging ASR, providing the replacement level is adequate.

Introduction

Concrete damage due to the alkali silica reaction (ASR) is caused by expansive gel formation when certain components of the aggregate react with the alkalis in the pore solution. Alkalis are released from the cement into the pore solution or originate from penetrating deicing agents, e.g. NaCl.

It is well-known that cement replacement by fly ash can reduce damaging ASR [1-3]. This is attributed to different phenomena. Cement replacement by fly ash reduces the proportion of active alkalis in the pore solution. The pozzolanic reaction of the fly ash densifies the microstructure reducing ionic transport in the binder paste matrix. In addition, alkalis are bound in the products of the pozzolanic reaction. However, the beneficial effect of fly ash on reducing damage due to ASR in concretes exposed to external alkalis is poorly investigated.

Laboratory test methods use accelerating conditions to shorten the test period. High temperatures and humidity as well as high concentration of the storage solution accelerate the ASR as well as the pozzolanic reaction. To confirm the effectiveness of fly ash under normal conditions with and without deicing agent, concrete samples with different compositions were stored outdoors and some of them were sprayed by a NaCl solution.

Materials and Concrete

At the Centre for Building Materials (cbm) in Munich, the use of coal fly ash in concrete to avoid damaging ASR has been the subject of intensive investigation for many years. Extensive series of tests with normal and self-compacting concretes have been carried out

to investigate ASR-induced expansion and cracking for concrete made with fly ash [4-7]. In this study greywacke, gravel and crushed material from the Upper Rhine Valley as well as gravel containing opaline sandstone were used as reactive aggregates. The specimens (300 mm cubes made with the cements in Table 1) were exposed to the outdoor climate in Munich. In later investigations, specimens of similar composition were additionally sprayed with NaCl solution. These cubes contained other cements, but with the same equivalent alkali contents (marked with “*” in Table 1).

In a first series of investigation, concretes were prepared with Precambrian greywacke (GW) as well as gravel and crushed material from the Upper Rhine Valley (URV). Gravel containing opaline sandstone was used as a highly reactive aggregate which is no longer available for a general use in commercial concretes. The aggregate was graded at A/B 16. The supplementary cementitious materials (SCM) fly ash (F) and finely ground limestone (LS) were mixed with different cements. The relevant properties of the materials are listed in Table 1. The concretes were prepared with 500 and 400 kg/m³ binder (f + c) at a w/b ratio of 0.5 and 0.45, respectively. The cement was replaced by weight with fly ash (k-value = 1) keeping the w/b ratio constant. The equivalent alkali content of the Portland cements used CEM I 32.5 R was 1.2, 1.0, 0.8 and 0.6 wt.%. Fly ashes F1 and F2 fulfil the specifications of DIN EN 450-1 [4]. Both fly ashes have a similar fineness, but different equivalent alkali contents (3.6 and 1.1 wt.%). The cement was replaced by fly ash at amounts between 15 and 35 wt.%. Limestone was used as an inert reference material.

Table 1
Characteristics of cements and
supplementary cementitious
materials

Para- meter	Cements						Supplementary cementitious materials		
	C1	C2 / C2*	C3 / C3*	C4 / C4*	C5 42% GGBS ¹	C5* 30% GGBS ¹	LS	F1	F2
	CEM I				CEM III/A	CEM II/B			
Na ₂ O _e wt. %	1.2	1.0	0.8	0.6	1.0	1.0	0.2	3.6	1.1
Fineness [wt. % > 45µm]							33.0	21.4	18.1
Activity index 28d / 90d [%]							68/62	84/98	81/104
Glass content ² [wt. %]							--	80	67

¹ Ground granulated blast-furnace slag

² XRD with Rietveld analysis

In a second series of tests, concrete compositions for road construction were prepared with Precambrian greywacke, crushed material from the Upper Rhine Valley and fly ash or finely ground limestone as supplementary cementitious materials. The concretes without SCM were prepared with 350 kg/m³ cement at a w/c ratio 0.45. The cement was replaced with fly ash (k-value = 0.4) keeping the w/(0.4 f + c) ratio of 0.45 constant. The binder content increases with increasing replacement level from 400 kg/m³ (20 wt.%), 410 kg/m³ (25 wt.%) to 420 kg/m³ (30 wt.%). The aggregate was graded at A/B 16 and an air-entraining agent was added to achieve an air void content of 4.5 - 5.5%.

Results

Cracking of Concrete under Natural Conditions

In earlier investigations, favourable results were obtained for fly ash concretes with potentially reactive aggregates using accelerated tests methods (e.g. 40 °C fog camber, Alkali Guideline published by the German Committee for Reinforced Concrete (DAfStb)) [4-7]. However, accelerated test conditions affect the mechanisms of ASR and the pozzolanic reaction of the fly ash. Thus, the results of laboratory tests were checked by storing the same concretes under natural conditions (Munich outdoor climate).

The effectiveness of fly ash to inhibit ASR is also confirmed by the concrete cubes stored outdoors over the last 10 years. Some specimens exhibited cracks with widths below 0.1 mm (grey region in Figures). In this case, no damaging ASR during this period may be assumed. It also should be noted that the concrete cubes were also exposed to freeze-thaw attack which enhanced crack development in the winter period. Thus the present results show the combined attack of ASR and freeze-thaw attack. In this investigation, it is not possible to separate between these effects.

As worst case scenario, a well-known highly reactive aggregate (gravel containing opaline sandstone) and a high binder content of 500 kg/m³ were used. Significant cracks were already observed after less than one year. After storage of about ten years, concretes containing pure cement (C1) or cement replaced by 15 to 30 wt.% limestone in the binder exhibited crack widths of 1.2 to 3.5 mm (Figure 1). Cement replacement by fly ash reduced crack formation continuously with increasing replacement level. Subjected to these conditions, a fly ash content of 35 wt.% F1 or 30 wt.% F2 are sufficient to inhibit damaging ASR for up to 10 years.

Concrete cubes of the same composition ($b = 500 \text{ kg/m}^3$, $w/b = 0.5$) with different aggregate types were also stored outdoors. As already mentioned, gravel containing opaline sandstone develops cracks after less than one year. However, after ten years aggregates from the Upper Rhine Valley possess the largest crack widths of 3.5 (gravel) and 5.0 mm (crushed material). After same storage period, greywacke and the gravel with opaline sandstone resulted in lower crack widths of 2.5 and 1.4 mm, respectively. No crack formation due to ASR in concretes containing URV and GW was observed when using $\geq 20 \text{ wt.}\%$

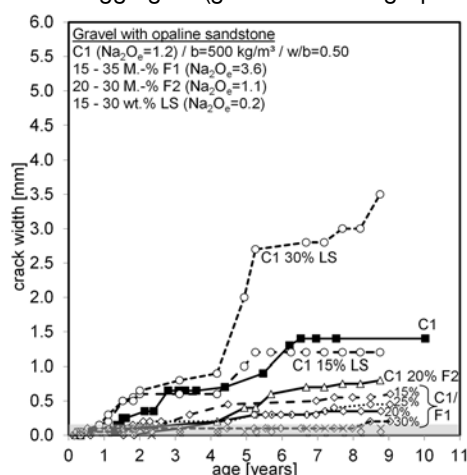


Figure 1
Development of cracks in concrete cubes containing opaline sandstone in outdoor conditions. The concretes were made with cement C1 and different binder compositions with fly ash and limestone; $b = 500 \text{ kg/m}^3$; $w/b = 0.50$

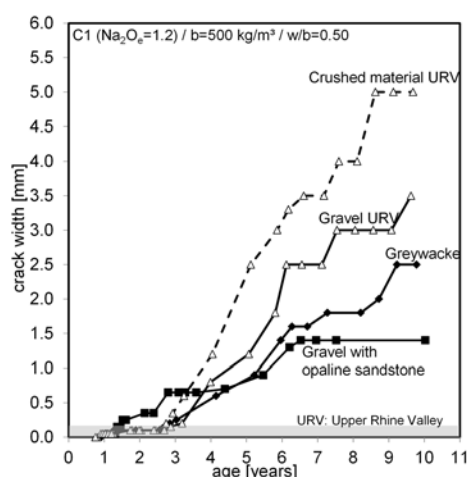


Figure 2
Development of cracks in concrete cubes containing opaline sandstone in outdoor conditions. The concretes were made with different aggregates and cement C1; $b = 500 \text{ kg/m}^3$; $w/b = 0.50$

Figure 3

Development of cracks in concrete cubes containing greywacke in outdoor conditions. The concretes were made with C1 and different binder compositions with fly ash and limestone; $b = 400 \text{ kg/m}^3$; $w/b = 0.45$

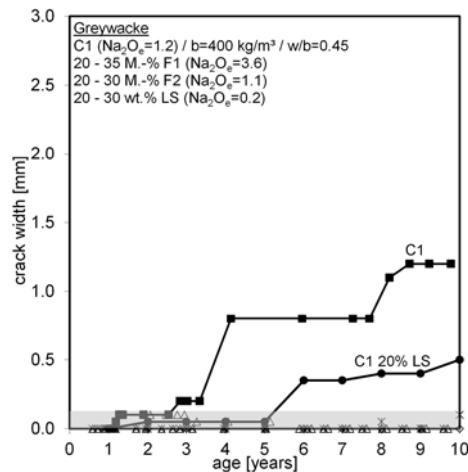


Figure 4

Development of cracks in concrete cubes containing greywacke in outdoor conditions. The concretes were made with different cements and 30 wt.% fly ash F1; $b = 400 \text{ kg/m}^3$; $w/b = 0.45$

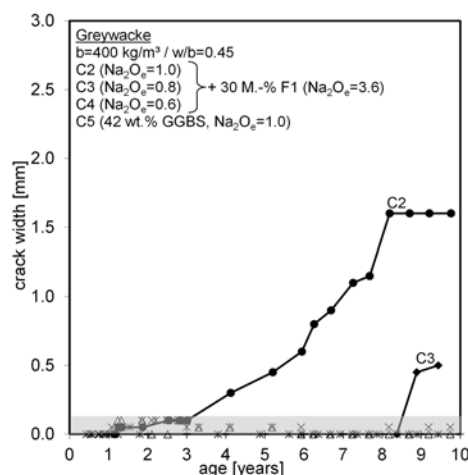
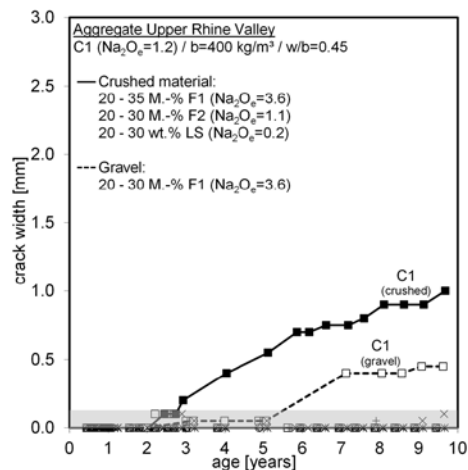


Figure 5

Development of cracks in concrete cubes containing gravel and crushed material from the Upper Rhine Valley in outdoor conditions. The concretes were made with C1 and different binder compositions with fly ash and limestone; $b = 400 \text{ kg/m}^3$; $w/b = 0.45$



fly ash - even though very wide cracks formed in these concretes made without fly ash (Figure 2).

Other specimens were prepared with a binder content of 400 kg/m^3 and a w/b ratio of 0.45. First small cracks in concretes containing greywacke appeared in the specimens C1 and C2 (both without fly ash) stored outdoors after about one year. After ten years the cubes C1 and C2 had cracks with widths of 1.2 mm and 1.6 mm, respectively (Figure 3 and Figure 4). Cracks due to ASR did not form in concrete cubes C1 with greywacke and replacements levels of 20, 25 and 30 wt.% with fly ash F1 and F2 outdoors (Figure 3).

After about three years a concrete cube C1 with 20 wt.% limestone began to develop cracks. After ten years, this cube contained cracks with widths of about 0.55 mm. Concrete made with cement with a lower Na_2O_e (0.8 wt.%) exhibited cracks after about eight years. After ten years this concrete cube had a maximum crack width of 0.5 mm (Figure 4). Up to now no cracks due to ASR could be found in cubes produced with different cements and a replacement level of 30 wt.% by fly ash F1 and concretes containing C4 ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0.6$) as well as C5 (42 wt.% GGBS, $\text{Na}_2\text{O}_e = 1.0$) (Figure 4).

Figure 5 shows the development of cracks in concretes containing aggregate from the Upper Rhine Valley. In accordance with Figure 2, the crushed material exhibited larger damage and higher crack widths (1.0 mm after ten years) as gravel from the same deposit (0.45 mm). This is thought to be due to the higher proportion of freshly broken surface of the crushed material and the higher total surface. Nevertheless, cement replacement by more than 20 wt.% fly ash (F1 and F2) inhibit damaging ASR for up to ten years outdoor storage.

Cracking of Concrete under Natural Conditions sprayed with deicing agent (NaCl)

To estimate the effect of deicing agents under natural conditions, another series of concrete cubes were produced. After an initial storage of 28 days at high humidity and moderate temperatures the cubes were brought outdoors and sprayed twice a week with a defined amount of 10 wt.% NaCl solution. This procedure was used to simulate the conditions of road construction concrete exposed to deicing agents.

Figure 6 shows the development of cracks in concretes containing a binder content of 400 kg/m³ and a w/b ratio of 0.45 without air entraining agent. Crack formation in cube C2* (cement with high Na₂O_e = 1.0) exposed to NaCl began after 2.5 years. After five years the crack width was 0.7 mm. Cube C2 with a similar composition, but not exposed to NaCl shows a lower crack width of 0.45 mm after five years. In cube C3* (cement with Na₂O_e = 0.8) exposed to NaCl crack formation starts earlier after four years. Cracks in cube C3 without exposure to NaCl did not form until after eight years. The more pronounced damage of concrete cubes result from an intensified ARS in the presence of NaCl as is described in many other investigations [8-12].

Similar results were obtained for the road construction concretes (Figure 7). Compared with the cubes in Figure 6, these concrete cubes possess lower cement contents and higher air void contents of 4.5 to 5.5 vol.%. Such conditions are known to reduce damaging ASR as well. Therefore, crack formation in cube C2* with greywacke began later (after four years). A cube with crushed material from the Upper Rhine Valley developed cracks after three years.

The weathering of the concrete surfaces and crack formation is shown in Table 2. Cubes without air entraining agents exhibited a high degree of spalling which was caused by the action of freezing and thawing.

In spite of exposure to NaCl, up to now no cracks due to ASR have occurred in cubes made with low alkali cements or more than 30 wt.% ground granulated blast-furnace slag as well as 20 wt.% fly ash (F1 and F2) in the binder (Figure 6, Table 2). In case of the low alkali cement, this is due to a lower starting alkali concentration in the pore solution. Concretes containing GGBS possess a denser microstructure which reduces ingress of external alkalis and transport processes inside the concrete. The cubes with fly ash as SCM combine

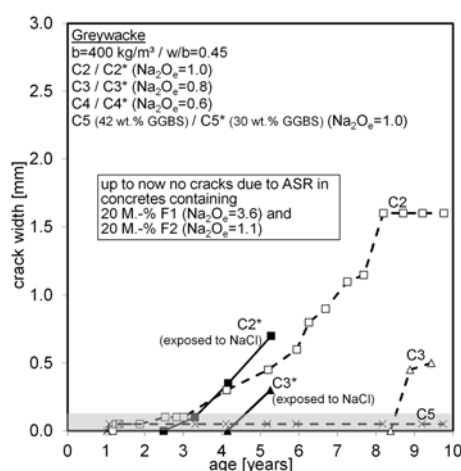


Figure 6
Comparison of crack development in concrete cubes containing greywacke in outdoor conditions. The concretes were made with different binder compositions with fly ash with and without exposure to NaCl

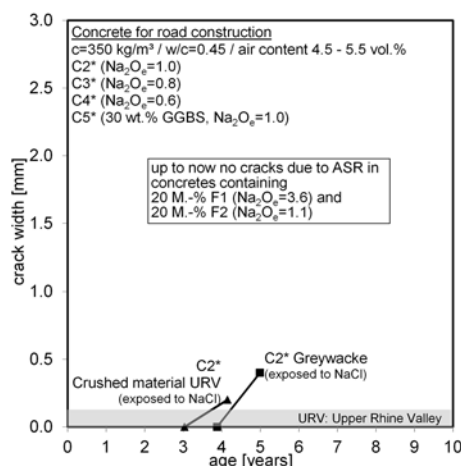
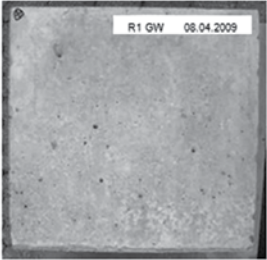
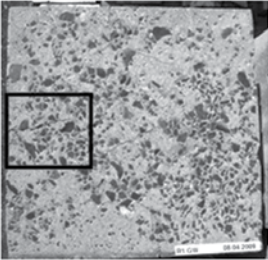
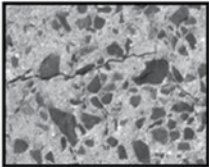
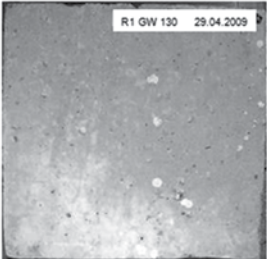
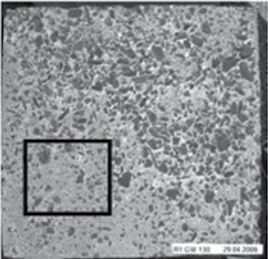
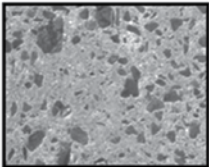
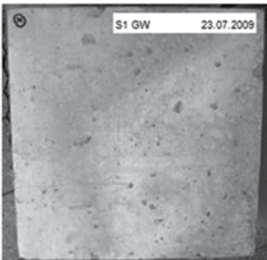
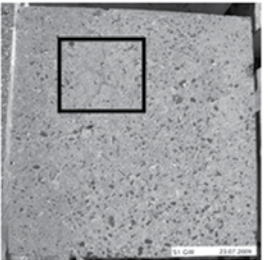
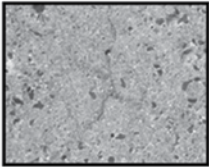


Figure 7
Comparison of crack development in concretes for road construction containing different cements and aggregates exposed to NaCl

Table 2:
Surface of concrete cubes
(30x30 cm²) stored under na-
tural conditions and exposed
to NaCl

Age	28 days (start)	5 years	Detail
C2* c=400kg/m ³ w/c=0.45			
C2* 30% F1 c=400kg/m ³ w/c=0.45			
C2* c=350kg/m ³ w/c=0.45 air content: 4.5-5.5 %			

both effects: lower starting alkali contents and a denser microstructure. Additionally, the products of the pozzolanic reaction are able to bind alkalis and reduce the alkali content in the pore solution continuously [2, 8].

Summary

The present results confirm the favourable effect of fly ash fulfilling the requirements of DIN EN 450 [13]. Former investigations [14] show that the results for concretes containing greywacke and material from the Upper Rhine Valley in the accelerated fog chamber test correspond to the behaviour in outdoor conditions (without exposure to NaCl). Fly ash inhibits damaging ASR for up to ten years in concretes with a binder content of 400 kg/m³ and cement replacement with ≥ 20 wt.% fly ash. After five years exposure to NaCl, concretes with ≥ 20 wt.% fly ash showed no damage due to ASR. However, the results after a longer storage period are necessary to be certain of these results.

The present investigation indicates that damaging ASR with and without the presence of external alkalis can be avoided by using an adequate content of fly ash in the binder – independent of the alkali content of the cement.

Acknowledgements

The research was funded by the German Federation of Industrial Research Associations "Otto von Guericke e. V." (AiF, No. 13605 N and 15866 N) and the International Association of Power and Heat Generating Utilities (VGB, No. 249 and 372).

The authors would like to thank Dr. R.E. Beddoe for his advice and reviewing the article.

References

- [1] da Cunha Munhoz, F.A., Kihara, Y. und Cincotto, M.A.: Effect of mineral admixtures on to the mitigation of alkali-silica reaction in concrete. 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Broekmans, MATM and Wigum, BJ, Trondheim, Norway, 2008, p. 612-620.
- [2] Schmidt, K.: Verwendung von Steinkohlenflugasche zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure Reaktion im Beton. Phd thesis Technische Universität München. 2009.
- [3] Thomas, M.D.A.: Field studies of fly ash concrete structures containing reactive aggregates. Magazine of Concrete Research, 48 (177), 1996, p. 265-279.
- [4] Heinz, D., Urbonas, L. und Dressler, A.: AKR - Vermeidung durch Flugasche - Langzeitlagerung. VGB No. 300. report TU München. 2010.
- [5] Heinz, D., Urbonas, L. und Dressler, A.: Einsatz von Flugasche (FA) als Betonzusatzstoff zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) bei Einsatz alkali-empfindlicher Gesteinskörnung und zusätzlichem Alkalieintrag von außen. AiF No. 15866. report TU München. 2011.
- [6] Heinz, D., Urbonas, L. und Schmidt, K.: Einsatz von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure Reaktion bei alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen. AiF No. 13605. report TU München. 2006.
- [7] Heinz, D., Urbonas, L. und Schmidt, K.: Vermeidung von schädigender AKR durch Steinkohlenflugasche. Beton- und Stahlbetonbau, 8, 2007, p. 511-520.
- [8] Dressler, A.: Einfluss von Tausalz und puzzolanischen, aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton. Phd thesis Technische Universität München. 2013.
- [9] Giebson, C.: Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton für Fahrbahndecken und Flugbetriebsflächen unter Einwirkung alkalihaltiger Enteisungsmittel. Phd thesis Bauhaus-Universität Weimar. 2013.
- [10] Siebel, E., Böhm, M., Borchers, I., Bokern, J., Müller, C. und Schäfer, E.: AKR-Prüfverfahren - Vergleichbarkeit und Praxisrelevanz. 16. Internationale Baustofftagung - Ibausil. Stark, J., Weimar, 2006, p. 2-373 - 2-388.
- [11] Stark, J., Bellmann, F., Gathemann, B., Seyfarth, K. und Giebson, C.: Einfluss alkali-haltiger Taumittel auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Betonen für Fahrbahndecken und Flugbetriebsflächen. Zement, Kalk, Gips, 59 (11), 2006, p. 74-82.
- [12] Stark, J., Freyburg, E., Seyfarth, K. und Giebson, C.: AKR-Prüfverfahren zur Beurteilung von Gesteinskörnungen und projektspezifischen Betonen. Beton (12), 2006, p. 574-581.
- [13] DIN EN 450-1: Fly ash for concrete - Part 1: definitions, requirements and conformity criteria. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin, 2005.
- [14] Dressler, A., Schmidt, K. und Heinz, D.: Avoiding a Damaging Alkali Silica Reaction with Fly Ash. 2nd EUROCOALASH Conference, Copenhagen, Denmark, 2010.

In: Proceedings of the 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering
Université Laval, Quebec, Canada, July 21, 2014

11.2 Accelerated Carbonation: Changes in Water Transport, Porosity and Phases of Mortar Due to Different CO₂ Pressures

Charlotte Thiel, Robin Beddoe, Dirk Lowke and Christoph Gehlen

Abstract

Currently, the carbonation resistance of concrete is assessed on the basis of accelerated tests performed with high (unrealistic) CO₂ concentrations. It remains unclear whether these high concentrations reflect the processes occurring under natural conditions and enable the accurate prediction of field behaviour. To develop future test procedures with higher reliability, it is necessary to deepen the knowledge on the mechanisms of carbonation.

Thin slices of mortar were stored in a gaseous mixture of 2 % CO₂ and 98 % N₂ at atmospheric pressure or 5 bar. ¹H-NMR equipment was used to determine moisture profiles with a resolution of 0.2 mm. At 5 bar a drying front at the near-surface region of the mortar discs severely inhibited the progression of the carbonation reactions. This effect was prevented by exposure to alternating cycles of pressure and storage at atmospheric pressure (65 % RH) which significantly increased the rate of carbonation, but was too severe to resolve the effect of cement type on carbonation resistance. Furthermore, the evolution of water beyond the carbonation front of mortar samples under accelerated concentration and at atmospheric pressure was clearly visible. This may lead to an overestimation of carbonation resistance of samples tested under accelerated conditions at the optimal relative humidity for natural carbonation (50 - 70 % RH).

1 Introduction

The carbonation of concrete is a well-known phenomenon that has been intensively studied in the past, [1-8]. When CO₂ diffuses into the concrete structure, it dissolves and reacts with the phases of the hydrated binder CH¹⁾, sulfate-containing phases (AFt and AFm) and C-S-H. Carbonation reactions lead to a decrease in pH and result in changes in the microstructure and the moisture content. The production of water by the carbonation reaction may reduce the available space for CO₂ diffusion [8]. In addition, it may be involved in moisture transport and promote the reaction of residual clinker [8].

It is well known that the decrease in pH produces a risk of corrosion. Therefore, knowledge of the carbonation rate is necessary to predict the durability of reinforced concrete structures. The carbonation rate can be determined by testing concrete specimens under natural conditions (0.03 to 0.07 vol.% CO₂) and determining the carbonation depth at different time intervals over several years. However, this procedure requires a very long time. To shorten the time for testing the carbonation process can be accelerated using increased CO₂ concentrations [9, 10].

Higher CO₂ concentrations lead to a higher carbonation rate than in natural conditions. However, the accelerated carbonation rate is generally significantly lower than the acceleration of the CO₂ concentration [9]. Hence, the carbonation resistance of samples tested under accelerated conditions may be overestimated compared to natural conditions.

¹⁾ Cement notations: C=CaO, H=H₂O, S=SiO₂
Proc. of the 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering
July 21 to 23, 2014, Université Laval, Québec, Canada

The following reasons for this phenomenon are proposed in the literature [9].

- ♣ The moisture conditions in the pore structure and
- ♣ The different phase formation and pore structure produced by accelerated test methods

The carbonation reaction releases water changing the moisture condition of the pore structure and therefore reducing the carbonation rate. However, this effect has not yet been systematically investigated [9]. The accumulation of water could also lead to a change in the dependence of carbonation rate and ambient relative humidity so that the maximum carbonation rate occurs at a lower relative humidity. Systematic investigations on the influence of moisture transport will be carried out in the course of this PhD thesis.

According to various authors (e.g. [11, 12]) carbonation at elevated CO_2 concentrations results in the carbonation of additional components of the hardened cement paste matrix. Thus, the pores of the cement paste at high CO_2 levels clog stronger than under natural conditions [9]. This might lead to a slower carbonation progress and consequently an overestimation of carbonation resistance. Castellote et al. [12] found that below a CO_2 concentration of about 3 vol.% the nanostructure of the C-S-H gel is preserved. Thus the chemical reactions occurring at these concentrations appear to be comparable to those under natural conditions. In this contribution, investigations with a CO_2 concentration of 2 vol.% are carried out in order to focus on the role of the moisture transport processes.

Besides the increase in CO_2 concentration, the transport of CO_2 can be accelerated by permeation of a gas mixture with natural or elevated CO_2 concentrations under pressure ("pressure carbonation"). Young et al. [13] found that with pure CO_2 gas, concrete carbonation was accelerated by increasing the pressure from 1 to 2 bar, but was not significantly changed by a further increase to 4 bar. According to a comparison of gas diffusion and permeation in concrete by Graef and Grube [14], the gas diffusion coefficient is $4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ for a concrete with a permeability coefficient of 10^{-16} m^2 . Increasing the air pressure on the concrete surface to 10 bar increases the diffusion of CO_2 by a factor of 10, but due to permeation, the CO_2 transport even increases by a factor 8000.

The present study investigates the effect of elevated CO_2 concentrations at elevated pressures on moisture transport and porosity of mortars during carbonation.

2 Materials and Investigations

Materials

Two different mortars were used in the investigations. The mortars were designed using the concrete-equivalent-mortar method and based on a concrete (cement content = 280 kg/m^3 , $w/c = 0.50$) fulfilling the requirements of European standards for the exposure class XC3 (corrosion of the reinforcement induced by carbonation at moderate humidity). The compositions of the resulting mortars are shown in Table 1. Standard siliceous sand was used. Both mortars had a w/c ratio of 0.50. For the mortar M1 ordinary Portland cement (CEM I 42.5 R) was used while the mortar M3 contained blast-furnace slag cement (CEM III/B 42.5 N-LH/HS/NA).

Table 1
Mortar composition and characteristics

Name	Cement [kg/m ³]	Water [kg/m ³]	Sand [kg/m ³]	Air void content [vol.%]	Raw density [kg/m ³]	28 day compressive strength [MPa]
M1	551.6	275.8	1371.8	2.5	2234	55.8
M3	547.6	273.8	1360.5	2.9	2227	55.9

From each mixture cylinders (height = 300 mm, diameter = 36 mm) were prepared. The cylinders were demoulded after one day and then stored in a saturated Ca(OH)₂ solution for at least 1 year.

To minimize the effect of possible transport processes, 3 mm thick discs were cut from the cylinders. To minimize compaction effects, the first 15 mm of material at the ends of the cylinders were discarded. The mortar discs were stored in climate chambers at 20° C and 65 % RH in a CO₂-free atmosphere until the mass change after two consecutive measurements was below 0.1 wt.%. As mentioned in the first section, water is necessary to enable the carbonation reactions, while too much water limits the reaction due to pore clogging. Hence, a relative humidity of 50 – 70 % offers optimal carbonation conditions [–8, 9].

Experimental Procedures

After drying, the discs were exposed to accelerated carbonation at 2 vol.% CO₂ and 20° C in three different conditions:

- P_{atm}: atmospheric pressure and relative humidity of 65 %
- P_{5,c}: 5 bar constant pressure
- P_{5,alt}: alternating exposure, : 6 hours at 5 bar followed by 18 hours at atmospheric pressure in a CO₂-free atmosphere at 65 % RH.

Eight discs were used for each individual combination of composition and condition. The storage at atmospheric pressure were carried out in a CO₂ incubator KPK 120 from Mytron. An autoclave Berghof HR – 28L was used for the studies at elevated pressure. After different time intervals the moisture profile was determined with single-sided nuclear magnetic resonance (NMR) and the carbonation depth measured using a pH indicator test. This pH indicator remains colourless at pH values below 8.3 and is pink-fuchsia at a pH above 10. While this test is quick, easy and cheap, it has the disadvantage that the total depth of pH reduction is not detected [9]. The NMR test method is described in detail in [15-17]. The Magritek PM25 single-sided NMR MOUSE was used. The measurements were carried out using the CPMG pulse sequence [18]. A resolution of 0.2 mm, a repetition time of 500 ms, 256 scans and 256 echoes were used.

To determine the porosity, MIP (Mercury Intrusion Porosimetry) measurements were performed using an AutoPore III from Micromeritics. Note that the small gel pores are not detected by MIP. The results of the porosity measurements are always below the total porosity as assessed using equation 1.

$$\pi_{\text{dens}} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{bulk}}}{\rho_{\text{matrix}}}\right) \cdot 100 \quad [\text{vol.\%}] \quad (1)$$

The bulk density ρ_{bulk} was determined by weighing and the matrix density ρ_{matrix} was determined with the helium pycnometer AccuPyc 1330 by Micromeritics.

3 Results and Discussion

The carbonation depths determined with a pH indicator test are shown in Fig. 1. As expected, the carbonation depth of the samples with blast-furnace slag cement ("M3") is significantly faster in samples subjected to constant pressure. This is due to the reduced clinker content and therefore lower content of CH in the hydration products compared with ordinary Portland cement.

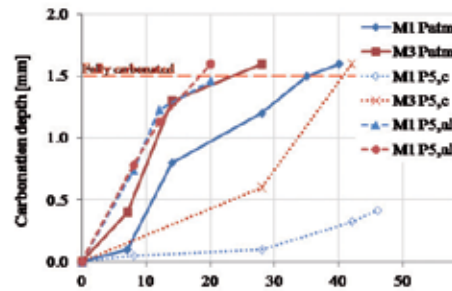


Figure 1
Effect of storage conditions and cement type on evolution of carbonation depth [days] at 2 vol.% CO₂. Continuous storage at atmospheric pressure, P_{atm} or at 5 bar, P_{5,c}. Alternating storage P_{5,alt}, cycles of 6 h at 5 bar and 18 hours atmospheric pressure 65 % RH and 0% CO₂.

It is apparent that pressure affects the rate of carbonation decisively, irrespective of cement type, carbonation being slower at the higher pressure. The series M1 P_{5,c} carbonates much slower than the samples M1 P_{atm}. While the samples M3 P_{5,c} are completely carbonated after 42 days, the samples M1 P_{5,c} are merely carbonated at the edge. Compared with the series with continuous CO₂ exposure at atmospheric pressure, subjecting samples to alternating cycles of pressurization and atmospheric pressure is an effective procedure to increase the carbonation progress. However, the carbonation depths for the samples made with Portland and blast-furnace slag cement indicate that this exposure cycle is so severe that all effects of mortar composition are completely suppressed.

The porosities measured with MIP π_{MIP} and helium pycnometry, calculated with Eq. (1), π_{dens} before and after accelerated carbonation at atmospheric pressure or 5 bar are shown in Table 2 for the mortars with ordinary Portland cement (M1). Due to carbonation, the porosity decreased in all samples, the largest decrease occurring for 5 bar. The porosity determined by helium pycnometry is, as expected, generally higher than that determined by MIP. However, the difference in porosity determined by MIP and helium pycnometry for the samples subjected to 5 bar compared with the untreated samples is very small indicating a reduction in the amount of finer pores (< 2 nm diameter) during the carbonation reactions.

Sample	π_{MIP} [vol.%]	$\Delta\pi_{MIP}$ [vol.%]	π_{dens} [vol.%]	$\Delta\pi_{dens}$ [vol.%]
M1 before exposure	17.8	-	18.7	-
M1 P _{atm} 35d exposure	12.8	-5.0	14.2	-4.5
M1 P _{5,c} 35d (partially carbonated)	11.3	-6.5	11.7	-7.0

Table 2
Porosities (mean of two measurements) and change in porosity $\Delta\pi$ due to exposures to 2 vol.% CO₂ at atmospheric pressure P_{atm} or 5 bar P_{5,c}.

Fig. 2 shows the water content profiles determined at different time intervals for the mortar with ordinary Portland cement. The near surface zones at the top and at the bottom of the samples (0-0.2 and 2.8 - 3.0 mm) were not considered, since experience has shown that large variations arise due to the rough and uneven surfaces.

Figure 2
Water content determined by single-sided NMR for ordinary Portland cement mortar samples before and after exposure to 2 vol.% CO₂ (a) at atmospheric pressure, P_{atm}, (b)

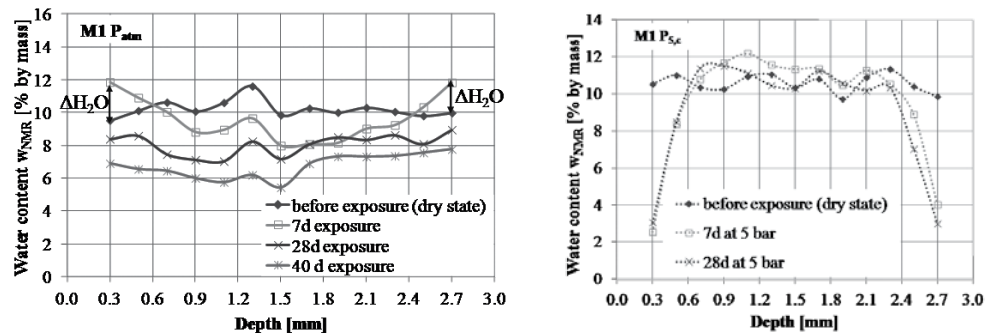
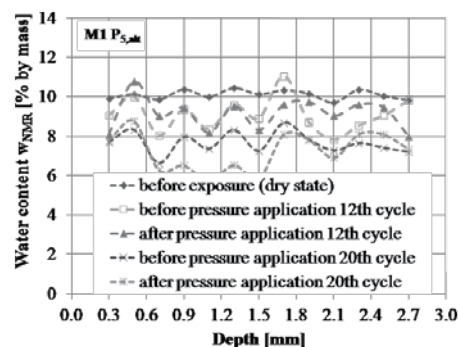


Fig. 2a shows the moisture profiles of the samples that were exposed to accelerated carbonation at atmospheric pressure. After 7 days (carbonation depth with phenolphthalein approx. 0.1 mm), a higher water content is measured in the near surface region (0.3 and 2.7 mm). This clearly shows that water is released inside the specimens during carbonation. The overall water content then decreases during exposure and becomes, perhaps, somewhat flatter which is obviously due to drying and redistribution of moisture by water vapour diffusion. This suggests that the water formed during carbonation has already evaporated. At the same time the pore space is reduced by the carbonation reactions, so that fewer pores are present in which the equilibrium moisture condition is reached.

The moisture profiles of the series M1 P_{5,c} show a very low moisture content in the surface regions of the samples after 7 days and 28 days of continuous pressure application. Thus the samples are clearly dried by the permeation of the dry gas, leading to a lack of water for the carbonation reaction.

Figure 3
Water content determined by single-sided NMR for ordinary Portland cement mortar samples before and after exposure to alternating exposure, 6 h at 5 bar and 2 vol.% CO₂ and 18 h at atmospheric pressure without CO₂, P_{5,alt}



The moisture profiles for the samples M1 P_{5,alt} subjected to alternating carbonation are presented in Fig. 3. Here, no significant changes in the moisture content are discernible. As expected, the carbonated areas show slightly lower moisture contents, suggesting a denser material structure. The water content of the edge regions of the samples directly after applying gas pressure is slightly lower than before. Moreover, the sharp drying front as observed for the samples M1 P_{5,c} is not apparent.

However, this exposure condition seems to completely suppress concrete technological effects. Hence, the exposure to alternating pressure cycles is in its current form not suitable for the evaluation of the carbonation resistance of mortars.

4 Conclusions and Outlook

At present, accelerated carbonation tests are conducted at different CO₂ concentrations using different storage conditions of the specimens. Based on the results, the resistance against carbonation is assessed. If this carbonation resistance is a material property, it should relate to the carbonation of concrete in field conditions. However, this is not generally the case and there is therefore need for research to improve the transferability of

results obtained under accelerated laboratory conditions to field exposure. Therefore, this contribution considers the effect of accelerated carbonation on the moisture transport, porosity and phase changes of mortar.

Based on the present results, the following conclusions may be drawn:

- ♣ Single-sided NMR is a valuable tool to investigate moisture transport processes occurring during carbonation non-destructively.
- ♣ Accelerated carbonation (2 vol.% CO₂) at atmospheric pressure leads to an increase in moisture content beyond the carbonation front. This may lead to an overestimation of carbonation resistance of samples tested under accelerated conditions. Since the optimum relative humidity for carbonation under natural conditions is between 50 – 70 %, the relative humidity for carbonation under accelerated conditions could be lowered to compensate the formation of additional moisture in the pore system. Future work will focus on this aspect.
- ♣ The acceleration of carbonation by applying a dry gas pressure of 5 bar significantly reduces the amount of water for the carbonation reactions. The rate of carbonation can be increased by alternating the gas pressure application with storage at 65 % RH and atmospheric pressure (0 % CO₂). This provides moisture for the carbonation reactions and enhances CO₂ permeation. However, this cyclic method is so severe that the effect of mortar composition on the carbonation rate is suppressed. Further investigations with different times and pressures for the alternating cycles will be carried out.
- ♣ The present investigations with exposure at constant pressure as well as the observations in the literature indicates that there is an optimum pressure to accelerate carbonation between atmospheric pressure and 5 bar. Further investigations will be carried out in order to define this optimal pressure value.

5 Acknowledgements

The financial support of the German Research Foundation (DFG) is gratefully acknowledged.

References

- [1] Verbeck, G.: Carbonation of Hydrated Portland Cement, Res. Dep. Bulletin RX087, Portland Cement Association, 1958
- [2] Pihlajavaara, S. E.: Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement past, Mat. Struc. 1 (6) (1968) 521–526
- [3] Papadakis, V.G.; Vayenas, C. G; Fardis, M.N.: Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation, ACI Mat. J. (1991) 363-373
- [4] Glasser, F.P.; Matschei, T.: Interactions between Portland cement and carbon dioxide, in: 12th International Congress on the Chemistry of Cement, Montreal (2007) TH3-13.14
- [5] Knöfel, D.; Wang, J.F.: Die Carbonatisierung der Schnellzemente und die Bildung der drei CaCO₃-Modifikationen Calcit, Vaterit und Aragonit, Z. Hochsch. Archit. Bauw. Weimar, 39 (1993) 225-229
- [6] Sauman, Z.: Carbonization of porous concrete and its main binding components, Cem. Concr. Res., 1 (1971) 645-662

- [7] Borges, P.H.R.; Costa, J.O.; Milestone, N.B.; Lynsdale, C.J.; Streatfield, R.E.: Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS, *Cem. Concr. Res.*, 40 (2010) 284-292
- [8] Morandea, A.; Thiery, M.; Dangla, P.: Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties, *Cem. Concr. Res.*, 56 (2014) 153 – 170
- [9] Hunkeler, F.: Anforderungen an der Karbonatisierungswiderstand von Betonen. Forschungsbericht (2012). Available: <http://www.mobilityplatform.ch>
- [10] Visser, J.H.M.: Influence of the carbon dioxide concentration on the resistance to carbonation of concrete, (2013) *Cons. Build. Mat.*
- [11] Hyvert, N.: Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton, thèse de l'université de Toulouse, 2009
- [12] Castellote, M.; Fernandez, L.; Andrade, C.; Alonso, C.: Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations, *Mat. Struc.*, 42, (2009) 515-525
- [13] Young, J.F., Berger, R.L.; Breese, J.: Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂ *J. Am. Ceram. Soc.*, 57 (1974) 394-397
- [14] Gräf, H. Grube, H.: Einfluß der Zusammensetzung und der Nachbehandlung des Betons auf seine Gasdurchlässigkeit, *Beton*, 36 (1986) 426-429 and 473-476
- [15] Wang, B.; Faure, P.; Thiéry, M.; Baroghel-Bouny, V.: ¹H NMR relaxometry as an indicator of setting and water depletion during cement hydration, *Cem. Concr. Res.*, 45 (2013) 1-14
- [16] Casanova F, Perlo J, Blümich B, (editors.): 'Single-sided NMR'. Springer, 2011
- [17] Milachowski, C.; Lowke, D., Gehlen, C.: Detection of Transport Processes during Freeze-Thaw Deicing Salt Attack using Single-Sided NMR, *Proc.2nd Int. conf. on Microdurability*, Amsterdam, 2012
- [18] Meiboom, S. Gill, D.: Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times, *Rev. Sci. Instrum.* 29 (1958) 688–691

11.3 Efficiency of materials used for repair measures of concrete structures exposed to chlorides

A. Rahimi, C. Gehlen, T. Reschke & A. Westendarp

Abstract

This paper deals with the performance of cement-based repair materials with respect to their chloride penetration resistance. Results of current laboratory investigations are presented, comparing the development of the chloride diffusion resistance of several PCC (Polymer modified Cement Concrete) and SPCC (Sprayed Polymer modified Cement Concrete) materials over time. The results of the laboratory tests Rapid Chloride Migration (RCM) and unidirectional diffusion are used to develop a methodology for assessing the performance of repair materials with respect to their chloride penetration resistance.

1. Introduction

In saline exposure conditions such as marine environments, chloride-induced corrosion is the main problem with respect to the durability of reinforced concrete structures. Reinforcement corrosion 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.

A traditional and feasible repair measure is the application of cement-based repair mortars or concretes to repassivate the rebars. Depending on the depth of chloride penetration and the chloride concentration in the structural element, the concrete cover is removed either partially or completely, as are deeper areas behind the reinforcement if necessary, and replaced with repair material. The repairs can cover large areas or be limited to selected points.

The repaired areas have to meet requirements concerning loadbearing capacity, durability and adhesion to the existing concrete. For assessing the durability concerning chloride-induced corrosion the time- and depth-dependent chloride concentration in the repaired layer can be estimated by means of mathematical models in the same way as for concrete components (cf. section 2). For this purpose, however, the relevant characteristic values of the materials are first to be ascertained.

Cement-based repair materials are usually polymer-modified mixes, the composition of which is generally not disclosed by the manufacturers. The long-term behaviour of these relatively recently developed materials has not yet been investigated. The unknown composition on the one hand and the lack of experience concerning the effect of the polymers on the chloride penetration resistance and, above all on their long-term behaviour on the other make it more difficult to estimate the performance of such repair materials.

This paper presents and discusses the results of current laboratory investigations into the chloride penetration resistance of six different repair materials. Observations from Rapid Chloride Migration (RCM) tests and unidirectional diffusion tests, which are both performed in the laboratory, are used to develop a methodology for assessing the performance of repair materials with respect to their chloride penetration resistance. The composition of the materials and its influence on the results of the laboratory tests are not taken into account here.

2. Modelling the chloride penetration in concrete

Mathematical models are used to estimate the initiation period of the corrosion by calculating the penetration of chlorides into concrete as a function of time and depth. A widely used formula is based on Fick's second law of diffusion, as diffusion is the most active mechanism in chloride transport in concrete. Equation (1) constitutes the mathematical description of chloride penetration in uncracked concrete used in „*fib* Model Code for service life design“ *fib* bulletin 34 (2006), „*fib* Model Code for concrete structures“ *fib* MC (2010) and ISO 16204 (2012).

$$C(x, t) = C_0 + (C_{S,0} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \right] \quad (1)$$

where C_0 is the initial chloride content (wt.-%/c), $C_{S,0}$ is the chloride content at the surface (wt.-%/c), erf stands for error function, x is the depth with a corresponding content of chlorides $C(x, t)$ (mm), t is the time (years) and $D_{app}(t)$ is the apparent chloride diffusion coefficient at time t (m²/s).

It can be concluded that the rate at which chlorides penetrate concrete is governed by the diffusivity of the concrete (material) and the concentration of the chloride load (environment).

Two common approaches are used to determine $D_{app}(t)$:

Approach A: in this approach, used in *fib* bulletin 34 (2006), *fib* MC (2010) and ISO 16204 (2012), $D_{app}(t)$ is determined by means of equation (2).

$$D_{app}(t) = D_{app}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \quad (2)$$

where $D_{app}(t_0)$ is the apparent chloride diffusion coefficient at a reference time t_0 (s) deriving by means of an inverse analysis from measured chloride profiles (see figure 3 in section 4) from existing structures or laboratory diffusion tests, α is the ageing exponent giving the decrease over time of the apparent chloride diffusion coefficient (–).

The ageing exponent is both material- and exposure-dependent and cannot be determined by laboratory tests alone. In order to determine the ageing exponent, D_{app} values in at least two different points in time are required. However, for a realistic determination of the ageing exponent, the long-term behaviour of D_{app} for existing structures has to be considered.

The higher the ageing exponent is, the more and faster D_{app} decreases in time, i.e. it is more favourable for concrete durability. In *fib* MC (2010) and ISO 16204 (2012) expected values of 0.2 to 0.8 are given for the ageing exponent, depending on the type of binder and the micro environmental conditions.

Approach B: in this approach, used in *fib* bulletin 34 (2006) and *fib* MC (2010), $D_{app}(t)$ is determined by means of equation (3).

$$D_{app}(t) = k_e \cdot D_{RCM}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \quad (3)$$

where $D_{RCM}(t_0)$ is the chloride migration coefficient at the reference point of time (m^2/s), t_0 is the reference point of time (s), α is the ageing exponent (–) and k_e is the environmental variable (–) and is determined by means of equation (4).

$$k_e = \exp \left(b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right) \quad (4)$$

where b_e is the temperature coefficient (K), T_{ref} is the reference temperature (for laboratory tests) (K) and T_{real} is the temperature of the structural element or the ambient air (K).

$D_{RCM}(t_0)$ is simply determined by the rapid chloride migration (RCM) test method (NT Build 492 1999, BAW Code of Practice MCL 2012) and substitutes in this approach the parameter $D_{app}(t_0)$ which is to be determined by means of costly diffusion tests or analysing the chloride profiles from existing structures.

The ageing exponent α used in approach B is derived by considering the $D_{RCM}(t_0)$. This results often in a lower ageing exponent compared to approach A since D_{RCM} of most concretes is lower than D_{app} at early ages (see below and figure 1).

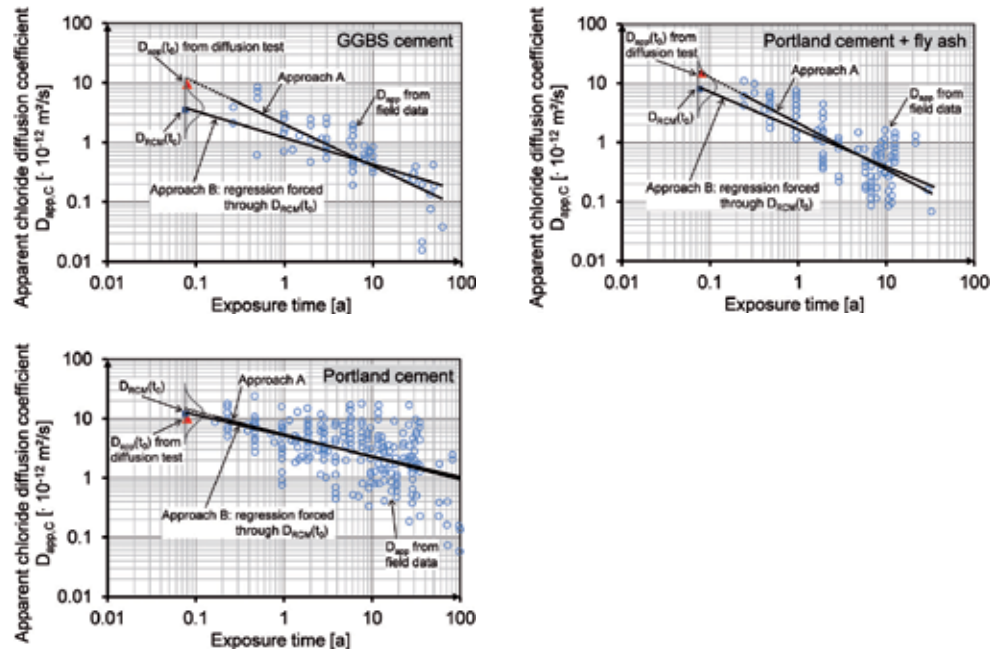
Although the ageing exponent is dependent on the exposure conditions, binders have characteristic ageing exponents. The ageing exponents of concretes with the three main types of binder Portland cement (CEM I), Portland fly ash cement (CEM I + FA ($f \geq 0.20$ -c)) and ground-granulated blast-furnace slag cement (CEM III/B) have been quantified statistically in Gehlen (2000). For this purpose, published chloride profiling data ($D_{app}(t)$) of existing concrete structures (field data) with each binder type ($0.40 \leq w/c \leq 0.60$) exposed in conditions submerged / splash / tidal were collected and plotted vs. exposure time. A first regression analysis was performed giving the ageing exponent via considering only the field data (approach A). In a further step, new concrete mixes with the same binder type and of comparable quality were tested in the laboratory by the RCM method at a reference age of $t_0=28$ d. The spread of the RCM test results at the age t_0 was determined; the mean value was added into the diagram of published results. The previously calculated regression line was forced (boundary) through the data of new concretes (RCM results). This regression line introduces the new ageing exponent (approach B) which is lower than the first one.

This procedure is depicted in figure 1 for concretes with the three main types of binder mentioned above. It can clearly be seen that the difference between the regression lines for the GGBS cement-concretes is higher than for the other two cases. For Portland cement-concretes the lines are almost superposed. The regression lines meet in all three cases in a time of about 10 years.

Table 1 shows the ageing exponents thus calculated in Gehlen (2000). Since the field data used for Portland cement-concretes are very scattered, being on the safe side, an ageing exponent of 0.30 is assumed which is lightly lower than the calculated value of ca. 0.35 by the regression analysis (approach B).

Results of current unidirectional diffusion (inversion) tests ($t=28$ d exposure after 28 d curing) on comparable concretes are added into the diagrams in figure 1 (triangular points). These match very well to the regression lines, which means that they can be used as $D_{app}(t_0)$ in order to apply the approach A for calculating the $D_{app}(t)$.

Figure 1:
Development of the apparent chloride diffusion coefficient D_{app} over time for concrete with GGBS cement, Portland cement with fly ash and Portland cement from Gehlen (2000).
Approach A: regression analysis on D_{app} from field data.
Approach B: regression analysis on D_{app} from field data and forced through the chloride migration coefficient $D_{RCM}(t_0)$ from laboratory RCM test.
Triangular points: $D_{app}(t_0)$ from own diffusion tests.



In figure 1 it can be seen that after the regression lines meet (ca. 10 years) the $D_{app}(t)$ derived by approach A is lower (more favourable) than the ones by approach B. In section 6.2 it will be illustrated by means of a reliability analysis, how far this difference affects the prediction of the service life.

The introduced model is applied for probabilistic service life design of concrete structures. The model and the input parameters are described in detail in *fib* bulletin 34 (2006) and Gehlen (2000).

Table 1.
Ageing exponents calculated in Gehlen (2000)

type of binder	ageing exponent [–]	
	approach B ¹⁾	approach A ²⁾
CEM III	$\beta D (0.45 / 0.20 / 0.0 / 1.0)$	0.70
CEM I + FA	$\beta D (0.60 / 0.15 / 0.0 / 1.0)$	0.78
CEM I	$\beta D (0.30 / 0.12 / 0.0 / 1.0)$	0.38

¹⁾ βD : Beta Distribution (mean value/standard deviation/lower boundary/upper boundary)

²⁾ mean values

3. Laboratory investigations

3.1 Materials and specimen preparation

Six different commercially available repair materials were selected for the investigations. They are hydraulically hardening, polymer-modified cement mixes, four of which were dry

sprayed concretes (SPCC: Sprayed Polymer Cement Concrete) and two were pre-mixed dry mortars (PCC: Polymer Cement Concrete). The SPCC materials contained aggregates with a maximum particle size between 4 mm and 8 mm, while the PCC materials had a maximum particle size of 2 mm. No further information on the raw materials or the composition of the repair materials was available; such information is not disclosed by the manufacturers.

After adding water in accordance with the manufacturer's instructions, the repair materials were used to make slabs with the dimensions 300 x 300 x 80 mm³. The dimensions of the specimens for the determination of the chloride migration coefficients of repair materials were selected in accordance with the BAW Code of Practice MCL "Resistance of Concrete to Chloride Penetration" (2012). After preparation, the slabs were left in the moulds for a day and protected against drying out. After removal from the moulds and depending on which test was being performed, the specimens were either immersed in water for 6 days at 20 °C and subsequently stored at 20 °C / 65% RH (tests on hardened concrete, e.g. compressive strength) or immersed in water at 20 °C until testing (RCM and diffusion tests). In the case of the SPCC materials, large slabs (1000 x 1000 x 80 mm³) were first made using the dry-spraying method. Smaller slabs with the dimensions 300 x 300 x 80 mm³ were then cut out of the large slabs (at an age of 7 days).

Table 1 shows the material characteristics bulk density, compressive strength and porosity of the prepared slabs. The specimens required for these tests were taken from the slabs. The density and compressive strength were determined using drill cores with a diameter of 50 mm and a length of 50 mm at an age of 28 d. To determine the porosity, discs with a diameter of 100 mm and a thickness of 30 mm were prepared and immersed in water at a pressure of 150 bars for 24 h (based on Bunke 1991).

The density and porosity of the specimens determined in the tests are comparable with those of common normal-weight concretes. The materials exhibit compressive strength classes between C30/37 and C50/60.

repair material	density	compressive strength	porosity (150 bar)
[–]	[kg/m ³]	[N/mm ²]	[% of vol.]
SPCC 1	2280	65.2	15.0
SPCC 2	2220	70.5	16.5
SPCC 3	2210	62.8	18.6
SPCC 4	2170	46.4	20.7
PCC I	2080	68.9	25.2
PCC II	2220	55.0	14.5

Table 2.
Investigated repair materials

3.2 Test methods

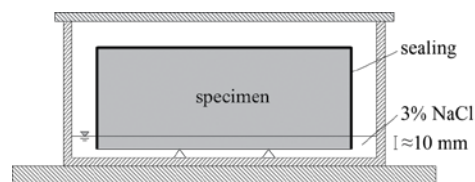
Rapid Chloride Migration tests (RCM) and unidirectional diffusion tests (exposure method: inversion) were used in the laboratory investigations.

The RCM tests were performed in accordance with the BAW Code of Practice MCL “Resistance of Concrete to Chloride Penetration” (2012). The MCL is a German code published by the Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW). The RCM test performed as specified in the MCL is very similar to the RCM test method according to NT Build 492 (1999). The main difference between the two tests is the test voltage and the resulting test duration. While the specimens are subjected to a voltage of 30 V during the RCM test according to the MCL, the test voltage used in the RCM test according to NT Build 492 ranges from 10 V to 60 V (depending on the current measured initially). The chloride migration coefficients D_{RCM} determined as specified in the MCL are generally lower than those determined according to NT Build 492 (e.g. Gulikers 2011). This is probably due to the rise in the temperature of the specimens owing to the high voltages used in the test according to NT Build 492 which accelerates the migration of ions (Joule effect).

The RCM tests were performed on the specimens at the ages of around 28 d, 56 d, 90 d, 180 d and 365 d. The specimens were kept immersed in water until testing (cf. section 2.1). The electrolyte resistance of the specimens was also determined in the RCM tests. This was done by means of the Two Electrode Method (TEM) directly before the specimens were installed in the RCM measuring cells.

The unidirectional diffusion tests were based on CEN/TS 12390-11 (2010). As exposure method „inversion“ was chosen. A slab of each repair material was removed from the water bath at an age of 28 d. With the exception of the surface to be tested, five surfaces were sealed by coating them with epoxy resin. The slabs were stored at 20 °C / 65% RH for one day to allow the resin to dry. During that time, the surface to be tested was covered with a damp mat to reduce water loss. The sealed slabs were then stored under water in plastic containers with lids for 24 h prior to immersion in a 3% NaCl solution in order to minimise the uptake of chloride due to absorption. The slabs were placed on spacers with a height of around 5 mm. The containers were filled with the NaCl solution up to around 10 mm above the bottom of the slabs. The solution was occasionally topped up during the storage period to maintain it at a constant level.

Figure 2:
Diffusion test setup (inversion)



The slabs were first cut down to 200 x 200 mm² to enable them to be placed in the containers. The test setup is shown in figure 2.

Samples of concrete dust were taken by drilling at depth intervals of 5 mm at three points on each slab at the specified times of around 28 d, 90 d, 180 d and 365 d after the beginning of the storage period. The overall chloride content of the dust samples was determined photometrically and by chemical analysis.

The laboratory tests and specimens prepared from the base slabs (300 x 300 x 80 mm²) are shown in table 3.

test	specimen	time [d]
density	ϕ/L : 50/50 mm	28
compressive strength		28
porosity	ϕ/L : 100/30 mm	28
RCM	ϕ/L : 100/50 mm	28, 56, 90, 180, 365
Ponding	200 x 200 x 80 mm ³	28, 90, 180, 365 *

* time from beginning the ponding test at specimen's age of 28 d

4. Results

The chloride profiles determined up to a depth of 30 mm in the diffusion tests are shown in figure 4. The apparent chloride diffusion coefficients D_{app} were calculated from the chloride profiles and by performing a regression analysis. To do so, the relationship shown in equation (1) was fitted into the chloride depth profile obtained in the diffusion tests by minimising the squared errors. The output parameters of the regression are the surface chloride concentration $C_{s,0}$ and D_{app} . Figure 3 shows the chloride profile and the value of D_{app} thus determined for SPCC 2 in the diffusion test after 90 d by way of an example.

The diagrams in figure 5 show the values of the chloride migration coefficient D_{RCM} , apparent chloride diffusion coefficient D_{app} and specific electrolyte resistance ρ over time, evaluated on the basis of the results of the RCM and diffusion tests. The graphs for D_{RCM} and D_{app} were plotted by logarithmic scaling of the two axes (log-log).

The results for the development of the measured material parameters over time and their correlations as well as the assessment of the chloride penetration resistance of the repair materials under investigation are discussed below.

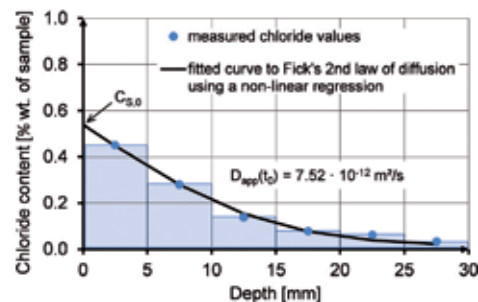


Figure 3:
Appraisal the apparent chloride diffusion coefficient by regression analysis (SPCC 2 after 90 d diffusion test)

5. Discussion

5.1 Chloride profiles

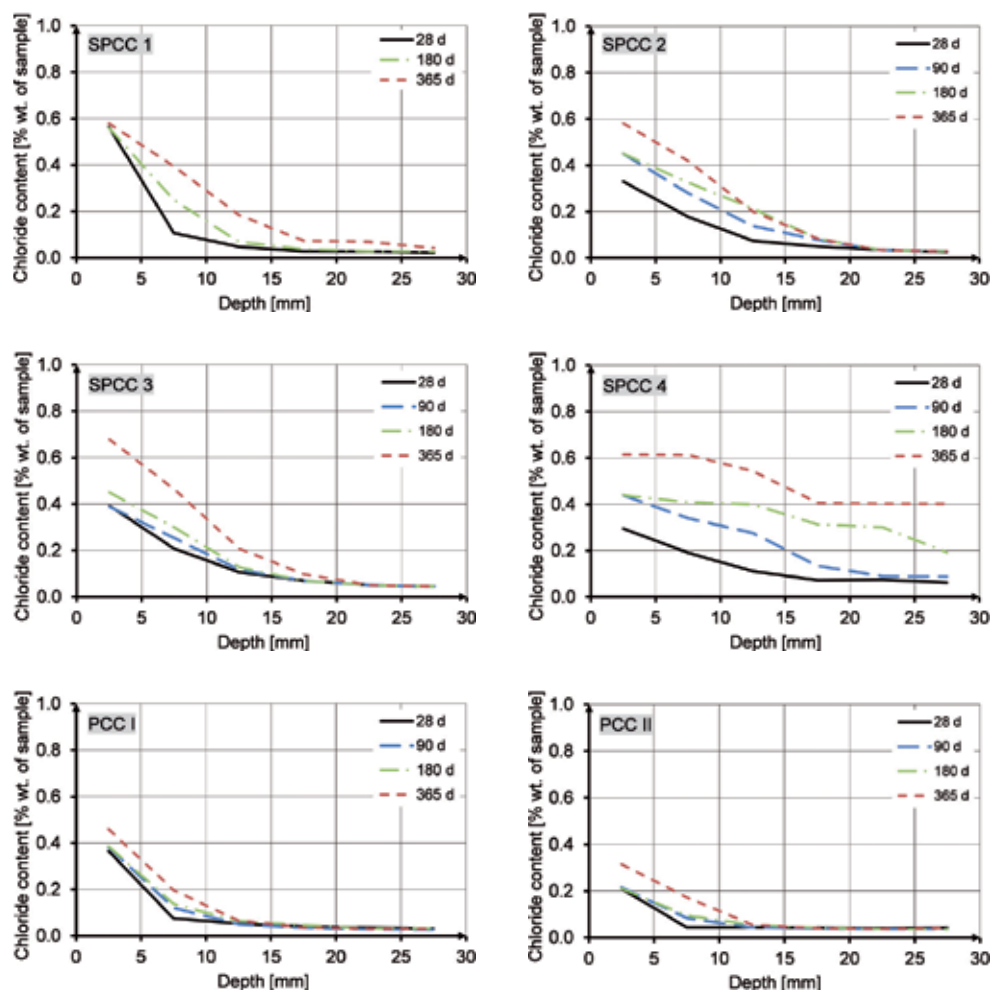
The chloride profiles determined after inversion of the specimens in a 3% NaCl solution for 28, 90, 180 and 365 days in the diffusion tests showed a continuous increase in the chloride content of the specimens (figure 4). The depth-dependent development of the chloride content can be modelled very well with the error function solution of Fick's second law of diffusion (equation 1) for all specimens (e.g. SPCC 2 after 90 d, cf. figure 2) with the exception of SPCC 4. The SPCC 4 specimen had a far higher chloride concentration at lower depths than the other specimens. The two PCC specimens had the lowest chloride contents, while the chloride contents for the SPCC 1, 2 and 3 specimens were similar.

The chloride contents determined on the surface of the specimens (down to a depth of 5 mm) developed differently over time. While the surface chloride concentration in the SPCC 2, 3 and 4 specimens increased over time, it was either constant or increased only slightly

for the SPCC 1 specimen and the two PCC specimens. However, it must be noted that the surface chloride concentration is subject to relatively large inaccuracies. Possible causes of this are variations in the chloride content on the surface of the specimens if they are removed from the solution for a relatively long period of time or the build-up of salt crystals on the surface of the specimens.

The initial chloride content of the specimens was measured and varied between 0.01 and 0.03 % wt. of sample.

Figure 4:
Chloride profiles derived from
the specimens in diffusion
tests



5.2 Development of apparent chloride diffusion coefficient D_{app} over time

A reduction in the apparent chloride diffusion coefficient D_{app} over time can be expected owing to the continuing hydration of the binder, which increases the density of the microstructure. This tendency can be seen in all specimens (cf. figure 5) but varies a great deal. The development of D_{app} over time is shown in the log-log diagrams in figure 5 by means of a regression line. The regression function (power: $y=a \cdot x^b$) and the coefficient of determination (R^2) are also given. The exponent of the regression function (b) corres-

ponds in this case to the ageing exponent α in equation (2) (approach A). However, it was explained in section 2 that the ageing exponent is dependent both on the material and the environment and is derived by assessing the chloride profiles obtained in the structural investigations. The ageing exponent calculated in the diffusion tests under continuous chloride exposure is only material-dependent and is used, in the first instance, to assess and compare the repair materials under investigation. Detailed considerations on this are carried out in section 6.1.

Here too, the behaviour of the SPCC 4 specimen differs from that of the other specimens. An ageing exponent could not be determined for this specimen (the coefficient of determination was too low: $R^2=0.06$, cf. figure 5). Ageing exponents between 0.34 (SPCC 1) and 0.90 (SPCC 3) with coefficients of determination between $R^2=0.83$ (SPCC 1) and $R^2=1.0$ (SPCC 3 and PCC I) were calculated for the other specimens. It should be considered that the gradual adjustment of the chloride content at the surface of the specimen to a constant value affects the thus calculated ageing exponent opportunely. The high ageing exponents calculated for SPCC 2 and SPCC 3 (0.83 and 0.90 respectively) were to some extent due to this effect.

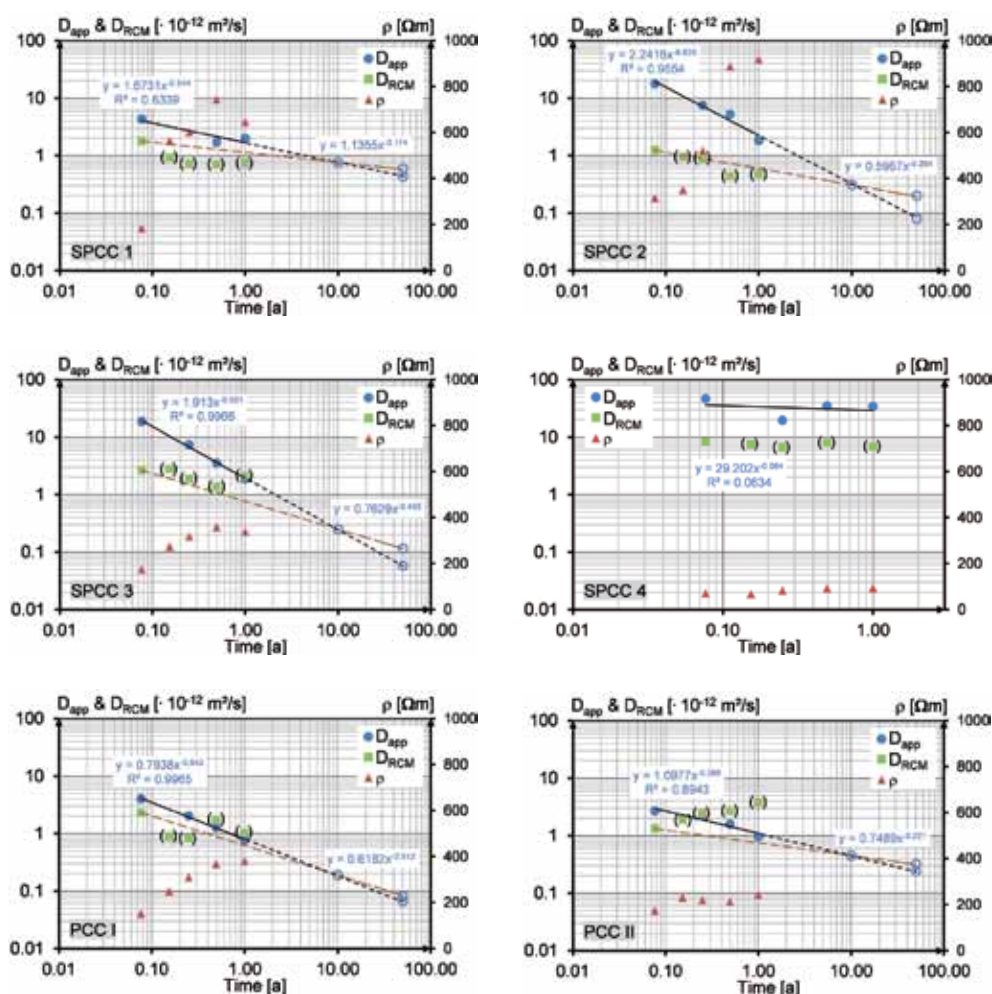


Figure 5:
Development of the parameters over time

5.3 Development of apparent chloride diffusion coefficient D_{app} over time

With the exception of SPCC 4, the values of D_{RCM} obtained in the RCM test at an age of 28 d ($t_0=28$ d) were far lower (more favourable) than for Portland cement concretes (approx. 9 - 25 m²/s depending on the w/c, Gehlen 2000) and in some cases lower than for GGBS cement concretes (approx. 1 - 4 m²/s depending on the w/c ratio, Gehlen 2000).

The RCM test is usually conducted on early age specimens ($28 \text{ d} \leq t_0 \leq 56 \text{ d}$) and the parameter $D_{RCM}(t_0)$ is used for the modelling the chloride transport as explained in section 2 (approach B). Commonly there is no need to apply the RCM test at later ages additionally, but in this work the development of D_{RCM} over time was considered as an attempt to find out more about the investigated repair materials. Therefore the points in figure 5 are put in brackets with the exception of $D_{RCM}(t_0=28 \text{ d})$.

As observed for the parameter D_{app} , a reduction in the chloride migration coefficient D_{RCM} over time owing to the increase in the density of the microstructure as a result of the continuing hydration of the binder can be expected. However, it can be seen in the graphs in figure 5 that this tendency is far less pronounced than for D_{app} and that D_{RCM} even increases continuously for PCC II.

In the literature, it is mostly assumed that there will be a reduction in D_{RCM} over time in concretes. Lay (2006) observed the development of D_{RCM} over time for concretes made with different types of binder (CEM I, CEM II/A-LL, CEM II-B/T, CEM II/B-S, CEM I + FA, CEM III/A and CEM III/B) over a period of around two years. A clear and pronounced reduction in D_{RCM} over time was identified for concretes containing fly ash, followed by CEM III concretes. This reduction was considerably less for concretes made with Portland cement (CEM I) and CEM II/A-LL. The development of D_{RCM} over time was formulated mathematically in Lay (2006).

Data from several sources in the literature demonstrate that the behaviour of CEM I concretes is inconsistent as regards the development of D_{RCM} over time (e.g. Yu et al. 2013, Maage et al. 1996, Tang 1996). According to these sources, D_{RCM} usually increases after decreasing initially. This effect was observed for higher w/c ratios in particular. An increase in D_{RCM} after curing (immersion in water) for around 180 days was observed for three Portland cement concretes with w/c ratios of 0.4, 0.5 and 0.6 respectively in Yu et al. (2013). After more detailed investigations, the authors surmised that the increase in D_{RCM} may be caused by a transformation from low density CSH phases to high density CSH phases at more advanced concrete ages, resulting in a shift in the pore size distribution towards the coarser range (Yu et al. 2013). Further investigations are needed to explain this phenomenon.

The accelerated test method RCM test was developed in order to avoid the long test periods involved in the diffusion test. The RCM test has proven useful for evaluating concretes as the test period is short, the method is easy to use, not susceptible to error and has a sufficiently high degree of precision. A great deal of the data in the literature indicates that there is a good correlation between D_{RCM} and D_{app} for concrete at an early age (Gehlen 2000, Gehlen & Ludwig 1999, Frederikson et al. 1996, Tang et al. 2010). This applies to Portland cement concretes in particular. However, a comparison between the values of D_{RCM} and D_{app} determined for the repair materials under investigation clearly shows that, with only a few exceptions, the D_{RCM} values are lower than the D_{app} values (cf. figure 5). The difference is considerable for the SPCC materials while the D_{RCM} and D_{app} values of the two PCC materi-

als are similar in magnitude. It should be considered that the regarding time in RCM test is the curing time (specimen age) and in diffusion test it is the exposure period.

5.4 Specific electrolyte resistance ρ

The specific electrolyte resistance ρ [Ωm] is determined from the electrolyte resistance [Ω] measured by the Two Electrode Method (TEM), taking account of the dimensions of the specimens (factor: cross-sectional area [m^2] / height [m]).

The specific electrolyte resistances ρ thus obtained tended to increase over time (cf. figure 5). This trend and the values of ρ were different for all six materials. A more or less constant value, which was extremely low compared with other materials, was obtained for SPCC 4 at each testing time. A low value of ρ , which increased slightly over time, was also obtained for PCC II.

The results showed a relatively good correlation between ρ and D_{RCM} , both in magnitude and development over time (cf. figure 6).

A good functional relationship between ρ and D_{RCM} was also observed for concretes by several authors (e.g. Gehlen & Ludwig 1999, Bamforth 1997). The specific electrolyte resistance ρ is usually measured in the RCM tests by way of an additional check and is determined by means of the Two Electrode Method (TEM) as this test is straightforward and involves little effort.

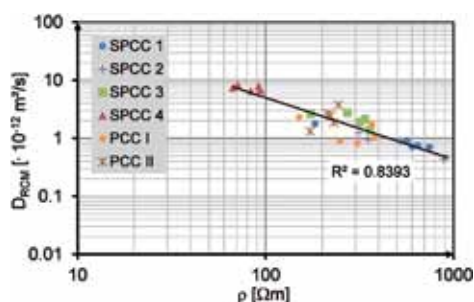


Figure 6:
Correlation between D_{RCM}
and ρ

6. Assessment of the efficiency of repair materials

It is very important to be able to evaluate the performance of repair materials correctly by conducting the appropriate investigations and by means of an appropriate methodology as the necessary experience with such materials is lacking, both in the laboratory and in practice, and the manufacturers do not disclose the composition of the materials.

In this section, the efficiency of the investigated repair materials is assessed (i) by comparing the parameters derived from the laboratory investigations and (ii) by means of reliability analysis used for predicting the service life.

The repair material SPCC 4 had a different behaviour than the other materials under investigation and its chloride resistance was deficient comparatively, as already observed, hence it is not included in the following executions.

6.1 Assessing by comparing the derived parameters from the laboratory investigations

As explained in section 2, the material resistance is taken into account by means of two parameters, $D_{app}(t_0)$ or $D_{RCM}(t_0)$ (approach A and B respectively) and the ageing exponent α , when modelling the time- and depth-dependent chloride penetration into the concrete. The calculated ageing exponents according to approach A (cf. section 2) are already discussed in section 5.2. In order to derive the ageing exponent according to approach B, the

following procedure is undertaken. The D_{app} at the time of 10 years is determined by extending the regression line of the data from the diffusion test. The exponent of the line through the two points $D_{RCM}(t_0=28d)$ and $D_{app}(t=10a)$ is taken as the ageing exponent according to approach B. The $D_{app}(t=10a)$ is applied here in analogy with the concrete samples in figure 1, wherein the regression lines of approaches A and B meet at a time of about 10 years. The calculated ageing exponents according to approach B are considerably lower than the ones according to approach A (from 0.17 for SPCC 1 to 0.51 for PC I).

Table 4.
Comparison of the investigated repair materials by means of the derived parameters

Parameter	order: best -> worst
$D_{RCM}(t_0)$ [m ² /s]	SPCC 2 ≈ PCC II, SPCC 1, PCC I, SPCC 3
$D_{app}(t_0)$ [m ² /s]	PCC II, PCC I ≈ SPCC 1, SPCC 2 ≈ SPCC 3
$D_{app,A}(50a)$ ¹⁾ [m ² /s]	SPCC 3, PCC I, SPCC 2, PCC II, SPCC 1
$D_{app,B}(50a)$ ¹⁾ [m ² /s]	PCC I, SPCC 3, SPCC 2, PCC II, SPCC 1
C_{cum} ²⁾ [wt.-%/mm ²]	PCC II, PCC I, SPCC 1, SPCC 2, SPCC 3

¹⁾ predicted D_{app} after 50 years' exposure according to approach A and B respectively

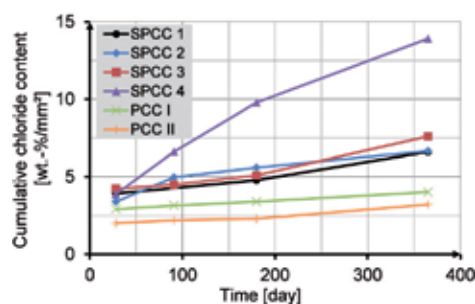
²⁾ cumulative chloride content in the first 30 mm of specimens after 1 year ponding test (cf. figure 8)

The six repair materials under investigation are assessed in table 4 as a function of the parameters $D_{RCM}(t_0)$ and $D_{app}(t_0)$ determined in the RCM and diffusion tests as well as the predicted parameter $D_{app}(50a)$ according to both approaches A and B.

The values determined for parameters $D_{app}(t_0)$ and $D_{RCM}(t_0)$ lead to different assessments of the materials. The difference in ageing exponent of the materials leads to a different evaluation regarding the predicted $D_{app}(50a)$. The calculated $D_{app}(50a)$ according to both approaches provide almost the same evaluation, which approve the materials PCC 3 and PCC I as the best choices.

A further parameter in table 4 is the cumulative chloride content C_{cum} in the first 30 mm depth of the specimens after inversion of the specimens in a 3% NaCl solution for a period of one year during the diffusion tests. The assessment of the materials in accordance with this parameter is the same as for $D_{app}(t_0)$. The development of C_{cum} over time is shown in figure 7.

Figure 7:
Development of cumulative chloride content in the first 30 mm depth of specimens over time (up to 365 d)



6.2 Assessing with respect to reliability-based service life

The previous analyses (section 6.1) regarding the efficiency of the repair materials were deterministic considerations. In fact, the parameters regarding material resistance as well as action are uncertain quantities. They are therefore to be introduced as random variables. A probabilistic analysis can be conducted by contrasting these variables in a limit state function in order to assess a reliability-based service life of structures.

In this context, reliability analyses were done based on the probabilistic service life design concept in *fib* bulletin 34 (2006). The derived parameters from the laboratory investigations ($D_{app}(t_0)$, $D_{RCM}(t_0)$, α) were converted to stochastic variables which demonstrate along with freely chosen construction parameters (cover thickness) the material resistances; as action an arbitrary environmental load was chosen.

Figure 8 shows, by way of an example, the development of the reliability index over time calculated for the Materials PCC I and SPCC 2 with the derived parameters according to both approaches A and B. In the case of PCC I, which has relatively similar regression lines according to approach A and B (cf. figure 5), the curves run close to each other. The curves meet at a time of 100 years and before that the curve of approach A lies under the one of approach B which means that approach A would lead to more conservative estimation (on the safe side). By contrast to PCC I, the reliability indices for SPCC 2 are in both magnitude and development significantly different, which matches to its considerable different regression lines (cf. figure 5). In the case of SPCC 2 the curve of approach B starts with higher values than the one of approach A and met it after about 55 years. The curve of approach A exhibits a very slow gradient after about 20 years which is consistent to the high ageing exponent of 0.84. Considering the service life of structures within the first 55 years, which is a plausible expected service life, the approach A would be again on the safe side.

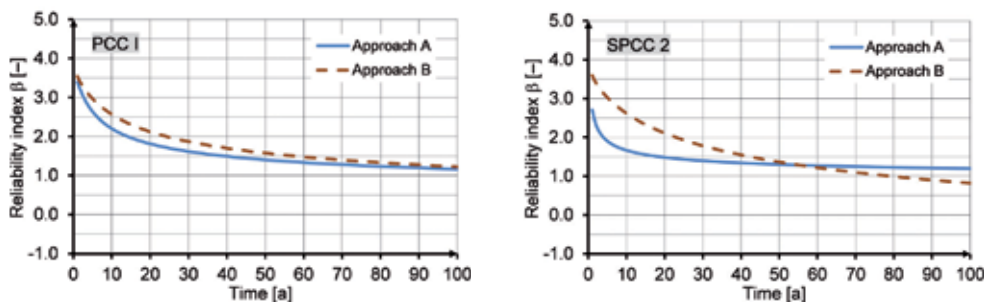


Figure 8:
Development of reliability index over time for an exemplary structural element made of PCC I (top) and SPCC 2 (bottom) in a defined exposure condition

SPCC 3, which also has a high ageing exponent according to approach A (0.90), exhibits a similar behaviour of reliability run as SPCC 2. The reliability runs of SPCC 1 and PCC II are similar. The curves of approaches A and B run close to each other and meet after around 25 years in case of SPCC 1 and 10 years in case of PCC II.

Table 5 shows the assessment of the repaired materials under investigation by means of the thus conducted reliability analyses. The parameters $\beta_A(50a)$ and $\beta_B(50a)$ lead to an almost identical assessment which is the same evaluation of the investigated materials like the parameter $D_{app}(50a)$ according to both approaches A and B in table 4.

Considering a realistic service life of repaired structural elements of less than 50 years, estimating the service life with the approach A would be on the safe side. For a final evaluation the results of further investigations remain to be seen.

Parameter ¹⁾	order: best -> worst
$\beta_{App.A}(50a)$ [-]	PCC I, PCC II, SPCC 3, SPCC 2, SPCC 1
$\beta_{App.B}(50a)$ [-]	PCC I, SPCC 3 $\approx$ SPCC 2, PCC II, SPCC 1

¹⁾ predicted reliability index after 50 years exposure ; analysis by means of parameters derived according to approach A and approach B respectively

Table 5.
Reliability-based assessment of the investigated repair materials

7. Conclusion and outlook

To sum up, the results of the laboratory tests conducted on the six selected repair materials enable the following conclusions to be drawn:

- With the exception of SPCC 4, it was possible to model the depth-dependent development of the chloride content in diffusion tests very well with the error function solution of Fick's second law of diffusion for all materials.
- The materials (with the exception of SPCC 4) had, all in all, a very good chloride penetration resistance compared with conventional concretes.
- The chloride migration coefficients D_{RCM} determined in RCM tests were far below the apparent chloride diffusion coefficients D_{app} determined in diffusion tests.

Two approaches are introduced and compared for assessing the performance of repair materials with respect to their chloride penetration resistance.

The laboratory investigations are being performed over a period of at least two years and the next tests are scheduled to take place in 1.5 years' and 2 years' time. The next step is to investigate the constituents and composition of the materials to enable the results to be understood. For a final evaluation the results of further investigations remain to be seen.

Repair materials need to be investigated under actual conditions in practice, not only in the laboratory, in order for their performance to be assessed. Exposure tests with large specimens comprising different repair materials have been conducted since 1991 (23 years) (Rößler et al. 2009). The first results were obtained by performing tests after 3 and 6 years' exposure (Rößler et al. 2009) as well as after 21 years' exposure (Rahimi et al. 2014).

References

- Bamforth, P.B. 1997. Corrosion of Reinforcement in Concrete Caused by Wetting and Drying Cycles in Chloride - Containing Environments. Middlesex : Taywood Engineering Ltd, 1997. - BSI Supported Project PBB/BM 1746.
- BAW Code of Practice MCL "Resistance of Concrete to Chloride Penetration" 2012.
- Bunke, N. 1991. Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Berlin: Beuth.
- CEN/TS 12390-11 (2010). Testing hardened concrete – Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion.
- fib* bulletin 34 (2006). Model Code for Service Life Design, prepared by *fib* Task Group 5.6.
- fib* MC (2010). Model Code for concrete structures.
- Frederikson J.M., Sørensen H.E., Andersen A., Klinhoffer O. 1996. The Effect of Water/Cement Ration on Chloride Transport into Concrete – Immersion, Migration and Resistivity Tests. Copenhagen, Danish Road Directorate, Report No 54 1996.
- Gehlen C., Ludwig H.M. 1999. Compliance Testing for Probabilistic Design Purposes. Brussels: European Union – Brite EuRam, 1999. - Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R8.
- Gehlen C. 2000. Probability-based service life design of reinforced concrete structures – Reliability studies for prevention of reinforcement corrosion. DAfStb Heft 510, Berlin, Beuth, 2000.
- Gulikers J. 2011. Analysis and evaluation of a European Round Robin Test on Rapid Chloride Migration. Report of Rijkswaterstaat Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Utrecht.

- ISO 16204:2012. Durability – Service life design of concrete structures.
- Lay S., Schießl P. 2006. Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahl-beton-konstruktionen. Forschungsbericht AiF/DBV-Nr. 12525/225, Technical University München (in German).
- Maage M., Helland S., Poulsen E., Vennesland Ø., Carlsen J.E. 1996. Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment. ACI MATERIALS JOURNAL. November-December 1996.
- NT Build 492 (1999). Nordtest method: Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments.
- Rahimi A., Gehlen C., Reschke T., Westendarp A. 2014. Approaches for Modelling the Residual Service Life of Marine Concrete Structures. International Journal of Corrosion. Volume 2014, Article ID 432472.
- Rößler G., Westendarp A., Dauberschmidt C., Meng B., Pierkes R., Schwamborn B., Wiens U. 2009. Instandsetzung von Meerwasserbauten, ibac-Forschungsbericht F647, (in German).
- Tang L. 1996. Chloride transport in concrete – measurement and prediction. Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Denmark.
- Tang L., Utgenannt P., Lindvall A., Boubitsas D. 2010. Validation of models and test methods for assessment of durability of concrete structures in road environment. Uppdragsrapport No. P802606, Lund, Sweden.
- Yu Z., Ye G., Hunger M., Noort v. R. 2013. Discussion of the evolution of the chloride coefficient of Portland cement concrete tested by rapid chloride migration (RCM) test at long-term curing periods up to 5 years. Proceedings of international conference Concrete under Sever Conditions – Environment and Loading (CONSEC13), September 2013, Nanjing, China.

11.4 Untersuchung von säuregelagerten Zementsteinproben mit LA ICP MS

S. Schwindl, M. Rommel, T. Gutberlet, R. E. Beddoe, H. Hilbig
Centrum Baustoffe und Materialprüfung, TU München

Einleitung

Frühere Arbeiten haben gezeigt, dass die korrodierte Schicht auf der Oberfläche von säurebeanspruchten Betonen einen entscheidenden Einfluss auf dessen Säurewiderstand hat /1/. Um den Einfluss von verschiedenen Zusatzstoffen auf die Zusammensetzung dieser korrodierten Schicht zu untersuchen, wurden 3 mm dicke Zementsteinscheiben unterschiedlicher Zusammensetzung in Säuren bei konstantem pH-Wert gelagert. Während die 28-tägige Lagerung in Salzsäure bei pH 2 bei allen Zusammensetzungen zu einer durchgehenden Zersetzung der Matrix führte /2/, zeigten die Scheiben nach pH 3 und pH 4 Lagerungen in Salzsäure sowie nach Lagerungen in Schwefelsäure bei allen drei pH-Werten nach dem Brechen in der Bruchfläche einen „optisch“ intakten Kern und verschiedene Schichtbildungen. Zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzungen der Schichten wurde die Laserablations-ICP-MS (LA-ICP-MS) eingesetzt, die es ermöglicht, orts aufgelöst Elementverteilungen zu ermitteln. In diesem Beitrag werden die Messmethode erläutert und die damit gewonnenen Ergebnisse vorgestellt.

Material und Methoden

Proben Präparation

Drei verschiedene Pasten wurden bei Wasser-Bindemittel-Werten von 0,4 hergestellt. Die Bindemittel bestanden aus a) reinem Portlandzement CEM I 42,5 R (PZ), b) CEM I 42,5 R mit 10 M.% Metakaolin (10MK) und c) CEM I 42,5 R mit 35 M.% Hüttensand (35HS). Die Details zur Herstellung der Probekörper und deren Säurebehandlung mit Salzsäure wurden bereits in /2/ beschrieben. Die Behandlung mit Schwefelsäure erfolgte in analoger Weise.

Proben Präparation

Drei verschiedene Pasten wurden bei Wasser-Bindemittel-Werten von 0,4 hergestellt. Die Bindemittel bestanden aus a) reinem Portlandzement CEM I 42,5 R (PZ), b) CEM I 42,5 R mit 10 M.% Metakaolin (10MK) und c) CEM I 42,5 R mit 35 M.% Hüttensand (35HS). Die Details zur Herstellung der Probekörper und deren Säurebehandlung mit Salzsäure wurden bereits in /2/ beschrieben. Die Behandlung mit Schwefelsäure erfolgte in analoger Weise.

LA-ICP-MS

Für jede Mischung und Säure wurde jeweils eine Scheibe 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. Abbildung 1 zeigt das anhand mehrerer Vorversuche optimierte Ablationsmuster, welches für die Analyse der Proben verwendet wurde. Die Auswertung der Daten erfolgte mit der Software Iolite 2.31, welche die Verarbeitung der großen Datenmengen in graphische Darstellungen der gemessenen Elementverteilungen mit frei wählbaren Farbskalen ermöglicht.

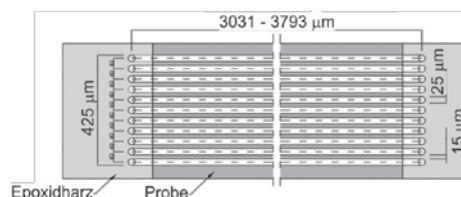


Abb. 1:
Verwendetes Ablationsmuster bestehend aus elf parallelen Linienscans mit 25 µm dicke und 15 µm Abstand.

Ergebnisse und Diskussion

Bei der Auswertung der gemessenen Daten waren teilweise deutliche Unterschiede der Signalintensitäten eines Elementes zwischen den einzelnen Proben auffällig. Da die Farbskalen in Iolite frei wählbar sind, kann die graphische Darstellung den Bedürfnissen angepasst werden. So kann wie in Abbildung 2 die Verteilung eines Elementes mit hoher Ortsauflösung durch Verwendung von elementspezifischen Skalen für jede einzelne Probe hervorgehoben werden. Dadurch können detaillierte Informationen über die Verteilung der Elemente über den Probenquerschnitt gewonnen werden.

Ein direkter qualitativer Vergleich unterschiedlicher Proben ist nur unter Berücksichtigung der Skalen möglich. Um dies zu vereinfachen wird in Abb. 3 eine probenübergreifende elementspezifische Skala gewählt. Diese orientiert sich an der Maximalintensität der zu vergleichenden Proben.

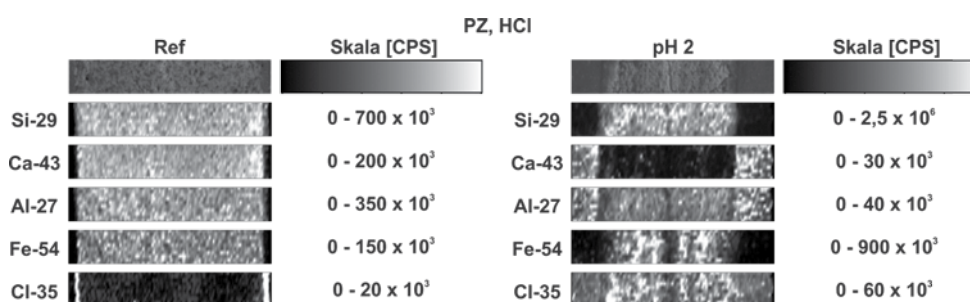


Abb. 2:
Vergleich von ausgewählten Elementverteilungen über den Querschnitt der PZ-Probe vor und nach HCl pH 2. Darüber die mit Auflicht-mikroskopie erhaltene Darstellung des ablatierten Probenbereichs. Skalen optimiert für element-spezifische hohe Ortsauflösung bei der Einzelprobe.

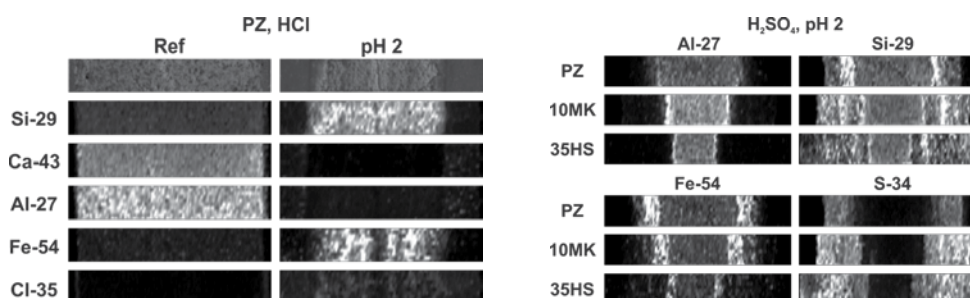


Abb. 3 links: Vergleich von ausgewählten Elementverteilungen über den Querschnitt der PZ-Probe vor und nach HCl pH 2. Darüber die mit Auflichtmikroskopie erhaltene Darstellung des ablatierten Probenbereichs. Rechts: Vergleich von ausgewählten Elementverteilungen über den Querschnitt der unterschiedlichen Mischungen nach H₂SO₄ pH 2. Skalen jeweils optimiert für element-spezifische Vergleichbarkeit der Einzelproben.

Auf diese Weise kann entweder die Elementverteilung von einer Probe bei verschiedenen pH Werten oder die Auswirkung eines pH Wertes auf diverse Mischungen betrachtet werden. Beide Möglichkeiten sind in Abbildung 3 gezeigt. Aufgrund des Säureangriffs und der damit verbundenen Gefügeschwächung ergaben sich innerhalb einer Probe unterschiedliche Ablationsvolumina. Für die Möglichkeit einer quantitativen Auswertung der Ergebnisse muss daher das ablatierte Volumen bekannt sein. Für qualitative Vergleiche bedeutet dies eine Beschränkung auf Elementverhältnisse.

Trotz allem eignet sich die Methode hervorragend für die Fragestellung. Es wurden zu erwartende Ergebnisse bestätigt, wie z.B. die Auslaugung von Calcium, aber auch neue Erkenntnisse gewonnen. So zeigte sich bereits bei HCl pH 4 eine komplette Durchdringung der Probe mit Chloridionen, während eine Korrosion durch die Säure nur an der Oberfläche erkennbar ist. Dagegen erreicht Schwefel (Sulfat) bei H_2SO_4 pH 2 den größtenteils noch intakten Kern nicht. Des Weiteren besteht die korrodierte Schicht bei beiden Säuren hauptsächlich aus Silizium mit Anteilen an Eisen und je nach pH-Wert unterschiedlichen Mengen Aluminium. Das Verhalten des Eisens (wahrscheinlich Eisenhydroxid) unterscheidet sich säureabhängig. Bei HCl befinden sich vier eisenhaltige Schichten mitten im korrodierten Material (Abb. 2, pH2), bei H_2SO_4 wandert je eine mit der Korrosionsfront. Aufgrund des Schädigungsunterschiedes und der damit verbundenen unterschiedlichen pH-Verteilung ergibt sich offensichtlich eine unterschiedliche Mobilität des Eisens. Das resultierende Silikatgerüst wird beim Schwefelsäureangriff mit Gips aus der Reaktion des freigesetzten Calcium und dem Sulfat der Säure ausgefüllt und, zumindest im Fall der hüttensandhaltigen Probe, ausgeweitet.

Schlussfolgerungen

Die LA-ICP-MS ermöglicht die Bestimmung von Elementverteilungen über den Querschnitt der säuregelagerten Zementsteinproben. Mit den verwendeten Messparametern lassen sich Schichtdicken von 100 μm unterscheiden. Die graphische Darstellung der Messergebnisse ist mit der Software Iolite auf verschiedene Weise möglich: Optimiert für eine möglichst hohe Ortsauflösung einer Probe oder eine direkte Vergleichbarkeit verschiedener Proben. Vergleiche sind dabei nur qualitativ anhand von Elementverhältnissen möglich, da das Ablationsvolumen auch innerhalb einer Probe unterschiedlich ist. Für quantitative Vergleiche ist daher die Kenntnis des genauen ablatierten Probenvolumens mit ähnlicher Ortsauflösung wie die Elementverteilung zwingend erforderlich.

Die Ergebnisse zeigten, dass sich in den korrodierten Bereichen überwiegend Silizium sowie in bestimmten Zonen Eisen und je nach pH-Wert Aluminium anreicherten. Zusätzlich konnte ein unterschiedliches Eindringverhalten der Säureanionen Chlorid und Sulfat beobachtet werden. Während Chlorid bei allen Lagerungen die Proben komplett durchdrungen hat, wird dies offensichtlich durch die Fällung von Gips bei Sulfat verhindert.

Literatur

- /1/ R.E. Beddoe, H. Hilbig: "Modelling the evolution of damage to concrete by acid attack", in: Simulation of time dependent degradation of porous materials, Cuvillier Verlag Göttingen (2009), S. 275-292.
- /2/ T. Gutberlet, H. Hilbig, R.E. Beddoe: "Acid Attack on Concrete – Structure of the Corroded Layer", 1st International Conference on the Chemistry of Construction Materials, Berlin, 2013, S. 363-366.

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Geophys. Christian Große
Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz

cbm - Centrum Baustoffe und Materialprüfung

Baumbachstraße 7
81245 München
Tel +49.89.289.27061
Fax +49.89.289.27064
information@cbm.bgu.tum.de
www.cbm.bgu.tum.de

Layout



Pf.-Eitlinger-Ring 5
85464 Finsing
Tel +49.8121.988996
www.designfürkommunikation.de

Verantwortlich

Britta Uhl

