





Jahresmitteilung

2017

Inhalt

1. Vorwort	4
2. Personelle Veränderungen	6
Nachruf Prof. Peter Schießl	8
3. Organigramm	10
4. Masterarbeiten	12
4.1. AG Bindemittel und Zusatzstoffe	12
4.2. AG Betontechnologie	17
4.3. AG Stahl und Korrosion	21
4.4. AG Chemie	25
4.5. AG Zerstörungsfreie Prüfung	26
5. Veranstaltungen	30
5.1. Weltleitmesse für Architektur, Materialien und Systeme	30
5.2. Lehrgang „Potentialfeldmessungen“	32
5.3. Deutsche Betonkanu-Regatta	34
5.4. Betriebsexkursion 2017	35
5.5. Sonstiges	37
6. Ehrungen	41
6.1. Gastprofessur in China	41
6.2. Exzellenz in der Lehre 2017	41
6.3. 6th International Doctoral Symposium, November 8-10, 2017, Hokkaido University, Japan	42
7. Berichte aus den Arbeitsgruppen	43
7.1. Arbeitsgruppenschwerpunkte	43
7.2. Abgeschlossene Forschungsvorhaben	48
7.3. Laufende Forschungsvorhaben	62
7.4. Neue Forschungsvorhaben	64
7.5. Wissenschaftliche Materialprüfung	74
7.6. MPA BAU – fast 150 Jahre Laborgeschichte	75
8. Mitarbeit in Ausschüssen, Arbeitskreisen, Gremien und Fachkommissionen	79
9. Dissertationen	84
9.1. Laufende Dissertationen	84
9.2. Dissertation Fact Sheets	86
9.3. Beendete Dissertationen	92
10. Liste aller Veröffentlichungen 2017	100
11. Ausgewählte Veröffentlichungen	106
11.1. ASR in Granitic Aggregates – Microscopic Damage Characteristics and Behaviour in Concrete Performance Test with Exposure to Sodium Chloride	106
11.2. Einfluss der Nachbehandlung auf die Carbonatisierung zementgebundener Baustoffe, die unter beschleunigenden Bedingungen geprüft werden	111
11.3. Monitoring von Bewehrungskorrosion in Rissbereichen von Stahlbetonbauwerken	121
11.4. Laser-Ablation-ICO-MS for the application on concrete structures – Quantitative approaches	133
12. Impressum	136

Liebe Freunde und Partner des cbm!

Nichts ist so beständig wie der Wandel (Heraklit). Das Jahr 2017 darf sicher als weiteres Beispiel für die Richtigkeit dieser Erkenntnis gelten. Aufregende und aufgeregte Zeiten fordern uns zu steter Überprüfung unserer Positionen heraus und verlangen unser Engagement, um Erreichtes zu bewahren und Überkommenes abzulösen. Weiteres Bevölkerungswachstum, ungleich verteilter Wohlstand, kriegsähnliche Auseinandersetzungen, Klimawandel und bevorstehende, grundlegende Wandlungen unserer Wirtschaftsprozesse – Stichwort Digitalisierung – bilden ein Szenario, das die Hochschulen als Bildungseinrichtungen herausfordert, konstruktive und ermutigende Lösungen zu erarbeiten.

Dass steter Wandel durch zupackende Initiative und auch Anpassungsfähigkeit zu langfristigem Erfolg führt, dafür darf man die TU München wohl als Beispiel heranziehen. Mit dem Abschluss des akademischen Jahres 2017, dem Dies Academicus am 7. Dezember, wurden die Feierlichkeiten des 150. Jubiläums der Gründung der TUM 1868 offiziell eröffnet. 150 Jahre, in denen sich die TUM zu einer international renommierten Universität mit inzwischen über 40.000 Studierenden entwickelt hat.

Und die Materialprüfung war praktisch von Anbeginn an dabei – zwei Jahre nach Gründung der TUM eröffnete das Mechanisch-Technische Laboratorium (MTL), über viele

weitere organisatorische Umwandlungen hinweg der Vorläufer des MPA BAU, dessen Abteilung Baustoffe heute wesentlicher Aktivposten des cbm ist.

Ein „runder Geburtstag“ steht im laufenden Jahr auch dem cbm ins Haus: 40 Jahre am Standort Pasing – 1978 als Baustoffinstitut gegründet und bis heute auf eine international sichtbare Institution der Lehre, Forschung und Materialprüfung mit mehr als 100 Mitarbeitern angewachsen. Das war nur durch die erwähnte zupackende Initiative und die Anpassungsfähigkeit der Mitarbeiter möglich, von denen wir Ihnen in diesen Jahresmitteilungen einige persönlich vorstellen möchten (s. Pkt. 7.6). Was werden die kommenden Jahre bringen?

In gewohnter Ausführlichkeit möchten wir Sie mit dem vorliegenden Heft über die Entwicklungen des vergangenen Jahres 2017 in den Bereichen Lehre, Forschung und Materialprüfung im cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München unterrichten.

Wir denken, dass wir erneut ein herausforderndes Jahr erfolgreich abschließen konnten – nicht zuletzt auch durch das anhaltende Interesse und die Unterstützung durch unsere Freunde und Partner, denen an dieser Stelle herzlich gedankt sei!

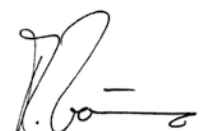
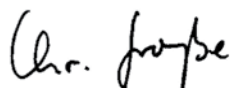
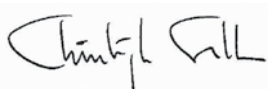
Ihre

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/-innen die ihre Forschung im cbm aufgenommen haben:

Frau Polina Secheyko, M.Sc. (01.07.2017)
 Frau Shima Ansary, M.Sc. (01.11.2017)

Nicht wissenschaftliche Mitarbeiter/-innen, die uns nun unterstützen

Frau Jennifer Singer (15.06.2017)
 Herr Maximilian Beck (01.07.2017)
 Herr Rudolph Kraus (01.07.2017)
 Herr Daniel Yehia (15.12.2017)

aus dem cbm ausgeschieden sind

Frau Marina Nahm (30.06.2017)
 Herr Dr. Dirk Lowke (02.07.2017)
 Herr Mohamed Nur (18.08.2017)



20-jähriges Dienstjubiläum feierte

Herr Andreas Gmell
Herr Dr. Harald Hilbig
Herr Michael Mittermayr

AG Chemie
AG Chemie
FG Asphalt

25-jähriges Dienstjubiläum feierte

Herr Stefan Hörber
Frau Gisela Knaup-Windisch

AG Stahl und Korrosion
FG Gesteine

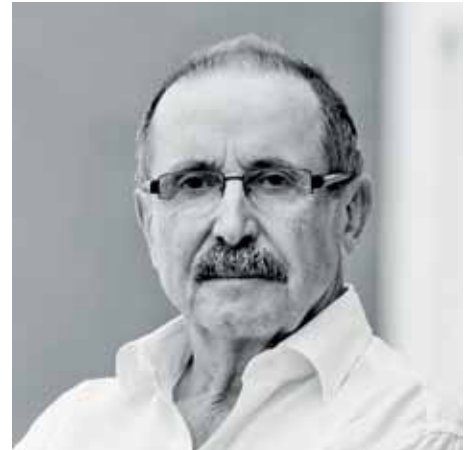
in den Ruhestand verabschiedet haben wir

Herrn Isak Halegua

(31.01.2017)

„Dieses lockere Steigen miteinander, wo jeder seinen eigenen Schritt geht und seinen eigenen Gedanken nachhängt, und wo man dennoch aufeinander acht gibt, ist für mich eine herrlich erholsame Verbindung von Ich-Sein und Miteinander-Sein.“ (Ulrich Aufmuth, deutscher Psychologe, Soziologe und Autor, *1947), cbm-Bergtour, 22. September 2017, vom Walchensee zum Herzogstand, Bilder: H. Hilbig





Nachruf Prof. Peter Schießl

Für alle völlig unerwartet wurde am 03.07.2017, vier Tage vor seinem 74. Geburtstag, Prof. Peter Schießl in seinem Norwegenurlaub aus dem Leben gerissen.

Im Wintersemester 1962, an der Technischen Hochschule München (heute Technische Universität München) eingeschrieben, begann für ihn die Ausbildung für einen Beruf, der ihn fast genau 50 Jahre faszinieren sollte. Einmal diplomiert nahm er 1967 das Angebot von Prof. Rüscher an, als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Münchner Massivbau-Institut zu arbeiten. Peter Schießl arbeitete mit Hilfe zahlreicher Versuchsreihen die Einflüsse von Betondeckung und Rissbreite auf die Carbonatisierung und auf die dadurch eingeleitete Korrosion von Stahl in Beton heraus. Seine Tätigkeit am Institut schloss er 1973 mit einer vielbeachteten Dissertation ab, die im Jahre 1975 in der Schriftenreihe des DAfStb Heft 225 herausgegeben, die deutsche Fachwelt darauf hin wies, dass die gerade in der Normung getroffenen Festlegungen zur Mindestüberdeckung und Rissbreitenbegrenzung nicht ausreichend waren, um eine angemessen lange Nutzungsdauer der Stahlbetonkonstruktionen gewährleisten zu können.

Nach dem Setzen dieser Duftmarke wurde Peter Schießl Abteilungsleiter und stellvertretender Institutsleiter am Institut für Betonstahl in München. In den insgesamt 12 Jahren seiner Tätigkeit dort entstanden umfangreiche Arbeiten zur Bewehrungstechnik, beachtete Beiträge zur Lösung von Fragen im Zusammenhang mit Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreite. Erste, in Normung übernommene, pragmatische Konstruktionsregeln zur Beschränkung der Rissbreite wurden von ihm entscheidend beeinflusst.

So auf sich aufmerksam gemacht, erhielt Peter Schießl den Ruf, als Nachfolger von Karlhans Wesche den Lehrstuhl für Baustoffkunde und die Leitung des damit verbundenen Instituts für Bauforschung (ibac) an der RWTH Aachen zu übernehmen. Hier konnte er nun seine grundsätzlichen Arbeiten zur Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen vertieft fortsetzen und durch andere Forschungsschwerpunkte ergänzen. So entstanden unter seiner Leitung neben Arbeiten zur Dauerhaftigkeit von Stahlbeton vielbeachtete Arbeiten auf dem Gebiet der technologisch und ökologisch optimierten Verwertung von Kraftwerksnebenprodukten (Steinkohlenflugasche) und Arbeiten auf dem Gebiet der Umweltverträglichkeit von zementgebundenen Baustoffen. Weitsichtig beschäftigte er sich also schon zu dieser Zeit mit Themen, die nach wie vor brandaktuell sind, weil sie die Nachhaltigkeit des Handelns in den Mittelpunkt rücken – hier besonders die Schonung von Ressourcen und der Umwelt. 1998 folgte Peter Schießl dem Ruf an die TU München. Dort übernahm er den Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung und die Leitung der Abteilung Baustoffe im Materialprüfungsamt für das Bauwesen. In München, seiner Heimatstadt, wurden die in Aachen bereits angestrebten Forschungsziele weiter verfolgt und durch neue Forschungsschwer-

punkte ergänzt. Hinzu kamen insbesondere Forschungsarbeiten im Bereich des Straßen- und Sichtbetons. Die von ihm angestoßenen Arbeiten zum Thema Sichtbeton haben mit dazu beitragen, dass Beton sich auch in der Architektur als ein sehr positiv wahrnehmbares Gestaltungselement zunehmend herzeigen darf.

Seine unzähligen Veröffentlichungen – nicht unbescheiden erwähnte er einmal, er hätte aufgehört, sie zu zählen, erzeugten nicht nur national, sondern auch international große Aufmerksamkeit. Viele Ehrungen folgten. Neben weiteren hier nicht genannten, zählten insbesondere die Ehrendoktorwürde von der Bauhaus-Universität Weimar, die *Emil Mörsch* Denkmünze, der Swedish Concrete Award, die Ehrenmedaille der Fédération Internationale du Béton (fib) und der CEMEX Ehrenpreis Beton dazu.

Neben der verhaltenen Freude über eigene Erfolge, war ihm die Freude über Erfolge seiner Assistenten die schönste. Zahlreiche Promotionen waren Resultat dieser fruchtbaren Jahre sowohl in Aachen als auch in München. An seine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wurden bedeutende Wissenschaftspreise wie der *Heinrich-Mandel*-Preis, einige Readymix-Förderpreise, später CEMEX-Förderpreise, einige *Hubert-Rüsch* Forschungspreise und die *Robert L'Hermite* Medaille der RILEM verliehen. Alle diese Erfolge waren die Ernte einer Saat, die ohne seine Pflege nicht aufgegangen wäre.

Nach dem Ende seiner Hochschultätigkeit beriet er über sein bereits im Jahre 2000 zuletzt gegründetes Ingenieurbüro weiter viele Kunden im In- und Ausland, die seine Erfahrung und sein unglaublich großes Fachwissen im Bereich baustoffspezifischer Problemstellungen sehr schätzten. Ein Kunde sagte mir vor einigen Tagen im Vertrauen: „Mit keinem konnte man sich so offen austauschen, wie mit ihm. Die in ihm gelungen vereinigte Kombination von Fachwissen und Menschlichkeit machten ihn so einzigartig. Er war so entwaffnend ehrlich und offen. Er war ein begnadeter Bauingenieur.“

Die Arbeit mit seinen oft noch sehr jungen Büromitarbeitern, die Freude, mit ihnen sein Wissen zu teilen, erfüllten ihn sehr.

Zunehmend fing er aber auch an, die Möglichkeit zu genießen, die im früheren Berufsleben oft stark fremdbestimmten Zeitpläne jetzt selber zu gestalten. Frei nach dem Motto: Soviel, wie es mir Spaß macht,....manchmal auch ein wenig mehr.

In der Freizeit verschafften ihm Sportaktivitäten und der Aufenthalt in der Natur größte Freude. Am allerliebsten in Kombination. Auch verstand er es, die Früchte der Natur sehr zu genießen. Auch konnte er anderen damit eine Freude bereiten. Höchste Wertschätzung erfuhr bei Beschenkten seine zu besonderen Anlässen gern überreichte, mit Hingabe selbst gefertigte Praline. Ein Werk konstruiert mit vier gerösteten, karamellisierten Piemonteser Haselnüssen, die zum Schluss mit dunkler Schokolade überzogen wurden.

Weil Peter Schießl der beruflichen Begegnung auch oft etwas Privates, die persönliche Zuwendung hinzuzufügen vermochte, haben alle, die ihm beruflich begegneten, sehr gerne für ihn und mit ihm gearbeitet.

In dankbarer Erinnerung an einen großen Wissenschaftler, Ingenieur und Menschenfreund,
Christoph Gehlen

erschienen in: Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 8

3. Organigramm

Institutsleitung

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

Betriebsleitung

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

Verwaltung

Assistenz d. Geschäftsleitung
Fr. Uhl

Lehrebeauftragte Fr. Dr.-Ing. Spengler

AG 1 BINDEMittel UND ZUSATZSTOFFE

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

Mörtellabor

Hr. Kriegel
Fr. Frey
Hr. Gottmann

Physiklabor

Fr. Hartlieb-Pfüller

AG 2 BETONTECHNOLOGIE

Hr. Kränkel, Dipl.-Ing.
Fr. Thiel, Dipl.-Ing.
Hr. Klein, M.Sc.
Fr. Limeira de Araujo, Dr.
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, Dr.-Ing.
Fr. Ansary, M.Sc.
Hr. Elner, B.Sc.
Hr. Giebitz, Dipl.-Ing.
Hr. Havic, Ing.
Hr. Hiemer, M.Sc.
Hr. Huber, Dipl.-Ing.
Hr. Müller, Dipl.-Ing.
Hr. Osterminski, Dr.-Ing.
Hr. Schmid, Dipl.-Ing.
Fr. Ziehensack, M.Sc.

Assistenz/Techn. Sachbearbeitung:

Fr. Enskat
Fr. Kohler
Fr. Röttinger
Fr. Weis

Stahllabor

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

Korrosionslabor

Fr. Lillich

Ausbildlerin
Auszubildende Baustoffprüfer/in

Fr. Fritz
Fr. Drame
Hr. Schittko
Fr. Sturm

Professur für Gesteinshüttenkunde

Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz

Assistenz Institutsleitung: Fr. Weiß; Fr. Deuerling

Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung

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

Assistenz Institutsleitung: Fr. Hafenmayer

Dr.-Ing. Liudvikas Urbonas

Buchhaltung

Hr. Hart, Fr. Scholz

EDV

Hr. Laureana

Bibliothek

Fr. Kassel

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

Projektgruppe Bewehrung Hr. Dr.-Ing. Osterminski

AG 4 CHEMIE

Hr. Hilbig, Dr. rer. nat.

Hr. Decker, M.Sc.

Chemielabor

Hr. Gmell

Fr. Herzinger (Azubi)

Hr. Koll

Hr. Morber (Azubi)

**AG 5 BITUMENHALTIGE
BAUSTOFFE UND GESTEINE**

Hr. Wörner, Dr.-Ing.

Sekretariat:

Fr. Finke

Fr. Knaup-Windisch

Zertifizierungsstelle:

Hr. Skowronek

FG Asphalt (50)

Hr. Wörner, Dr.-Ing.

Hr. Patzak, Dipl.-Ing.

Asphaltlabor

Hr. Barabunov

Hr. Kandler

Hr. Mittermayr

Hr. Strzelczyk

**FG Bitumen und
Abdichtungen (51)**

Hr. Wallner, Dr.-Ing.

Fr. Franke, Dipl.-Chem. Ing.

**Bitumen- und
Abdichtungslabor**

Hr. v. Neuhoﬀ v. d. Ley

Fr. Bötl

Hr. Bollmann

Hr. Tröndle

Hr. Ullmann

FG Gesteine (52)

Hr. Westiner, Dr. rer. nat.

Hr. Graw, Dipl.-Ing.

Fr. Neidinger, Dr. rer. nat.

Gesteinslabor

Hr. Kreft

Hr. Dexheimer

Hr. Fischer

Hr. Gabor

Hr. Grieser

Hr. Lindel

Hr. Singer

Hr. Teodorowicz

Hr. Zeuner

Hr. Zöge

Sandlabor

Hr. Reier

Fr. Fritz

Hr. Janeselli

Mechanische Werkstatt

Hr. Strehle

**AG 6 ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG**

Hr. Groschup, Dipl.-Geophys.

Fr. Pinkert, Dr. rer. nat.

Hr. Botz, M.Sc.

Hr. Jatzlau, Dipl.-Ing.

Hr. Malm, M.Sc.

Hr. Raith, M.Sc.

ZfP Labor

Fr. Gemander, M.Sc.

Hr. Kraus

Elektronische Werkstatt

Hr. Münchmeyer

4. Masterarbeiten

4.1. AG Bindemittel und Zusatzstoffe

4.1.1. Carbonatisierung von synthetisch hergestellten Produkten aus der Hydratation von Zementen

Masterarbeit von Julia Wladyslawa Spyra
 Betreuung: Linda Irbe, M.Sc.

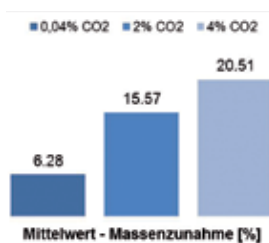


Abbildung 1:
 Mittelwerte der gesamten Massenänderung aller Probenreihen nach 7d Lagerungszeit in Abhängigkeit der CO₂-Konzentrationen [Vol.-%] bei r. F. von 65%.

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Verfolgung des Bindungs- und Lösungsverhalten von Aluminium in den festigkeitsbildenden C-A-S-H-Phasen während der Carbonatisierung. Für die Versuche wurden synthetisch hergestellten Proben mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung bezüglich ihrer Al/Si-Verhältnisse ausgewählt. Die Carbonatisierung erfolgte bei drei verschiedenen CO₂-Konzentration: 0,04 Vol.-%, 2 Vol.-% und 4 Vol.-% und 65% rel. Feuchte. Die Lagerungszeiten variierten von 1 Stunde bis hin zu 7 Tagen. Der Carbonatisierungsfortschritt in Abhängigkeit von der CO₂-Konzentration und der Lagerungszeit wurde mittels STA, XRD sowie ²⁷Al-NMR und ²⁹Si-NMR verfolgt.

Mit steigendem CO₂-Gehalt wurde eine allgemeine Gewichtszunahme in den Proben nach der Carbonatisierung dokumentiert (s. Abb.1)

Als Reaktionsprodukte entstanden hauptsächlich Calciumcarbonat und Silikagel. Ersteres kam in drei kristallinen Modifikationen Vaterit, Aragonit und Calcit vor, wobei Vaterit als Hauptphase auftrat. Nach der Lagerung bei 2 Vol.-% und 4 Vol.-% CO₂ wurden die C-A-S-H-Phasen in allen Proben zersetzt, wobei das Aluminium im Silicagel eingebaut wurde. Zusammenfassend konnte kein nennenswerter Einfluss von Aluminium auf die Stabilität der C-A-S-H-Phasen während des Carbonatisierungsvorgangs festgestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit konnten keine für die Carbonatisierungsreaktion sehr wichtigen physikalischen Parameter, wie z. B. Porenverteilung oder Porengröße berücksichtigt werden. Allerdings konnte aus chemischer Sicht eindeutig gezeigt werden, dass steigende CO₂-Konzentrationen nur die Reaktionskinetik beeinflussen, jedoch keinen Einfluss auf die thermodynamischen Gleichgewichte der Carbonatisierungsreaktion ausüben.

4.1.2. Eignung der Feinfraktion aus Bauschuttrecycling als Produktionsrohstoff für Porenbeton

Masterarbeit von Daniela Wolfram
 Betreuung: Dr.-Ing. Anne Heisig, Dr. Volker Thome (Fraunhofer IBP)

Porenbeton besitzt aufgrund seiner einzigartigen Materialeigenschaften sowie vorteilhaften Konstruktionsmöglichkeiten eine hohe Attraktivität für die Bauindustrie. Neben der Besonderheit von niedriger Dichte und gleichzeitig hoher Festigkeit, weist Porenbeton Vorteile hinsichtlich Wärme- und Brandschutz sowie Umweltverträglichkeit auf. Auch die Forschung interessiert sich für Porenbeton aufgrund seiner besonderen Eigenschaften. Dabei werden beispielsweise Einflüsse auf die Porenbetonstruktur und auf die Bildung von Mineralphasen untersucht sowie Möglichkeiten zum Einsatz von SiO₂-haltigen Recyclingprodukte geprüft. Die hier vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz von Bauschuttfraktionen als sekundären Rohstoff für die Porenbetonproduktion.

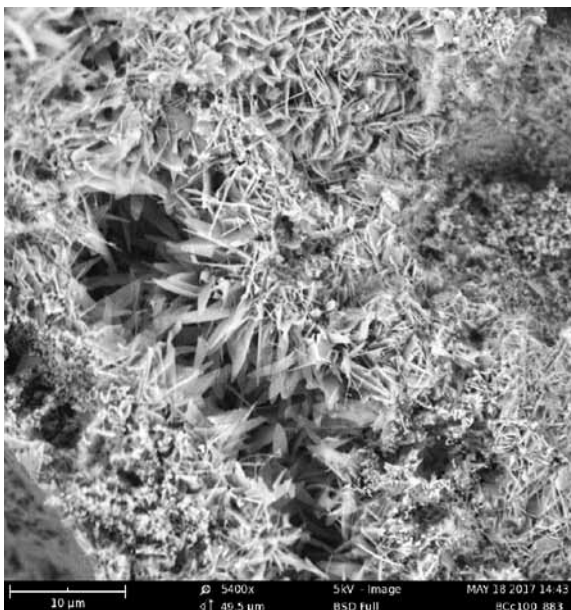
Hierfür wurden jeweils 30 % des verwendeten Quarzsandes durch neun unterschiedlich zusammengesetzte Bauschuttmischungen ersetzt. Bei dem Ersatzmaterial handelte es sich entweder um synthetischen Kalksandstein, Beton mit quarzitischer oder kalzitischer Gesteinskörnung sowie Mischungen aus Kalksandstein mit Beton mit quarzitischer oder mit kalzitischer Gesteinskörnung in unterschiedlichen Verhältnissen. Ziel war es, mög-

lichst gleiche Druckfestigkeiten wie ein unter gleichen Bedingungen hergestellter Porenbetonstein ohne Ersatzmaterial zu erhalten. Um die Auswirkungen des Ersatzmaterials auf die Eigenschaften des Porenbetons zu untersuchen, wurden ein-axiale Druckversuche nach DIN EN 772-1 durchgeführt sowie die chemische als auch mineralogische Zusammensetzung der hergestellten Porenbetonsteine und des Ersatzmaterials bestimmt.

Die Untersuchungen ergaben geringfügige Änderungen bis hin zu starken Einbußen hinsichtlich der Druckfestigkeit. Die besten Ergebnisse erzielten die Porenbetonproben mit Ersatzmaterial aus Mischungen mit Kalksandstein und Beton mit quarzitischer Gesteinskörnung, während die Proben mit Ersatzmaterial aus Mischungen mit Kalksandstein und Beton mit kalzitischer Gesteinskörnung am schlechtesten abschnitten. Der primäre Faktor, der zu diesen Ergebnissen führte, ist mit aller Wahrscheinlichkeit der Quarzgehalt im Ersatzmaterial, da mit sinkender Quarzmenge die Druckfestigkeiten abnehmen. Aber auch Nebenbestandteile scheinen Einfluss auf die mineralogische Zusammensetzung des Porenbetons und somit dessen Festigkeit zu nehmen. Dies lässt sich daraus schließen, dass die Kombination aus Kalksandstein und Beton mit quarzitischer Gesteinskörnung zu einer höheren Druckfestigkeit führt als reiner Kalksandstein trotz höherem Quarzgehalt.



Abbildung 1:
Autoklav zur Dampfhärtung am
Fraunhofer IBP, Holzkirchen



Zudem ließen sich Zusammenhänge zwischen der Druckfestigkeit und der mineralogischen Zusammensetzung herstellen.

So geht ein hoher Tobermoritgehalt mit einer hohen Druckfestigkeit einher, während ein hoher Anteil an amorphen Phasen sowie Hydroxylellestadit und Anhydrit zu einer Schwächung der Porenbetonstruktur und somit zu geringerer Druckfestigkeit führt.

Abbildung 2:
Tobermoritkristalle im Raster-
elektronenmikroskop

4.1.3. Getemperter Schluff aus der Kaolinherstellung – Anwendung als puzzolanischer Zusatzstoff

Masterarbeit von Katharina Niggel

Betreuung: Dr.-Ing. Anne Heisig

Um den Anteil des CO₂-Ausstoßes der Zementindustrie, der durch die Entsäuerungsreaktion des Kalksteins bei der Portlandzementherstellung entsteht, zu vermindern, können Zusatzstoffe wie beispielsweise Metakaolin als weiterer Hauptbestandteil zum Klinkeraustausch eingesetzt werden. Da dieses jedoch vergleichsweise teuer ist, wird nach Alternativen gesucht. Seit einiger Zeit beschäftigt sich die Forschung daher mit getemperten Tonmineralen. Diese bestehen neben dem Tonmineral Kaolinit zusätzlich aus weiteren (Ton-) Mineralen, wie beispielsweise Montmorillonit, Illit und Chlorit.

In dieser Arbeit wird ein industrieller Reststoff, der bei der Kaolinherstellung anfällt und bislang deponiert wird, untersucht. Er wird vom Hersteller als Schluff bezeichnet und enthält neben Kaolinit (66 M.-%) auch Illit (12 M.-%) und Muskovit (13 M.-%). Dieses Ausgangsmaterial wird bei Temperaturen von 400 °C, 450 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C und 900 °C in einem Laborofen getempert.

Mit steigender Kalzinierungstemperatur wächst der Anteil amorpher Phasen im getemperten Schluff. Bei einer Temperatur von 800 °C ist das Maximum amorpher Phasen mit 76 M.-% erreicht (Abb. 1).

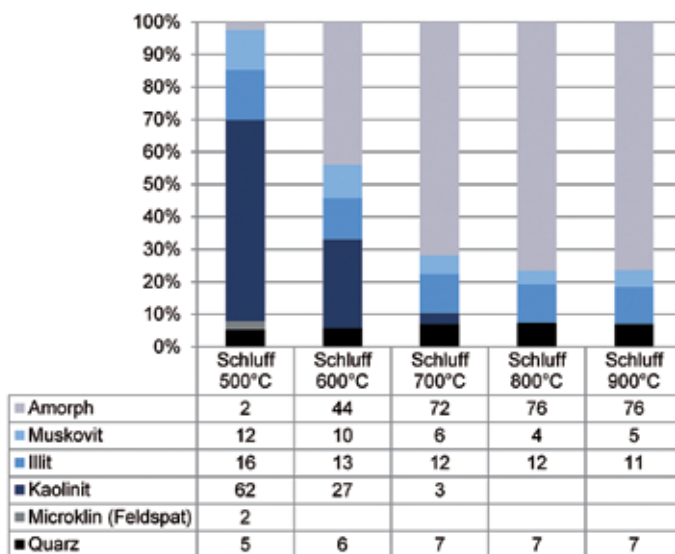


Abbildung 1:
Mineralogische Zusammen-
setzung des thermisch behan-
delten Schluffs

Der bei verschiedenen Temperaturen behandelte Schluff wird jeweils zusammen mit einem Prüfzement CEMI 42,5 R zu Portlandpuzzolanzement vermischt. Die Substitutionsrate liegt bei 25 M.-%. Nach DIN EN 196-1 und DIN EN 450-1 werden aus den Portlandpuzzolanzementen und einem Referenzement (100 M.-% CEM I 42,5 R) Mörtelprismen hergestellt. Diese werden nach 2, 7, 28, 56 und 90 Tagen geprüft. 28 Tage nach Wasserzugabe werden Aktivitätsindizes von maximal 116 % ermittelt.

Die Kapillarporosität wird an Zementleimen (w/b = 0,5) ermittelt. Die Leimproben zeigen mit steigender Kalzinierungstemperatur der Schluffe sowie zunehmendem Probenalter eine abnehmende Kapillar- sowie Gesamtporosität.

Während die Referenzprobe mit zunehmender Hydratationszeit Portlandit freisetzt, sinkt dessen Gehalt in den mit kalzinierten Schluffen versetzten Proben. Es findet daher nachweislich eine puzzolanische Reaktion statt, wodurch Portlandit verbraucht wird. Insgesamt entstehen neben Portlandit auch Monocarbonat und Hemicarboaluminat als kristalline Hydratationsprodukte. Wärmeflussmessungen zeigen, dass der Ersatz von Zement durch 25 M.-% getemperte Schluffe zu keiner Verzögerung der Hydratationsreaktion, jedoch zu einer verringerten Wärmefreisetzung führt. Die Porenlösungsuntersuchungen ergeben einen zur Passivierung von Bewehrungsstahl geeigneten pH-Wert von 13,5 sowie einen verminderten Alkaligehalt, welcher das Risiko einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) einschränkt.

Insgesamt lässt sich aus dem Schluff, einem Reststoff aus der industriellen Kaolinherstellung, durch Kalzination bei Temperaturen zwischen 700 °C und 800 °C ein puzzolanischer Zusatzstoff mit einer im Vergleich zur Flugasche höheren Leistungsfähigkeit herstellen.

4.1.4. Das Verhalten verschiedener Gesteine in AKR-Prüfverfahren

Masterarbeit von Nicole Gudrun Poloczek

Betreuung: Kai Fischer, M.Sc.

Durch die konsequente und bundesweite Anwendung etablierter Prüfverfahren zur Beurteilung der Beständigkeit von Gesteinskörnungen und Betonzusammensetzungen hinsichtlich einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR), kann das Auftreten einer AKR in Beton nachweislich vermieden werden. Die Grundvoraussetzung einer sicheren Beurteilung ist, dass die angewandten Prüfverfahren das Praxisverhalten der Gesteinskörnungen respektive der Betone korrekt abbilden. In diesem Zusammenhang deuten Untersuchungen am Centrum Baustoffe und Materialprüfung darauf hin, dass die etablierten AKR-Prüfverfahren für Fahrbahndeckenbetone bei der Verwendung grober Gesteinskörnungen aus Granit keine praxisgerechten Ergebnisse liefern und dass dabei zusätzlich der eingesetzte Sand einen Einfluss auf die Ergebnisse in der Betonprüfung haben kann.

Vor diesem Hintergrund bestand das Ziel dieser Arbeit darin, das Verhalten von zwei groben Gesteinskörnungen aus Granit und zwei verschiedenen Sanden in unterschiedlichen AKR-Prüfverfahren zu untersuchen. Eine Gesteinskörnung aus Grauwacke und eine aus Kalkstein dienten dabei als alkalireaktive bzw. inerte Referenzen. Prüfungen gemäß Schnellprüfverfahren (AKR-Schnelltest) nach Alkali-Richtlinie des DAfStb über einen Zeitraum von knapp einem Jahr bestätigen, dass die Gesteinskörnungen aus Granit deutlich geringere Alkaliempfindlichkeiten aufweisen, als die reaktive Grauwacke. Anhand lichtmikroskopischer Untersuchungen der beanspruchten Mörtelprismen nach 28 und 180 Tagen im AKR-Schnelltest kann nachgewiesen werden, dass sich das mikroskopische Schadensbild einer ablaufenden AKR im Granit grundsätzlich von einer AKR in der Grauwacke unterscheidet. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal besteht darin, dass eine AKR in den granitischen Gesteinskörnern trotz einer systematischen Rissbildung im Korn und damit assoziierten grenzwertüberschreitenden Dehnungen, die Bildung von lichtmikroskopisch sichtbaren Alkalikieselsäure-Gel ausbleibt. In einer weiteren Versuchsreihe wurde die AKR-Beständigkeit von Fahrbahndeckenbeton (Waschbeton), in welchem Granit – sowie Kalkstein als inerte Referenz – in der groben Gesteinskörnungsfraction verwendet wurde, mittels 60 °C - Betonversuch mit NaCl-Zufuhr untersucht. Dieses nach dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau 04/13 zulässige Prüfverfahren wurde entwickelt, um das AKR-Verhalten grober Gesteinskörnungen in Fahrbahndeckenbeton zu beurteilen.

Die Ergebnisse aus den durchgeführten Betonprüfungen zeigen jedoch, dass neben der groben Gesteinskörnung auch der verwendete Sand einen maßgeblichen, durch AKR verursachten, Dehnungsbeitrag in dem Prüfverfahren leisten kann.

4.1.5. Auswirkungen von Umgebungstemperatur und Taumittelart auf eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton

Masterarbeit von Franziska Springer

Betreuung: Kai Fischer, M.Sc.

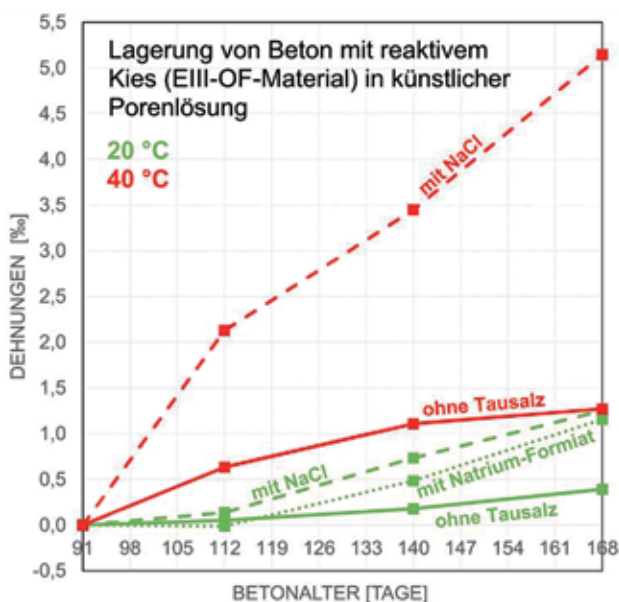
Einleitung

Obwohl bereits zahlreiche Studien zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) existieren und die entsprechenden Richtlinien und Normen immer wieder überarbeitet werden, ist es bisher nicht gelungen, flächendeckend AKR-Schäden zu vermeiden. Insbesondere die Mechanismen unter Taumittelzufuhr und der Einfluss von verschiedenen Umgebungstemperaturen sind bisher nicht vollständig erforscht und sind daher Betrachtungsgegenstand dieser

Masterarbeit. Neben Natriumchlorid wird auch die Wirkungsweise eines kommerziellen Flugflächenenteisers aus Natriumformiat betrachtet. Zudem finden vor allem praxisnahe Temperaturen zur Abbildung wirklichkeitsnaher Verhältnisse Anwendung.

Untersuchungen

Für die Untersuchungen wurden Feinbetonprismen mit Gesteinskörnungen unterschiedlicher Alkaliempfindlichkeiten hergestellt. In der groben Gesteinskörnung (2-8 mm) wurden ein schnell reaktiver Kies mit Flint und Opalsandstein (E III-OF-Material), eine langsam reaktive Grauwacke und zwei alkaliunempfindliche Granite eingesetzt. In der feinen Fraktion wurden zwei verschiedene Natursande verwendet. Bei allen Rezepturen kam die identische Bindemittelrezeptur zur Anwendung, lediglich bei der schnell und gering reaktiven Gesteinskörnung wurde zusätzlich eine Rezeptur mit 30% Zementersatz mit Steinkohlenflugasche hergestellt. Nach der Herstellung wurden alle Prismen 91 Tage bei 20°C über Wasser gelagert. Nach der Vorlagerung wurde ein Teil der Prismen in eine künstliche Betonporenlösung, der andere Teil in eine künstliche Porenlösung plus Taumittel umgelagert. Die Zufuhr von Taumitteln soll die Beanspruchung durch Natriumchlorid bzw. Natriumformiat, das als Flughafenbetriebsflächenenteiser angewendet wird, simulieren. Insgesamt wurden die Betone im Rahmen dieser Arbeit nach der Vorlagerung in drei Zyklen beansprucht, wobei ein Zyklus aus einer dreiwöchigen Lösungslagerung und einer einwöchigen Trocknungsphase besteht. Zu festgesetzten Zeitpunkten während der Vorlagerung sowie zu jedem Umlagerungszeitpunkt wurden Massen-, Längen- und Resonanzfrequenzmessungen durchgeführt. Zudem wurden an ausgewählten Terminen zerstörende Prüfungen zur Bestimmung der Porosität, der Porenlösungszusammensetzung sowie zur Herstellung von Dünnschliffen durchgeführt.



Ergebnisse

Deutlich konnten in den Untersuchungen Unterschiede durch die Verwendung unterschiedlich reaktiver Gesteinskörnungen beobachtet werden. Im Gegensatz zum Beton mit dem schnell reagierendem E III-OF-Material, bei dem bereits nach kurzer Zeit Schäden infolge einer AKR deutlich wurden, zeigten die Proben mit langsam bzw. gering reaktiven Gesteinskörnungen im Betrachtungszeitraum nur geringfügige bis keine Auswirkungen infolge einer AKR. Bei den Proben mit E III-OF-Material wurde eine zunehmende Schädigung mit steigender Temperatur und durch Taumittelzufuhr beobachtet, die sich zum einen durch die aufgetretenen Dehnungen und zum anderen durch die äußerlich sichtbaren Schäden zeigen. Der tatsächliche Nachweis einer Schädigung der Probekörper durch eine AKR wurde durch lichtmikroskopische Untersuchungen erbracht, in denen u. a. Alkali-Kieselsäure-Gel als Produkt der Schädigungsreaktion identifiziert wurde. Durch den Austausch von Zement durch die puzzolanische Steinkohlenflugasche wurden deutlich geringere Schäden durch AKR festgestellt.

Abbildung 1:
Dehnungsverhalten von Betonprismen mit alkalireaktivem Kies unter der Beanspruchung verschiedener Tausalz bei 20 und 40°C

In der Literatur wird aufgeführt, dass durch Zufuhr von Natriumchlorid die Siliciumlöslichkeit aus reaktiven Bestandteilen der Gesteinskörnung erhöht wird. Aufgrund komplexer Mechanismen, die z.T. gegenläufig wirken, wird trotz Absinken des pH-Werts die Siliciumlöslichkeit und die Schädigung infolge einer AKR erhöht. Analysen der Porenlösungszusammensetzungen – insbesondere von Proben, die bei höheren Temperaturen

und NaCl-Zufuhr beansprucht wurden – zeigen gleichermaßen erhöhte Siliciumkonzentrationen und belegen damit diesen Zusammenhang. Mit steigender Temperatur und unter Taumittelzufuhr nimmt die Alkali- sowie die Sulfatkonzentration in den Porenlösungen stark zu, was mit der ermittelten Schädigung der Probekörper korreliert. Trotz hoher Alkali- und OH-Konzentrationen ist die Schädigung in Betonen mit Flugasche deutlich geringer.

Bei den langsam und gering reaktiven Gesteinskörnungen konnten im betrachteten Zeitraum keine AKR-Schäden festgestellt werden. Vor allem bei geringen Temperaturen ist davon auszugehen, dass Schäden erst nach sehr langen Zeiträumen festgestellt werden können. Es zeigten sich jedoch bereits Tendenzen, dass die Dehnungen der Betone mit Grauwacke bei 2°C die Dehnungen bei 20°C überschreiten. Ob sich diese Tendenz fortsetzt und auf welche Vorgänge dies zurückzuführen ist, ist in weitergehenden Untersuchungen zu analysieren.

4.2. AG Betontechnologie

4.2.1. Dauerhaftigkeit der Griffigkeit von Betonfahrbahndecken mit Grinding- und Grooving-Texturen

Masterarbeit von Simon Hampel

Betreuung: Nicolai Klein, M.Sc., Dipl.-Ing. Thomas Kränkel

Um eine hohe Verkehrssicherheit zu gewährleisten, müssen Betonfahrbahndecken eine dauerhaft hohe Griffigkeit sowie ein ausreichendes Entwässerungsvermögen aufweisen. Dies wird durch eine Texturierung der Oberfläche erreicht, beispielsweise dem Grinding und Grooving. Um die Dauerhaftigkeit dieser Texturierungen im Labor zu untersuchen, wurde, in Anlehnung an einen bestehenden Prüfablauf, deren Beständigkeit gegen die einwirkende kombinierte Exposition aus Verkehr (mechanische Beanspruchung) und Umwelt (lösender Angriff und Frost-Tau(salz)-Wechsel) untersucht. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf dem Einfluss unterschiedlicher Gesteine auf die Dauerhaftigkeit von Grinding- / Grinding-Grooving-Texturen. Dafür wurden vier Gesteine mit unterschiedlicher Petrographie oder Bruchflächigkeit in sonst identischen Betonrezepturen eingesetzt und diese mit drei unterschiedlichen Texturarten versehen. Bei den Texturen handelte es sich um ein reines Grinding zur Verbesserung der Griffigkeit, dieses Grinding mit Groovingrillen zur Entwässerung ergänzt sowie einer akustisch optimierten Grinding+Grooving-Textur.

Im Zuge der Untersuchungen wurden die Veränderungen der Griffigkeit in Abhängigkeit der jeweiligen Belastung betrachtet. Dabei konnte ein starker (lösender Angriff) bzw. mäßiger (Frost-Tau(salz)-Wechsel) Anstieg der Griffigkeit aufgrund der Umweltbelastungen verzeichnet werden. Der Gesamtzyklus führte hingegen durch die simulierte Verkehrsbelastung zu einem starken Abfall der Griffigkeiten. Dabei konnte bei allen Texturen ein ähnlicher Endwert festgestellt werden. Auch die unterschiedlichen Gesteine wiesen lediglich geringe Unterschiede bezüglich der Endgriffigkeit auf. Zwar konnte eine tendenziell höhere Griffigkeit bei höherem Polierwert der Gesteinskörnung beobachtet werden, in Werten fiel diese jedoch gering aus. Daraus lässt sich schließen, dass alle drei Texturarten mit den eingesetzten Gesteinen eine dauerhaft griffige Oberfläche gewährleisten. Auch ein maßgeblicher Unterschied zwischen gebrochener und gerundeter Gesteinskörnung konnte nicht festgestellt werden. Diese Erkenntnis lässt Raum für weitere systematische Untersuchungen inwiefern Rundkorn im allgemeinen für Grinding-Neubaustrecken geeignet ist.

4.2.2. Einfluss intermittierender Trocknungsperioden auf den Frost-Tausalz Angriff von Beton

Masterarbeit von Florian Föstl

Betreuer: Dipl.-Ing. Charlotte Thiel

Der Frost-Tausalz-Angriff kann zu inneren und äußeren Schädigungen führen. Um Bauwerke ökonomisch und ökologisch zu bemessen, gibt es Forschungsbedarf zur zuverlässigen Vorhersage der Schädigungsentwicklung von Betonen unter Frost-Tausalz-Beanspruchung. Während nur Bauteile im defekten Fugenbereich horizontaler Verkehrsbauwerke oder Bauteile in der Meerwasserwechselzone einer ständigen Wassersättigung unterliegen, ist in der Praxis eine wechselnde Nass-Trocken-Exposition mit Tausalz vorherrschend. Daher wurden der Einfluss intermittierender Trocknungsperioden auf den Frost-Tausalz-Angriff von Beton untersucht und Möglichkeiten der Berücksichtigung der Ergebnisse im Rahmen einer Lebensdauerbemessung aufgezeigt. Unter Einsatz eines modifizierten CDF-Tests wurden Versuche an einem mit Portlandzement hergestellten Beton ohne künstliche Luftporen und einem w/z-Wert von 0,45 durchgeführt. Nach jeweils 6 Frost-Tau-Wechseln wurden verschiedene Serien bis zu dreimal durch eine Trocknungsperiode unterbrochen, die sich in der Trocknungsdauer (1, 2 und 7 Tage), -temperatur (5 und 20 °C) und -luftfeuchte (20 und 65 % relative Feuchte), sowie einem anschließenden kapillaren Saugen (kein kapillares Saugen, 1 Tag in 3%iger Natriumchloridlösung, 2 Tage in Wasser) unterschied. Die Auswertung erfolgte anhand der äußeren sowie inneren Schädigungen, dem Wasser- und Chloridgehalt sowie den Veränderungen im Porenraum des Betons, wobei eine mit kontinuierlichen Frost-Tau-Wechseln belastete Serie vergleichend herangezogen wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abwitterungsmengen durch intermittierende Trocknungsperioden erheblich abnahmen, was fast ausschließlich auf den reduzierten Gehalt an Kapillarporenwasser in den obersten Millimetern der Betonrandzone zurückzuführen ist. Des Weiteren führen die Trocknungsperioden zu einer Erhöhung der Chloridkonzentrationen und -eindringtiefen, welche damit zur Gefrierpunktniedrigung des Porenwassers beitragen könnten. Es konnte beobachtet werden, dass die Chloride während der Trocknung ins Betoninnere diffundieren, während infolge der Frost-Tau-Wechsel ein Rücktransport stattfindet.

4.2.3. Einfluss von CO₂-Permeation auf die Carbonatisierung zementgebundener Baustoffe

Masterarbeit von Anian Schön

Betreuer: Dipl.-Ing. Charlotte Thiel

Bei Anwesenheit von Kohlendioxid und Feuchtigkeit reagiert u.a. das Portlandit in zementgebundenen Baustoffen zu Calcit. Diese Reaktion führt zum Verlust des alkalischen Milieus im Beton und damit zur Depassivierung der Bewehrung, die nun korrodieren kann. Daher ist die Kenntnis der Carbonatisierungsgeschwindigkeit im Beton unerlässlich, um die Dauerhaftigkeit einer Stahlbetonkonstruktion zuverlässig prognostizieren zu können. Diese hängt maßgeblich vom Carbonatisierungswiderstand des Materials ab. Um diesen Widerstand bestimmen zu können, werden sogenannte Schnelltests mit hohen (praxisfremden) CO₂-Konzentrationen durchgeführt. Unklar ist bisher, ob diese hohen Konzentrationen die natürlichen Vorgänge unverfälscht abbilden und Fehlprognosen ausgeschlossen werden können. In dieser Master's Thesis wurde daher der Einfluss von CO₂-Konzentration und CO₂-Druck auf das Ablaufen der Carbonatisierungsreaktion sowie das Porengefüge und die Phasenzusammensetzung von Mörteln untersucht. Es wurden Versuche mit 2, 3, 4 und 10 Vol.-% CO₂ unter atmosphärischen Druckbedingungen durchgeführt und zusätzlich als Referenz die natürliche Carbonatisierung beobachtet. Im Anschluss daran wurden Gasdruckversuche mit denselben

CO₂-Konzentrationen unter 1, 2 sowie 3 bar Gasdruck durchgeführt. Die Auswertung erfolgte anhand der Gewichtsveränderungen sowie der Änderung des Feuchtigkeitsprofils, der Porosität und des Phasenbestands der Proben vor und nach der Carbonatisierung.

Es zeigte sich, dass unter atmosphärischen Druckbedingungen höhere CO₂-Konzentrationen die Carbonatisierungsreaktion zwar beschleunigen, es jedoch aufgrund des schneller expandierenden Stoffraumes zu einer „Verstopfung“ des Porensystems kommt und daher die beschleunigte Carbonatisierung nicht vollständig ablaufen kann. Unter Überdruck kann diese Blockade im Porengefüge überwunden werden und die Proben carbonatisieren deutlich stärker.

4.2.4. Einfluss der Nachbehandlung auf die beschleunigte Carbonatisierung zementgebundener Baustoffe

Masterarbeit von Andrea Skora

Betreuer: Dipl.-Ing. Charlotte Thiel

Die Carbonatisierung gilt als altbekanntes Dauerhaftigkeitsproblem welches vor allem durch den Einsatz neuer Zemente und Betonzusammensetzungen als auch den kontinuierlichen Anstieg der natürlichen CO₂-Konzentration wieder aktuell ist. Es ist daher wichtig, mit einer effizienten Prüfmethode schnell und zuverlässig den Carbonatisierungswiderstand eines Betons bestimmen zu können. Derzeit wird der relative Carbonatisierungswiderstand nach der DIN 12390-10: 2012-07 bei natürlichen CO₂ Konzentrationen und einer 7-tägigen Nachbehandlung ermittelt. Dieser Normenteil wird momentan überarbeitet. Es wird diskutiert, das Prüfverfahren durch die Erhöhung der Gaskonzentration auf 3,20 Vol.-% zu beschleunigen, gleichzeitig aber die Nachbehandlungsdauer auf 28 Tage zu verlängern. Die Nachbehandlungsdauer nimmt nicht nur ein großes Zeitfenster der Gesamtprüfdauer in Anspruch, sondern hat auch einen erheblichen Einfluss auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit eines Betons. Bei der Prüfung von Betonen dürfen auch nachbehandlungsempfindliche Zemente nicht benachteiligt werden, zudem ist auch die Praxistauglichkeit im Auge zu behalten.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wurde im Rahmen der Masterarbeit durch die Variation verschiedener Nachbehandlungsdauern und Prüfung bei verschiedenen CO₂-Konzentrationen eine Empfehlung für eine optimale Nachbehandlungsdauer bei der Verwendung von Schnellprüfmethode entwickelt. Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass sich die Nachbehandlung vor allem in der Randzone der ersten 4 mm bemerkbar macht. Austrocknung ist in diesem Bereich stark ausgeprägt. Ein nachbehandlungsempfindlicher CEM III-Beton wies unabhängig von der gewählten Nachbehandlung einen um den Faktor 1,4 bis 3,2 geringeren Carbonatisierungswiderstand als ein nachbehandlungsunempfindlicher CEM I-Beton auf. Mit diesem Wissen ist es daher nicht zwingend notwendig, seine Nachbehandlungsempfindlichkeit durch eine stark verlängerte Nachbehandlung zu kompensieren. Während bei einer eintägigen Nachbehandlungsdauer die Carbonatisierungstiefen sowohl bei CEM I- als auch bei CEM III-Betonen um etwa 30 Prozent steigen, so sind bei der Verlängerung der Nachbehandlungsdauer auf 28 Tage nur beim CEM III-Beton Verbesserungen um etwa 25 Prozent zu beobachten. Da hier das Verhältnis zwischen benötigter Verlängerung der Nachbehandlungsdauer und dem erzielten Nutzen in einem starken Ungleichgewicht steht, wird empfohlen die 7-tägige Nachbehandlung beizubehalten. Auch im Hinblick auf die Übertragbarkeit in die Praxis ist diese Nachbehandlungsdauer empfehlenswert. Die optimale Beschleunigung der Carbonatisierungsprüfung konnte durch die Erhöhung der CO₂ Konzentration auf 3,20 Vol.-% erzielt werden. Diese führt bei den Versuchen zu einer Beschleunigung der natürlichen Carbonatisierung um das 5-fache bei gleichzeitiger Halbierung der Prüfdauer von 56 auf 28 Tage.

4.2.5. Untersuchung unterschiedlicher CO₂-Beaufschlagungszyklen hinsichtlich des Carbonatisierungswiderstands von Beton

Masterarbeit von Simon Krumscheid

Betreuung: Dipl.-Ing. Charlotte Thiel

Carbonatisierungsvorgänge in Bauteilen aus Stahlbeton können mögliche Korrosionsschäden nach sich ziehen. Da die ablaufenden Prozesse langwierig sind und Langzeitmessungen mit einem erheblichen Aufwand verbunden sind, wird die Notwendigkeit einer praxisrelevanten Schnellprüfmethode zur Bestimmung des Carbonatisierungswiderstands von Betonen deutlich.

In diesem Zusammenhang wurden beschleunigte Carbonatisierungsverfahren unter zyklischer CO₂-Beanspruchung entwickelt. Dafür wurden zylindrische Betonproben mit zwei verschiedenen Zementen abwechselnd bei Überdruck bzw. Atmosphärendruck einer CO₂-Konzentration von 2,0 Vol.-% ausgesetzt und nach 7 Versuchstagen geprüft. Ziel dabei war es eine übermäßige Feuchtbildung und Porenverdichtung im Zuge der beschleunigten Carbonatisierungsreaktionen zu verhindern und durch die Kombination aus Diffusion und Permeation von CO₂ einen möglichst optimalen Carbonatisierungsfortschritt zu generieren. Es konnte gezeigt werden, dass mithilfe zyklischer CO₂-Beanspruchungen eine deutliche Beschleunigung der Carbonatisierung gegenüber konstanten Prüfvarianten erzielt wird und dabei das Verhältnis der Carbonisierungstiefen der unterschiedlichen Betonsorten nahezu konstant bleibt. Während die Betone mit Portlandzement stets eine Verdichtung ihres Gefüges aufwiesen, vergrößerte sich die Struktur der Betonproben mit Hochofenzement nach siebentägiger CO₂-Einwirkung. Somit wurden die aus der Literatur bekannten Erkenntnisse zu natürlichen Carbonatisierungsvorgängen bestätigt. Lediglich die deutliche Carbonatisierung der C-S-H-Phasen in den Betonproben mit CEM I war nicht im allgemeinen Zusammenhang zu erklären. Dementsprechend ist zu hinterfragen, inwieweit die beschleunigten Vorgänge die natürliche Carbonatisierung widerspiegeln. Dazu gilt es in Anschlussuntersuchungen die Entwicklung des Phasenbestands genauer zu prüfen und Vergleiche zu Langzeitmessungen unter natürlicher Atmosphäre heranzuziehen.

4.2.6. Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Praxisverdichtung leichtverarbeitbarer Betone ins Labor

Masterarbeit von Axel Tobias Albert

Betreuung: Dipl.-Ing. Thomas Kränkel

In dieser Masterarbeit wurde versucht, zwei hauptsächliche Verdichtungsmethoden der leichtverarbeitbaren Betone ins Labor zu übertragen. Die Verdichtung durch Stochern und durch die Rüttelflasche wurden dazu physikalisch erfasst und anhand ihrer physikalischen Kenngrößen (im Wesentlichen Frequenz und Amplitude) mit dem Rütteltisch des Labors nachgestellt.

Für die Versuche wurden drei Betonen unterschiedlicher Viskosität hergestellt und diese in drei Konsistenzbereichen (F4/F5, F5/F6 und F6/SVB) geprüft. Die Betone wurden einerseits durch Stochern und andererseits mit der Rüttelflasche sowie vergleichend jeweils auch mit dem Rütteltisch verdichtet. Es wurden jeweils die Luftporengehalte am Frischbeton vor und nach der Verdichtung bestimmt und diese in Relation zu der Laborverdichtung mit dem Rütteltisch gesetzt. Die Unterschiede des Luftporengehaltes zwischen dem Rütteltisch und der gewählten Praxisverdichtungsart lagen nicht mehr als ±0,3 Volumenprozent auseinander. Um die Verdichtungsleistung vergleichen zu können wurde für das Stochern die ein-

gebrachte Arbeit und für die Rüttelflasche die Beschleunigung mathematisch ermittelt. Mit den ermittelten Werten wurde daraufhin die für den Rütteltisch nötigen Frequenzen und Zeiten bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass die vor den Versuchen durchgeführten Berechnungen ausreichend genau sind und es anhand der entwickelten Berechnung möglich ist die Verdichtungsarten mit dem Rütteltisch zu vergleichen und im Betonlabor dieselbe Verdichtung innerhalb der geforderten Grenzen nachzustellen. Zusätzlich kann auch eine Einschätzung abgegeben werden, welche Betone mit welcher Art der Verdichtung einzubringen sind.

4.3. AG Stahl und Korrosion

4.3.1. Bewertung des Korrosionsverhaltens von epoxidharzbeschichteter und / oder inhibierter Bewehrung im gerissenen Beton

Masterarbeit von Stefanie Zaglauer

Betreuung: Dr.-Ing. Sylvia Keßler, Hilke Verbruggen M.Sc. (VUB)

Die Masterarbeit untersuchte das Korrosionsverhalten beschichteter und / oder inhibierter Bewehrungsstähle im gerissenen Beton. Insgesamt wurden fünf unterschiedliche Serien (inhibierter Stahl, inhibiert und danach beschichteter Stahl, Inhibitor in die Epoxidharzbeschichtung hineingemischt, nur beschichteter Stahl und als Referenz unbeschichteter normaler Baustahl) mit je drei Probekörpern, also gesamt 15 Probekörper, hergestellt. Die Schichtdicke der manuell aufgetragenen Epoxidharzbeschichtung konnte zu 40 µm bestimmt werden. Die epoxidharzbeschichteten Systeme wurden mit einer bekannten Defektgröße in der Beschichtung versehen. Über Drei-Punkt-Biegung konnte Risse mit einer Rissbreite von 0,3 mm in den Betonprobekörper so eingebracht werden, dass diese die Anode kreuzten. Anschließend wurden die Proben im Rissbereich mit Chloridlösung einmal wöchentlich beaufschlagt. Der Schwerpunkt der Arbeit lag auf den elektrochemischen Untersuchungen zum qualitativen Vergleich des Korrosionsverhaltens der unterschiedlichen Systeme. Für den Vergleich wurden die elektrochemischen Kenngrößen Korrosionspotential, Treibspannung und Makrozellkorrosionsstrom herangezogen. Abgerundet wurden die Untersuchungen mit der numerischen Simulation der Systemen, um abzuschätzen, ob die wirksame Elektrodenoberfläche durch Ablösung der Epoxidharzbeschichtung gewachsen sein könnte und um den Einfluss des Elektrolytwiderstandes analysieren zu können.

Alle inhibierten und /oder beschichteten Betonstähle zeigten innerhalb der ersten 100 Tage Korrosionsaktivität, obwohl die gemessenen Chloridgehalte auf Höhe der Bewehrung relativ gering waren. Ein Grund für die frühe Korrosionsinitiierung könnte einerseits die Beschichtungsdicke von lediglich 40 µm sein, die entweder nicht wirksam den Stahl vom Elektrolyten abschirmen konnte oder durch die manuelle Applikation der Beschichtung die Adhäsion zu schwach war. Zum anderen war eventuell der Inhibitorengehalt nicht ausreichend, oder der Inhibitor ist nicht am Stahl haften geblieben. Der inhibierte und anschließend beschichtete Stahl zeigte das passivste Verhalten.

4.3.2. Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt von hochlegiertem Stahl (1.4003)

Masterarbeit von Michaela Brenner

Betreuung: Florian Hiemer, M.Sc.

Das Ziel dieser Masterarbeit war die Untersuchung und Analyse des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts des hochlegierten Stahls der Sorte 1.4003 (TOP 12). Im Zuge der Arbeit wurden dafür drei verschiedene Versuchsverfahren untersucht. Diese waren ein Korrosionstest nach ECISS/TC 104/WG3, ein potentiostatischer Halteversuch und ein diffusionsgesteuerter Korrosionstest ohne externe Polarisierung. Alle Versuche wurden an Mörttelektroden, sog. Lollipopproben, durchgeführt.

Der potentiostatische Halteversuch und der diffusionsgesteuerte Korrosionsversuch ohne externe Polarisierung lieferten bis zum Abschluss der Arbeit keine Ergebnisse, da diese Versuche nicht durch eine Zugabe von Chloride zum Anmachwasser in Kombination mit externer Polarisierung beschleunigt werden. Aus einzelnen Ergebnissen des diffusionsgesteuerten Korrosionsversuchs wurde jedoch bereits festgestellt, dass die Chloridkonzentration im Mörtel zunimmt.

Die Untersuchung des Stahls der Sorte B500B nach ECISS/TC 104/WG3 belegte die Vermutung, dass dieser Korrosionstest nur für Stähle mit einer geringeren Korrosionsneigung (sog. Edelstähle) geeignet ist. Schon bei einer Chloridzugabe von 0,1 M-%/Z wies einfacher Betonstabstahl (B500B) Korrosionsspuren auf, die auf Eigenkorrosionsprozesse zurückzuführen waren. Mit steigendem Chloridgehalt verstärkte sich der Korrosionsschaden. Flugrost, der bereits vor dem Einbau auf der Stahloberfläche vorhanden war, hatte keinerlei Einfluss auf das Korrosionsverhalten des Stahls. Für den Stahl der Sorte 1.4003 (TOP 12) ergab der Korrosionstest gemäß ECISS/TC 104/WG3 z.T. verschiedene Ergebnisse. Auf fast allen Proben der Stahls der Sorte 1.4003 (TOP 12) wurden linienförmig angeordnete Korrosionsspuren gefunden, die auf einen Eigenkorrosionsprozesse zurückgeführt wurden. Diese Korrosionsspuren bildeten sich an Stellen, an denen der Stahl eine veränderte Oberflächenstruktur aufwies. Diese veränderte Oberflächenstruktur könnte auf eine gestörte Gitterstruktur oder Fehler im Herstellungsprozess zurückzuführen sein.

Unter Ausschluss dieser Korrosionserscheinungen, die auch schon bei niedrigeren Chloridgehalten auftraten, bildete sich ab, dass der erste rein chloridinduzierte Korrosionsprozess bei einem zugemischten Chloridgehalt von 1,82 M-%/Z stattgefunden hatte. Bei diesem Chloridgehalt überschritt die gemessene Stromdichte einer Probe den Grenzwert von 80 mA/m² gemäß ECISS/TC 104/WG3. Die visuelle Inspektion der Probe zeigte zudem deutlich stärkere Korrosionsspuren als die der verbliebenen neun anderen. Somit kann dieser Wert als Anhaltspunkt für den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt angenommen werden. Ab einem Chloridgehalt von 3,0 M-%/Z war eine starke Zunahme der Korrosion bei mehreren Proben festzustellen. Es muss angemerkt werden, dass keine Probe den Korrosionstest gemäß ECISS/TC 104/WG3 auf Grund der visuellen Inspektion bestanden hat. Jedoch sind aufgrund der bereits genannten Oberflächenveränderung weitere Untersuchungen notwendig um eine differenzierte Bewertung des Werkstoffs ohne Fehlstellen zu ermöglichen.

Ein Gesamtvergleich der Versuche war nicht möglich, da der potentiostatische Halteversuch und der diffusionsgesteuerte Korrosionsversuch ohne externe Polarisierung noch keine belastbaren Ergebnisse lieferten. Somit war es noch nicht möglich den Einfluss der Testverfahren auf den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt zu bewerten.

4.3.3. Numerische Untersuchungen zum Korrosionsverhalten von Stahl in gerissenem kurzzeitig chloridbelastetem Stahlbeton

Masterarbeit von Denise Laura Jakob

Betreuung: Florian Hiemer, M.Sc.

Diese Arbeit entstand im Nachgang des Forschungsvorhabens „Korrosionsverhalten von Stahl in Beton bei Anwendung des Instandsetzungsprinzips W-CI bei gerissenem chloridbelasteten Beton“. Das Ziel des Projekts war es, die Vorgänge der Korrosion in gerissenem kurzzeitig chloridbelasteten Beton zu erfassen, zu analysieren und zu bewerten. Insbesondere sollte geklärt werden, wie sich eine nach Korrosionsinitiiierung auf dem Beton applizierte Oberflächenschutzschicht auf die im Makroelement ablaufenden Prozesse auswirkt. Es wurden 40 Stahlbetonprobekörper aus Portland- und Hochofenzementbeton hergestellt, an denen die wichtigsten Korrosionskenngrößen über einen Zeitraum von fast drei Jahren aufgezeichnet wurden. Bei allen Proben erwies sich der anodische Teilprozess als maßgebender Kontrollfaktor. Dass der Korrosionsstrom zum Erliegen kam, konnte letztlich auf den Anstieg des anodischen Polarisationswiderstands zurückgeführt werden. Aus den Messergebnissen wurden zudem erste Eingangsgrößen für numerische Simulationen an praxisnahen Bauteilgeometrien gewonnen.

Im Rahmen der Masterarbeit wurden experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt, mit denen das anodische Polarisationsverhalten erfasst, analysiert und bewertet werden sollte. Für die numerischen Berechnungen wurde das Programm Comsol Multiphysics verwendet.

Zu Beginn wurden an Rückstellproben des Experimentalprogramms anodische und kathodische Stromdichte-Potentialkurven bestimmt und deren Eignung als Eingangsgrößen in der numerischen Simulation von aktiven Makroelementen beurteilt. Dafür wurde ebenfalls der Datenbestand des Forschungsvorhabens tiefergehend ausgewertet. Es zeigte sich, dass die Anodenkinetik im Experimentalprogramm einer starken Veränderung unterlag, welche an die veränderliche Expositionssituation (unbeschichtet mit Chloriden, beschichtet ohne Chloride) gebunden war und somit nicht anhand einer einzelnen, am Ende des Lebenszyklus bestimmten Anodenkinetik beschrieben werden konnte.

Unter diesem Aspekt wurden zwei verschiedene Ansätze untersucht, mit denen die Anodenkinetik numerisch beschrieben werden sollte. Um die Eignung dieser beiden Ansätze und der darin verwendeten elektrochemischen Parameter zu überprüfen, wurden acht ausgewählte Laborproben numerisch modelliert. Die Makroelementströme dieser Proben wur-

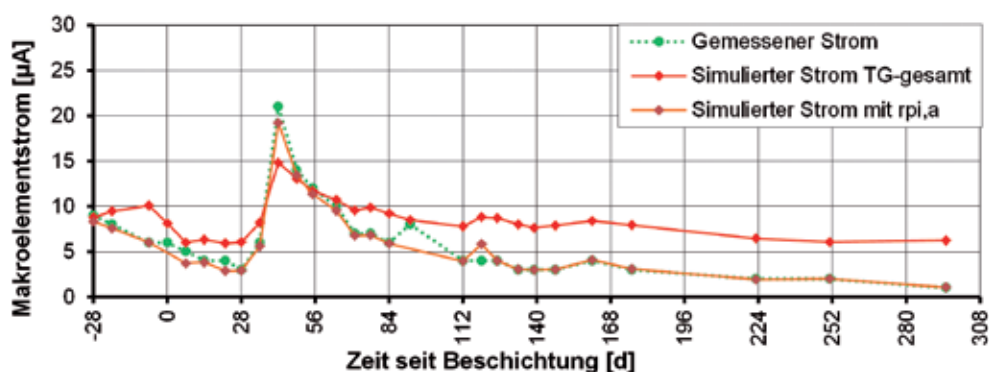


Abbildung 1:
Gegenüberstellung von gemessenem und simuliertem Strom am Beispiel eines Probekörpers

den für verschiedene Zeitpunkte des Versuchsprogramms simuliert und den gemessenen Strömen gegenübergestellt.

Für den ersten Ansatz wurden aus den Ergebnissen der wöchentlichen Depolarisationsmessungen der Proben und den zum Messzeitpunkt ermittelten Strömen, Stromdichte-Überspannungskurven für beide Betonzusammensetzungen bestimmt. Mit Hilfe einer Regressionsrechnung, der die Tafelgleichung als mathematische Funktion zugrunde gelegt wurde, konnten anodische Tafelsteigungen und Austauschstromdichten bestimmt werden. Mit diesen konnte der gesamte Zeitraum aktiver Korrosion beschrieben werden. Da sich zeigte, dass diese konstanten Parameter nicht dazu geeignet waren, die veränderliche Anodenkinetik hinreichend abzubilden, wurde ein zweiter Ansatz untersucht. Um hierbei die Anodenkinetik individuell für jeden Messtermin berücksichtigen zu können, wurde die Stromdichte-Spannungsbeziehung als vereinfacht lineare Funktion, in die der spezifische, integrale Polarisationswiderstand ($r_{pi,a}$) als Funktionsparameter eingeht, angenommen. Mit dieser Methode konnten deutlich bessere Simulationsergebnisse für den Makroelementstrom erzielt werden. (Abb. 1)

Abschließend sollte in einer Parameterstudie an zwei praxisnahen Bauteilgeometrien untersucht werden, wie sich eine zeitliche Veränderung der Anodenkinetik auf die Entwicklung der Makroelementkorrosion auswirkt. Für alle Proben, die auch nach der Beschichtungsmaßnahme aktive Korrosion zeigten, konnte ein zeitabhängiger Anstieg von $r_{pi,a}$ festgestellt werden. Um den Anstieg von $r_{pi,a}$ nach der Beschichtung numerisch berücksichtigen zu können, wurden Regressionsgeraden anhand verschiedener für $r_{pi,a}$ festgestellter Streubänder berechnet. Je nach Streuband repräsentierten die Geraden einen unterschiedlich starken Anstieg des Polarisationswiderstands, wobei dieser über den Versuchszeitraum hinaus extrapoliert werden konnte.

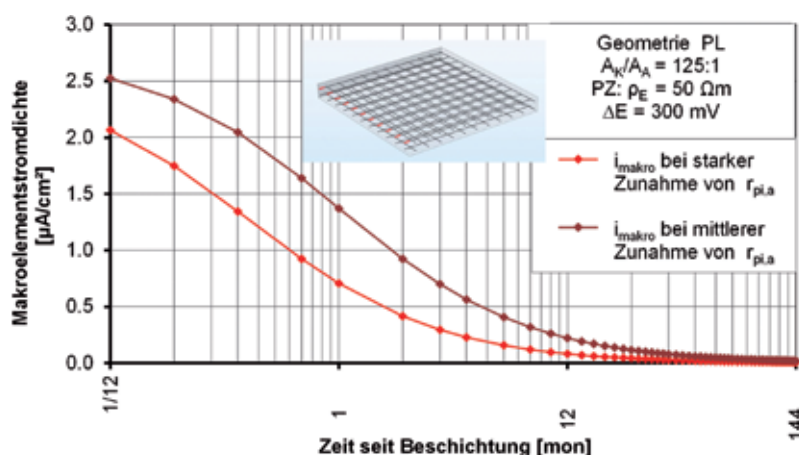


Abbildung 2:
Berechnete Stromdichten der
liniengestützten Platte

Bei den modellierten Geometrien handelte es sich um eine liniengestützte und eine punktgestützte Platte, welche mit den elektrochemischen Parametern aus dem Versuchszeitraum belegt wurden. Je Simulationsdurchlauf wurden die Ströme und Stromdichten für einen vorher festgelegten Zeitraum berechnet. Dabei wurde für jede neue berechnete Stützstelle der anodische Polarisationswiderstand entsprechend der gewählten Regressionsgerade erhöht. Die Werte der Treibspannungen (ΔE) und der Elektrolytwiderstände (ρ_E) wurden dabei konstant gehalten.

In die Auswertung der Simulationsergebnisse wurden sowohl elektrochemische als auch geometrische Parameter miteinbezogen. Als wesentliche Erkenntnis aus der Parameterstudie ging hervor, dass mit Ausnahme der Treibspannung sowohl elektrochemische als auch geometrische Einflüsse letztlich durch den ansteigenden Polarisationswiderstand überlagert wurden, da dieser zum dominierenden Kontrollfaktor im System wurde.

4.4. AG Chemie

4.4.1. Untersuchung der Interfacial Transition Zone mittels Laser-Ablation-ICP-MS

Masterarbeit von Dominik Bauer

Betreuung: Marco Decker, M. Sc., Dr. rer. nat. Harald Hilbig

Ziel dieser Arbeit war, die Interfacial Transition Zone (ITZ) mithilfe von LA-ICP-MS zu untersuchen. Hierzu wurden Probekörper aus CEM I 42,5 R mit einem Wasserzementwert von 0,3 und 0,4 hergestellt sowie vier verschiedene Gesteinsstreifen in die Zementprismen eingelegt, um unterschiedliche ITZ zu erzeugen. Die verwendeten Gesteinsarten sind Basalt, Carbonat, Granit und Granodiorit.

Die Gesteine wurden mithilfe einer Präzisionssäge glatt geschnitten und als Quader mit einem Querschnitt von 15 x 15 mm² auf PVC-Auflagergestellen in die Schalungskörper eingeklebt. Hierdurch wurde im Vergleich zu herkömmlicher Gesteinskörnung eine genau definierte und stärker ausgeprägte ITZ hergestellt. An diesen Probekörpern sollte dann mittels LA-ICP-MS die Elementverteilung sowohl im Bereich der ITZ als auch im ungestörten Zementstein gemessen werden. Ziel war es hierbei, aufgrund der Elementunterschiede im Bereich der ITZ erhöhte Aluminium- und Schwefelwerte sowie niedrigere Siliziumwerte zu messen als im ungestörten Zementstein. Aufgrund der hohen Inhomogenität von hydratisiertem Zement gelang dies nur teilweise. Da zur Messung der ITZ mittels LA-ICP-MS diese frei zugänglich sein muss, wurden verschiedene Methoden zur Probenpräparation ausprobiert. Als am effektivsten erwies sich das Freilegen der ITZ durch gezieltes Schwächen der Probekörpergeometrie und einem abschließenden Losbrechen der ITZ vom Gesteinsstreifen.

Zur Validierung der Ergebnisse der LA-ICP-MS wurden zusätzlich Messungen mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops mit angeschlossenen EDX durchgeführt. Hier zeigte sich, dass für die Feststellung der durchschnittlichen Elementverteilung im Probekörper mehrere Messungen durchgeführt werden müssen, da die Messmethode eine sehr hohe Ortsauflösung hat und einzelne Messungen teilweise hohe Peaks in den Elementkonzentrationen aufweisen, die nicht mit der Theorie übereinstimmen. Alternativ wurden daher für eine bessere Standardisierung die Messwerte der LA-ICP-MS von Calcium verwendet. Anschließend wurden weitere Probekörper in eine dreiprozentige Natriumchloridlösung gelegt, um mithilfe von Natrium und Chlor als Marker den Ionentransport in der ITZ und dem ungestörten Zementstein zu vergleichen. Im Bereich der ITZ sollten sich die Ionen aufgrund der erhöhten Porosität weiter und schneller ausbreiten als im ungestörten Zementstein. Die Probekörper wurden wieder mit vier verschiedenen Gesteinsarten sowie Wasserzementwerten von 0,3 und 0,4 hergestellt. Anschließend wurden diese jeweils einmal 7 Tage lang der NaCl-Lösung ausgesetzt und einmal 26 Tage (Bild 1). Mittels LA-ICP-MS konnte die ITZ in diesen Zementprismen zweifelsfrei nachgewiesen werden. Weiterhin wurde der unterschiedliche Einfluss des Wasserzementwertes, der Gesteinsart sowie der Dauer der NaCl-Belastung auf die ITZ und den ungestörten Zementstein untersucht. Bis auf die Gesteinsart hatten alle untersuchten Eigenschaften erkennbaren Einfluss auf die Ausprägung der ITZ. Die Natriumwerte konnten nicht direkt ausgewertet werden, da hier der Blindwert zu hoch ist. Als Ersatz wurden die Kaliumwerte untersucht, da Natrium Kalium theoretisch beim Eindringen in den Probekörper aufgrund der gleichen Ladung verdrängt.



Schematischer Aufbau der Natriumchloridversuchs

Die Messwerte der LA-ICP-MS wurden, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, auf das jeweils ablatierte Volumen bzw. den ablatierten Querschnitt bezogen. Um topographische Veränderungen der Proben, die die Fokussierung des Lasers nicht kompensieren konnte rechnerisch zu kompensieren, wurden die Messwerte auf den Calciumwert bezogen. Mit 55 - 65 M.-% im Zementstein eignet sich Calcium hierzu sehr gut.

4.5. AG Zerstörungsfreie Prüfung

4.5.1. Entwicklung eines Messkonzeptes zur Charakterisierung von Ultraschallsensoren

Masterarbeit von Thomas Menacher (MW)

Betreuung: Fabian Malm M.Sc., Jan-Carl Grager M.Sc.

Die Richtcharakteristik von Ultraschallsensoren ist ein Maß der Empfindlichkeit in Abhängigkeit des Winkels. Sie hat unter anderem direkten Einfluss auf die Signalauswertung und auf die digitale Aufbereitung von Signalen aus Phased-Array-Ultraschallprüfköpfen und Schallemissionsanalysen. Die Richtcharakteristiken von Ultraschallsensoren werden üblicherweise nicht vom Hersteller bereitgestellt und müssen daher vom Anwender selbst ermittelt werden. Um den Aufwand gering zu halten, eignen sich analytisch hergeleitete Berechnungsformeln, mit welchen die Richtcharakteristik bei bekannten Schwingerparametern berechnet werden können. Während in der Literatur für Einzelelemente von Phased-Array-Prüfköpfen verschiedene bisher kaum experimentell validierte Berechnungsformeln existieren, gibt es für Einzelschwingerprüfköpfe eine weit verbreitete Formel nach Krautkrämer & Krautkrämer (1986). Zusätzlich ist bei Einzelschwinger die Berechnung von Divergenzwinkeln geläufig.

In dieser Arbeit wird ein Versuchsaufbau zur Richtcharakteristikbestimmung, angelehnt an die DIN 12668-2 (2010), vorgestellt. Mithilfe des Aufbaus werden die Richtcharakteristiken verschiedener Einzelschwinger- und Phased-Array-Ultraschallprüfköpfe vermessen. Die daraus gewonnen Messergebnisse werden mit den Ergebnissen von Berechnungsformeln verglichen. Es wird experimentell bestätigt, dass der Berechnungsansatz von Miller & Pursey (1954) gut auf die experimentell bestimmte Richtcharakteristik von Phased-Array-Einzelelementen zutrifft, während die Berechnungsformel für den Divergenzwinkel von Einzelschwingern größere Differenzen aufweist. Weiterhin wird gezeigt, dass die Berechnungsformel (vgl. Krautkrämer & Krautkrämer (1986)) für Einzelschwinger gute Ergebnisse liefert.

4.5.2 Operational Modal Analysis der Tragstruktur von Windkraftanlagen

Masterarbeit von Yifang Zhang

Betreuung: Max Botz, M.Sc.

Herr Yifang Zhang hat 2017 im Rahmen des MISTRALWIND-Projekts seine Masterarbeit zum Thema Operational Modal Analysis (OMA) erfolgreich abgeschlossen. Die Besonderheit des Verfahrens besteht darin, modale Parameter wie Eigenfrequenzen, Eigenschwingformen und Dämpfung bestimmen zu können, nur auf Basis der gemessenen Strukturreaktion. Im Gegensatz zur klassischen Modalanalyse ist die Kenntnis der Anregung nicht erforderlich. Die benötigten Algorithmen zur Bestimmung sind dafür deutlich komplexer. Herr Yifang Zhang hat in seiner Arbeit verschiedene Verfahren zur OMA in Matlab implementiert und angewendet auf Schwingungsmessdaten, die an dem 140 m hohen Turm einer 3 MW Windkraftanlage bei Neumarkt in der Oberpfalz erhoben wurden. Neben der Implementierung der Verfahren selbst hat er auch weitere Methoden zur automatisierten

Auswertung großer Datensätze verwendet. Mithilfe dieser Verfahren konnte er große Datenmengen auswerten und damit die modalen Parameter des Turms unter der Angabe von Unsicherheiten bestimmen. Die Ergebnisse seiner Arbeit werden weiter verwendet, um ein hochgenaues FEM-Modell zu validieren mit dessen Hilfe lokale Materialspannungen im Zeitverlauf berechnet werden können. Diese dienen wiederum der Beurteilung des Ermüdungszustands des Bauwerks, womit die Restlebensdauer der Tragstruktur abgeschätzt werden soll.

4.5.3. Optimization of a Reverse Engineering and Part Scanning Workflow by Means of Computed Tomography

Masterarbeit von Fabian Bauer

Betreuung: Dipl.-Ing. Phillipp Jatzlau

Reverse Engineering – das systematische Vorgehen zur Analyse eines Bauteiles mit der Absicht die wichtigsten geometrischen Merkmale zu identifizieren und zu extrahieren – stellt neue Möglichkeiten bei der Wiederherstellung und Reparatur von hochpreisigen Maschinenkomponenten in Aussicht. Beispielsweise können geeignete Verfahren es ermöglichen, verlorene oder unzugängliche Modelle für Ersatzteile von Turbinenschaufeln zu erstellen, welche bislang bei Instandsetzungsarbeiten häufig nicht verfügbar sind, was die Wartung maßgeblich erschwert. Hierfür wurde die prinzipielle Machbarkeit bereits durch Studien nachgewiesen. Im letzten Jahrzehnt hat die Verwendung von Computertomographie (CT) als Werkzeug für die Vermessungstechnik zunehmend an Bedeutung gewonnen, wobei der Weltmarkt 2017 voraussichtlich einen Umfang von etwa 600 Millionen US-Dollar erreichen wird. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt steht kein anderes bildgebendes Verfahren zur Verfügung, welches in der Lage ist die Innenstruktur eines Objektes vollständig und zerstörungsfrei abzubilden. Daher bietet sich die industrielle CT als ideale Methode für das Reverse Engineering und die dimensionelle Vermessung von Bauteilen an, für die nur geringes Vorwissen vorliegt. Nachteilig ist hingegen, dass entsprechende Verfahren lediglich sehr beschränkt hinsichtlich der Durchstrahlbarkeit und Geometrie der Bauteile und den Anforderungen an die Genauigkeit anwendbar sind.

Etwa zeitgleich haben generative Fertigungsverfahren einen Entwicklungsstand erreicht, der ihren Produktiveinsatz bei der Erzeugung von Metallbauteilen in lasttragenden und funktionserfüllenden Komponenten zulässt. Nichtsdestotrotz sind kritische Bauteile auf eine akribische Überprüfung der Fertigungstoleranzen angewiesen, sodass detaillierte Blaupausen und flächendeckende Qualitätskontrollen zwingend erforderlich sind.

Die vorliegende Master's Thesis zielt darauf ab, diese beiden Prozesse zu kombinieren und hierdurch ein Framework zu schaffen, welches es ermöglicht, die Geometrie eines Werkstücks durch den Einsatz von CT und optischen Scans präzise zu erfassen und mittels Selektivem Laserstrahlschmelzen oder anderen generativen Fertigungsverfahren ein funktionsfähiges Duplikat zu fertigen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden zwei verschiedene Methoden empfohlen, die in der Lage sind bisher bestehende Einschränkungen und Schwächen der konventionellen CT in Bezug auf Auflösung und Durchstrahlbarkeit zu reduzieren. Diese basieren auf der Multi-Energie-Computertomographie sowie einem zerstörenden Ansatz zur Reduktion der Durchstrahlungsweglänge im Bauteil. Ebenso untersucht wird der vollständige Arbeitsablauf zur Erstellung der Replik eines komplexen Turbinenschaufelblatts sowie weiteren Testbauteilen. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf entstehenden Produktionsabweichungen, Messungenauigkeiten sowie deren Wechselwirkungen. Abhängig vom betrachteten Bauteilabschnitt ist es gegenwärtig möglich, eine Fertigungsgenauigkeit für die Replik zwischen $18\text{ }\mu\text{m} \pm 87\text{ }\mu\text{m}$ und $95\text{ }\mu\text{m} \pm 54\text{ }\mu\text{m}$ im Vergleich

zum Originalbauteil zu erreichen. Die Masterarbeit wurde in Kooperation mit der Siemens AG in Neuperlach durchgeführt.

4.5.4. Entwicklung eines neuen Messkonzepts zur luftgekoppelten Ultraschallprüfung von Faserverbundwerkstoffen

Masterarbeit von Jakob Gamper

Betreuung: Dipl.-Ing. Philipp Jatzlau

Die Prüfung von Faserverbundwerkstoffen mit luftgekoppeltem Ultraschall bietet eine Reihe von Vorteilen, stellt aber auch besondere Herausforderungen an die häufig piezoelektrisch-basierende Empfängertechnik. Durch ein neuartiges, optisches Mikrofon mit breitbandiger Empfangscharakteristik (Eta 250 Ultra) ist zum einen eine verbesserte Auflösung möglich, zum anderen bieten sich neue Prüfmöglichkeiten. In dieser Arbeit wurde das Potential des optischen Mikrofons zur luftgekoppelten Ultraschallprüfung in Transmissionsanordnung an Proben aus monolithischem CFK und an CFK-Sandwichproben untersucht. Dazu wurde zunächst ein Einblick in die physikalischen Grundlagen der Ultraschallprüfung – insbesondere mit Bezug zur Ankopplung mittels Umgebungsluft – gegeben. Anschließend wurden die grundlegenden Komponenten und Prüfkonzepte der Ultraschalltechnik vorgestellt, dabei wurden die Besonderheiten der luftgekoppelten Prüfung eingehend behandelt. Nach der Beschreibung des USPC-AirTech-4000-Prüfsystems vom Ingenieurbüro Dr. Hillger und des optischen Mikrofons Eta 250 Ultra der Firma Xarion Laser Acoustics GmbH, sowie dem Zusammenschluss beider Systeme wurden die verwendeten Prüfkörper behandelt. Geprüft wurden monolithische CFK-Proben mit verschiedenen Impactschäden und Flachbodenbohrungen, sowie CFK-Sandwichstrukturen, teils mit künstlich eingebrachten Fehlstellen. Um spezifische Einflüsse eines einzelnen Senders auszuschließen, wurden verschiedene Sendeprüfkopftypen für die Untersuchung verwendet – unter anderem piezoelektrische Sender, Ferroelektret-Sender aus zellulärem Polypropylen und ein thermo-akustischer Wandler.

In den Untersuchungen zeigte sich die Fähigkeit des Eta 250 Ultra, kleine Strukturen mit höherem Detailgrad auflösen zu können, als dies mit herkömmlichen Empfängern möglich ist. Auch Beugungs- und Interferenzmuster konnten in C-Bildern detailliert abgebildet werden. Flachbodenbohrungen in einem 22-mm-dicken CFK-Laminat mit einem Durchmesser von 2 mm konnten mit einer Prüffrequenz von 200 kHz problemlos aufgelöst werden, Bohrungen mit 1 mm Durchmesser erzeugten noch kleine Signaländerungen. Beim Einsatz resonanter Sendeprüfköpfe konnte eine IIR-Bandpassfilterung die Bildqualität und das Signal-Rausch-Verhältnis signifikant verbessern. Dennoch musste bei stark schallschwächenden Werkstoffen (wie z. B. CFK-Sandwichproben) auf eine niedrigere Prüffrequenz von 75 kHz ausgewichen werden. Es wurde gezeigt, dass Umwelteinflüsse, wie z. B. laute, äußere Schallquellen, abrupte Temperatur- oder Luftdruckschwankungen sich auf das Messergebnis auswirken können. Eine Untersuchung des Frequenzganges zeigte Anzeichen eines Übersteuerns bei hohen Schallpegeln mit steilen Signalflanken. Die gewonnenen Erkenntnisse können schließlich als Ausgangspunkt weiterführender Untersuchungen dienen. Die Masterarbeit entstand in Kooperation mit der Siemens AG in Neuperlach.

4.5.5. Optimization of ultrasonic imaging with phased array full matrix capture

Masterarbeit von Marek Listl

Betreuung: Dipl.-Ing. Philipp Jatzlau

Die Nachbearbeitung von Ultraschallmessdaten ermöglicht eine Erweiterung des Messbereiches sowie eine Verbesserung der Nachweisbarkeitsgrenzen. Die dabei immer häufi-

ger verwendete Datenerfassungsmethode Full Matrix Capture (FMC) nimmt mittels eines Phased Array Prüfkopfes die größtmögliche Anzahl an unabhängigen A-Bildern auf. Zur Auswertung dieser umfangreichen Rohdaten kann die Total Focusing Method (TFM) herangezogen werden. Diese erzeugt Ergebnisbilder des Querschnitts unterhalb des Prüfkopfs durch Verschieben und Aufsummieren der Signale. Dabei kommt es zu destruktiver Interferenz von zufälligem Rauschen und konstruktiver Interferenz von ortsgebundenen Fehlerechos. Das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) kann dadurch deutlich erhöht werden. Bei Messungen an carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) muss zusätzlich die winkelabhängige Schallgeschwindigkeit beachtet werden. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurden Parameter entwickelt, um die Messqualität von TFM-Ergebnisbildern zu bestimmen. Es konnte gezeigt werden, dass für die Rauschbestimmung in Bildern das quadratische Mittel anstelle der Standardabweichung verwendet werden sollte. Daraus kann das SNR als Qualitätsmaß abgeleitet werden.

Zur Bewertung der geometrischen Genauigkeit des Messsystems wurde der relative Array Performance Indicator (API) verwendet. Dieser stellt die Fehlergröße in Relation zu einem relevanten Größenmaß der erfassten künstlichen Fehlstelle. Die aus der Computertomographie bekannte Modulationsübertragungsfunktion (MTF) konnte für die Messung der Konturschärfe bzw. der räumlichen Auflösung an rauscharmen TFM-Ergebnisbildern angewendet werden. Um das winkelabhängige Geschwindigkeitsprofil zu erfassen, wurde die Backwall Reflection Method (BRM) mit einer automatisierten Auswertung angewendet. Anhand dieser wurde auch der Homogenisierungsansatz, bei welchem der Mehrschichtverbund des CFK-Laminates durch ein homogenes anisotropes Material angenähert wird, validiert. Zudem konnten anhand von BRM-Messungen die transversalisotropen Eigenschaften quer zur Faserrichtung von unidirektionalen Lagenaufbauten verifiziert werden. Zur Messung der Richtcharakteristik von einzelnen Wandlerelementen in CFK wurde der Prüfkopf quer über eine Querbohrung bewegt und ein Element im Impuls-Echo-Modus betrieben. Durch das richtungsunabhängige Reflektionsverhalten von Querbohrungen ergeben sich so unterschiedliche Auftreffwinkel.

Letztlich konnte die Wirksamkeit von einem Tiefenausgleich für die bildgebende Ultraschallmessung an CFK gezeigt werden. Dabei ist es wichtig, dass die Empfangsverstärkung auf das Analogsignal angewendet wird und die Erfassung der Ausgleichskurve anhand adäquater Reflektoren erfolgt.

5. Veranstaltungen



Bilder: Die Fotos stammen aus dem Film "TUM zeigt 3D-Druck-Verfahren auf der Messe BAU 2017" des Youtube-Kanals TUMuenchen1.

5.1. Weltleitmesse für Architektur, Materialien und Systeme

3D-Druck-Forschung auf der BAU 2017

Additive Fertigung von Beton im cbm und an der TUM

Gleich zu Beginn des Jahres 2017 konnten Wissenschaftler des cbm ein erstes Veranstaltungshighlight wahrnehmen: Dr. Dirk Lowke und Daniel Weger, M.Sc., folgten der Einladung des InformationsZentrum Beton (IZB), deren Präsentationsstand auf der BAU 2017 in München zu bereichern. Zu den Kernaufgaben des IZB gehört die Imageförderung für zementgebundene Bauweisen. Da gezielt auch der Einsatz innovativer Produktionsverfahren gefördert wird, passt die Präsentation der 3D-Druck-Forschung von Beton ganz hervorragend zum Messestand des IZB.

„Die BAU ist die Weltleitmesse für Architektur, Materialien und Systeme. Hier kommen alle zusammen, die international am Planen, Bauen und Gestalten von Gebäuden beteiligt sind: Architekten, Planer, Investoren, Industrie- und Handelsvertreter, Handwerker u.v.m. Hier treffen sich zukunftsorientierte Hersteller mit dem interessierten Fachpublikum. Im Zentrum ihres Interesses stehen neue Techniken, neue Materialien und neue Anwendungsmöglichkeiten, die so auch in der Praxis umsetzbar sind. Die Besucher erleben die Zukunft des Bauens hautnah.“ (www.messe-muenchen.de)

Auf dem Messestand zeigten Dr. Dirk Lowke und sein wissenschaftlicher Mitarbeiter, Daniel Weger, zusammen mit ihren Kollegen vom Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TUM, Dr. Klaudius Henke und Daniel Talke, M. Sc., die 3D-Betondruck-Verfahren ihrer

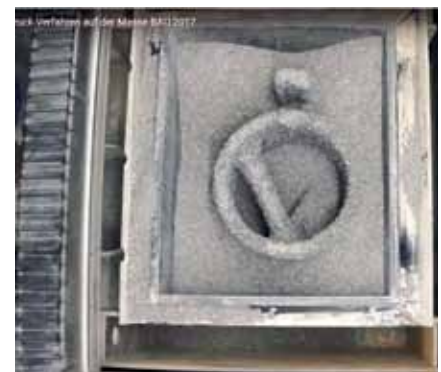
Forschungsarbeit anhand von Videos und anschaulichen Demonstratoren. Sie forschen gemeinsam an drei unterschiedlichen Verfahrensvarianten des 3D-Drucks mit Beton: Beim Extrusionsverfahren werden Zement, Gesteinskörnung und Wasser vorab gemischt und anschließend einzelne Schichten durch Ablegen von Frischbetonsträngen gedruckt:



Beim Verfahren des selektiven Bindens werden die Komponenten erst beim Druckvorgang gemischt. Hierbei unterscheidet man zwischen zwei Varianten: In der ersten Variante wird fließfähige Zementsuspension in einzelne Schichten aus Gesteinskörnung eingebracht:

Bild 1: Extrusion

Bild 2-4: Paste-Intrusion



Und bei der zweiten Variante ist es lediglich Wasser, evtl. unter Beigabe von Additiven, das auf Schichten aus Gesteinskörnung und Zement aufgebracht wird:

„Additive Fertigung kommt ins Bauwesen – das ist jetzt nicht mehr aufzuhalten“. (D. Talke)

Durch diese anschauliche Darstellung und die stete Präsenz der Forscher war der Andrang aus der Industrie am Messestand groß. Obwohl der innovative und fortschrittliche 3D-Druck im Bauwesen noch in den Kinderschuhen steckt, wurden die vorliegenden Ergebnisse mit höchstem Interesse begutachtet. Wer auch immer im Bereich Design, Schalungen oder Zementherstellung tätig ist, wirft zur Zeit ein Auge auf den 3D-Druck. Denn additive Fertigung ermöglicht passgenaue Herstellung von einzelnen Teilen sowie formoptimierten Ersatz oder Ergänzung von Einzelelementen. Sehr schön zu sehen war das an einem Prototyp „Vorbild Vogelknochen“: Es wurde ein 20 cm hoher Quader mit dem Verfahren „selektives Binden“ mit einer sehr dünnen Betonwand und filigranen Verstrebungen im Inneren gedruckt. Als Vorbild dienten Vogelknochen. Diese weisen trotz ihrer dünnen und leichten Struktur eine große Stabilität auf. Die am Prototypen vorgenommenen Belastungstests zeigten, dass die Stabilität ebenso hoch ist wie bei gegossenem Beton. Die bionische Bauweise hält gleichermaßen der Kraft von 50 Newton stand.

Wegen der sehr speziellen Fragen, die die Besucher den Wissenschaftlern stellten, war es dem Forscherteam möglich, bereits hier auf der BAU Potenziale des Einsatzes der additiven Fertigung mit Besuchern und Firmen auszuloten. Die Möglichkeit, die real produzierten Bauteile anfassen zu können und die Filme der Herstellung anzuschauen, machten die Forschung greifbar und erlebbar.



Bild 5: Cement Activation



Bild 6: D. Weger mit Prototyp "Vogelknochen" (Designer: Oliver Tessin)



5.2. Lehrgang „Potentialfeldmessungen“

28.-30.06.2017 cbm, München

Im Juni 2017 war das Centrum Baustoffe und Materialprüfung erstmals der Ausrichter vom „Lehrgang zum Erwerb des Sachkundenachweises zur Durchführung von Potentialfeldmessungen“ für die Gesellschaft für Korrosionsschutz (GfKORR e.V.) und die Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP).

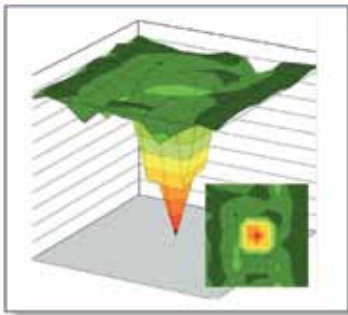
Unter der Leitung von Frau Dr. Keßler und in Zusammenarbeit mit Herrn Ebell von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung konnten in dem voll ausgebuchten Lehrgang den Teilnehmern die theoretischen Hintergründe und die praktische Anwendung der Potentialfeldmessung vermittelt werden. Beide Bestandteile, Theorie und Praxis, wurden abschließend am 30.06. geprüft, bevor den erfolgreichen Teilnehmern das Zertifikat zur Sachkunde ausgehändigt wurde.

Erstmals kam unser Referenzprobekörper aus Stahlbeton zum Einsatz, mit dem künstliche Korrosionsstellen zielgerichtet erzeugt werden können, die vergleichbare Potentialfelder ausbilden wie natürlich korrodierende Bewehrung im Beton. So konnte an diesem Probekörper die Potentialfeldmessung geübt werden. Im Zuge der praktischen Prüfung hat jeder Teilnehmer seine Fähigkeiten an einem für ihn individuell eingestellten Potentialfeld bewiesen.



Veranstalter: GfKORR – Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V.
Gastgeber: Centrum Baustoffe und Materialprüfung, TU München
In Zusammenarbeit mit:
BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
Institut für Bauforschung (ibac), RWTH Aachen
DGZfP Ausbildung und Training GmbH

Lehrgang zum Erwerb des Sachkundenachweises zur Durchführung von Potentialfeldmessungen



Programm, 28.06.2017

Begrüßung und Einführung
10:00 Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen, cbm
Centrum Baustoffe und Materialprüfung,
Technische Universität München

Grundlagen

Korrosion von Stahl in Beton
10:15 Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen, cbm
Centrum Baustoffe und Materialprüfung,
Technische Universität München

Elektrochemische Messungen
11:15 M. Eng. Dipl.-Ing. (FH) Gino Ebell,
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM), Berlin

12:00 Mittagspause

Potentialfeldmessung

Vorstellung der Messgeräte
(Einzel-, Rad-, 4-Rad-Elektrode)
13:00 **Elektrochemische Messung**
an „Kleinprüfkörpern“
13:30 **Das B3-Merkblatt - Übersicht**
14:30 M. Eng. Dipl.-Ing. (FH) Gino Ebell,
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM), Berlin
Vorbereitende Maßnahmen zur
Potentialfeldmessung in der Praxis
15:30 Bewehrungskontaktierung, Messraster
Durchgangswiderstand, elektrolytische
Ankopplung
16:15 **Vorführung der Potentialfeldmessung**
16:45 Ende

Programm, 29.06.2017

Einordnung der Potentialfeldmessung in
das Konzept der Bauwerksdiagnose
09:00 Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen, cbm
Centrum Baustoffe und Materialprüfung,
Technische Universität München

Gruppe 1
09:45 Potentialfeldmessung

Gruppe 2
09:45 Begleitende Untersuchungen im
Rahmen einer Bauwerksdiagnose
(an Kleinprüfkörpern)

11:45 Mittagspause

Gruppe 1
12:45 Begleitende Untersuchungen im
Rahmen einer Bauwerksdiagnose
(an Kleinprüfkörpern)

Gruppe 2
12:45 Potentialfeldmessung
Einflussfaktoren auf die
Potentialfeldmessung
14:45 Dr.-Ing. Sylvia Keßler, cbm
Centrum Baustoffe und Materialprüfung,
Technische Universität München

Auswertung und Berichterstellung
bei der Potentialfeldmessung
15:15 Dr.-Ing. Sylvia Keßler, cbm
Centrum Baustoffe und Materialprüfung,
Technische Universität München

16:00 **Gemeinsame Auswertung**
der Messergebnisse

17:00 Ende



5.3. 16. Deutsche Betonkanu-Regatta

09./10. Juni 2017, Köln, Fühlinger See

Projektbetreuung: Kai Fischer, M. Sc., Dipl.-Ing. Thomas Kränkel

Unter dem Slogan „mit MUT zum Ziel - TUM“ repräsentierten rund 20 Studierende die Technische Universität München auf der 16. Deutschen Betonkanu-Regatta 2017 in Köln. Für die erfolgreiche Teilnahme konstruierten die angehenden Bauingenieure – im Rahmen der Lehrveranstaltung „Projektarbeit Betonkanu“ – zwischen September 2016 bis Juni 2017 am Centrum Baustoffe und Materialprüfung zwei voll schwimmfähige Kanus aus Beton.

Foto 1:
Beteiligte Studierende mit
Projektverantwortlichen des
cbm K. Fischer (2.v.l.) und C.
Kriegel (4.v.l.)



Das Modell für die Form der beiden baugleichen Kanus bildete eine glasfaserverstärkte Kunststoffschalung, an deren Innenseite der Beton für die Kanuherstellung aufgebracht werden sollte. Hierfür entwickelten die Studenten eine Feinbetonrezeptur - bestehend aus Portlandzement, Silicastaub, Quarzmehl und Fließmittel. Mit einer guten Streich- und einer geringen Fließfähigkeit, besaß der Hochfestbeton die notwendigen Verarbeitbarkeitseigenschaften, um diesen in 5 bis 10 mm dünnen Lagen in der Schalung aufbringen zu können. Um die erforderliche Biegezugfestigkeit zu erreichen, wurde eine Lage aus Glasfasergewebe als Bewehrung eingelegt.

Die zwei fertiggestellten Betonkanus mit den Namen heiligTUM und faktTUM und einem jeweiligen Kampfgewicht von etwa 100 kg gingen allerdings nicht in einem typischen betongrau auf dem Fühlinger See in Köln an den Start, sondern – aufgrund der Verwendung eines Betonpigments auf Cobaltbasis – in „TUMblau“.

Zwei Damen- und zwei Herrenteams der TU München reihten sich in den großen Teilnehmerkreis aus insgesamt 125 Mannschaften und 80 selbstgebauten Betonkanus mit ein. Die Teams der 50 Universitäten, Fachhochschulen bzw. handwerklichen Ausbildungseinrichtungen stammten aus 7 verschiedenen Nationen, was der Veranstaltung einen internationalen Charakter verlieh. Ein Damenteam der TU München schaffte es bis ins Halbfinale des Rennwettbewerbs. Den hoch verdienten Sieg holte sich die HTWK aus Leipzig sowohl im Damen- als auch im Herrenwettbewerb.



Ohne die Unterstützung von Sponsoren wäre dieses Projekt nicht realisierbar gewesen. Aus diesem Grund bedanken wir uns recht herzlich bei HeidelbergCement AG, STRABAG, Quarzwerke GmbH, Harold Scholz & Co. GmbH, BauMineral GmbH, BayWa und KOBAL Vlies- und Gewebetechnik.

Foto links: Kanu *fakTUM*
Foto rechts (Betonbild / Sascha Steinbach):
Kanu *heiligTUM*

5.4. Betriebsexkursion

25.09.2017, Klärwerk Gut Großlappen

Planung und Durchführung: Polina Secheyko, Renate Deuerling

Dieses Mal waren die Mitarbeiterinnen und die Mitarbeiter des cbm richtig münchenerisch unterwegs. Ziel der Betriebsexkursion 2017 war, München von einer ganz anderen Seite kennenzulernen.

Gestärkt durch ein ausgiebiges Frühstück starteten knapp 60 Exkursionsteilnehmer Richtung Münchener Norden und wurden um kurz vor 09:00 Uhr per Bus beim Klärwerk Gut Großlappen in Fröttmaning abgesetzt. Der Besichtigungsführer, Herr Hertlein, führte die Gruppe zu einem Modell der gesamten Klärwerkanlage und gab nach einer kurzen Einführung in die Geschichte und die technische Entwicklung der Kläranlage einen Überblick über ihre Funktionsweise.



Fotos im Bericht von
H. Hilbig, M. Hobusch, K.-H.
Kreft, P. Secheyko



Anschließend wurde die Gruppe durch die komplexen Anlagen der Abwasserbehandlung geführt, wobei die einzelnen Stationen der mechanischen und biologischen Abwasserreinigung ausführlich erklärt wurden. Als letztes wurde die Schaltwarte zur permanenten Überwachung der technischen Prozesse gezeigt. Das in der Kläranlage über das Münchener Kanalsystem einfließende Abwasser wird über Siebrandrechen grob gereinigt. In Abscheidekammern werden Fette und Öle entfernt und das vorgereinigte Abwasser fließt in Vorklärbecken. Nach dem Durchlauf über Abwasserpumpwerk, Belebungsbecken, Nachklärbecken, Sandfilter, Stickstoffentfernung werden im Denitrifikationskombinationsbecken die Nitrate abgebaut. So entsteht gereinigtes und sauberes Wasser. Wenn es nun noch durch die Desinfektionsanlage gelaufen ist, kann es mit der Gewässergüteklasse II über den Speichersee in den Mittleren Isarkanal in die Isar geleitet werden. Es handelt sich dann um ein Fließgewässer mit guter Sauerstoffversorgung und einer großen Artenvielfalt an Mikroorganismen, Fischen, Kleintieren und Insektenlarven.

Gut Großlappen ging in den 20er Jahren in Betrieb und wurde dem wachsenden München immer wieder angepasst. Zusammen mit dem Klärwerk Gut Marienhof, das noch weiter im Norden auf der Höhe von Eching liegt, wird das Abwasser von über 1,5 Mio. Einwohnern und den Gewerbebetrieben der Stadt München und der Umlandgemeinden gereinigt. Das in Großlappen erzeugte Klärgas nutzt der Betreiber zur Stromgewinnung. Der so produzierte Strom deckt fast vollständig den Energiebedarf des Klärwerks. Dass das Gut Großlappen einmal zu den modernsten Anlagen seiner Art gehören würde, konnte Max von Pettenkofer (1818-1901), der erste Hygieniker Deutschlands, nicht wissen, als er der Stadt München 1855 riet, ein großes Grundstück in Großlappen zu kaufen, um dort später einmal eine Kläranlage zu bauen.



Zu Fuß ging es dann zu einem wohl verdienten Mittagessen mit angeregten Gesprächen im traditionell bayerischen Wirtshaus „Sakrisch Guat“. Gut gestärkt wurde die Gruppe nach dem Mittagessen zu einer 1,5 stündigen Führung durch den unbekannten Norden des Englischen Gartens bereits erwartet. Die Fremdenführer Heidrun Langer, Thomas Koch und Susanne Steinbicker standen für eine Tour zur Verfügung. Das herrliche sonnige Wetter machte den Spaziergang von ca. 2 km zu einem Erlebnis, bei dem die Mitarbeitenden interessante und versteckte Plätze entdeckten. Gestartet wurde am Aumeister Biergarten und während die Gruppen getrennt entlang des Oberstjägermeisterbaches wandern konnten, wurde über die Herren Reinhard Freiherr von Werneck und Friedrich Ludwig von Sckell berichtet. Diese beiden gelten zusammen mit Benjamin Thomson, dem späteren Grafen Rumford, als Väter des Englischen Gartens. Besonderes Augenmerk legten die Fremdenführer auf dem Weg zur St.-Emmeram-Brücke auf die üppige Vegetation. Angekommen beim Standbild des heiligen Emmeram konnte man einen genießerischen Blick die Isar entlang werfen. Ein nächster Anlaufpunkt war das neue Amphitheater, in dem uns Thomas Koch die „Lobrede auf den Englischen Garten“ von Eugen Roth rezitierte.

Auch das Tivoli-Kraftwerk stand auf dem Programm. Es wurde im 19 Jhd. errichtet, um der Firma Maffei-Eisenwerke bei der Lokomotiven-Produktion zu dienen. Für ihre Angestellten hatten die Eisenwerke die Maffeisiedlung bauen lassen, deren heute noch bewohnten Häuschen idyllisch am Rande des Englischen Gartens liegen. Abgerundet wurde der „München-Ausflug“ durch einen letzten Stopp im Biergarten des Mini-Hofbräuhauses. Von hier ging es am frühen Abend mit dem Bus zurück zum Institut.

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



von links nach rechts:
M. Zöge, K. Fischer, D. Finke,
M. Röttinger, A. Weis, C. Weiß

5.5. Workshop „Corrosion Electrochemistry“

TUM - Visiting Professor Program
AG Stahl und Korrosion

Prof. Alberto A. Sagüés
Dept. of Civil and Environmental Engineering
University of South Florida



The objective of the visit of Prof. A. Sagüés was on sharing knowledge and exchange of expertise towards both academic and innovation excellence in corrosion science and reinforced concrete structures such as electrochemistry of corrosion assessment in concrete and corrosion detection in reinforced concrete structures. This visit of Prof. Sagüés maintained the intense cooperation between USF and TUM, which has been activated by the research stay of Dr. Keßler in 2016.

Research staff, students and PhD students engaged in the field of corrosion science have had the unique opportunity to exchange educational and scientific experience as well as high-level expertise of one of the leading scientific researcher. In July 2017 the workshop “Corrosion Electrochemistry for Civil Engineers” took place:

The workshop covered the following topics:

- Review of electrical fundamentals
- Review of electrochemical fundamentals and polarization behavior
- Measuring corrosion of steel in concrete - how to get useful information
- Measuring corrosion of steel in concrete – accounting for other sources of measurement uncertainty
- Polarization experiment



The following selected feedbacks to Prof. Sagüés show the impact and the benefit of the participation in this workshop:

"As a civil engineer electrochemistry was never covered during the studies. Since I have started a PhD in the corrosion topic, I attended a lecture from the chemistry department about electrochemistry. This was clearly not thought for civil engineers to understand the corrosion process. Therefore, I enjoyed the course held by Prof. Sagüés very much. The whole lecture aims to let civil engineers understand the corrosion process. This includes the explanation of the electrochemistry basics and moreover the explanation of measuring methods for corrosion detection. Listening to him was extremely interesting and also easy to understand and follow his speech. I could profit a lot from this course as the application of the measuring methods was explained like „ready-to-use“. Also, the important details about mistakes during measuring were explained – and hopefully, I will not forget them while measuring. Thank you very much for that course. It is really useful for civil engineers who work in the field of reinforcement corrosion!"

"The workshop was a great initiative to bring people from different backgrounds working in the field of electrochemistry. It was successful in laying down of fundamental principles for everyone. At the end, thanks a lot for arranging the experiment as it helped in good visualization of what we studied."

"Prof. Sagüés help me a lot to make some connections between different pieces of knowledge I knew before but only as isolated knowledge. I think it improves a lot my understanding on corrosion in general and especially on the interpretation of experiments and also on how to plan an experiment to obtain the desired information."

"Going through the fundamentals and recapitulating some of the basic concepts in one coherent and clear lecture at a very adequate lecturing speed helped filling some of the blank spaces and gaps on my personal "Electrochemistry map" and helped understanding the



story behind the mere application of measurement techniques and avoiding certain pitfalls. I will have to go through the notes again, but I am confident that it has fundamentally improved my general understanding of this matter. I therefore very much appreciate that you took the time to prepare and give this lecture”.

Finally:

“Thank you once again for the fantastic workshop – I learnt a lot...”

Inmitten der Workshop-Teilnehmerinnen und Teilnehmer links Prof. Sagüés und rechts Prof. Gehlen.

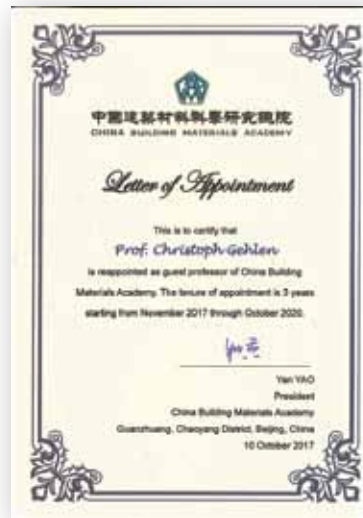


6. Ehrungen

6.1. Gastprofessur in China

Professor Christoph Gehlen lehrt an der CBMA in Peking

Für drei weitere Jahre bis 2020 ernennt die China Building Materials Academy Professor Christoph Gehlen zum Gastprofessor. Damit wird die erfolgreiche Zusammenarbeit mit den Forschern und Studierenden der CBMA der letzten drei Jahre gewürdigt. Die fruchtbare Verbindung zu den Kolleginnen und Kollegen und den Studierenden im Fernen Osten führt dazu, dass Wissenschaftler der CBMA im Centrum für Baustoffe und Materialprüfung als Gäste ihrer Forschung nachgehen und dass Professor Gehlen bei seinen Besuchen in Peking gemeinsam mit den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern Fragestellungen der Materialwissenschaft diskutiert, sowie Vorlesungen und Vorträge bei großen Veranstaltungen zu Werkstoff-Themen und Werkstoffprüfung hält.



6.2. Exzellenz in der Lehre 2017

Ehrung für Professor Christoph Gehlen

Jedes Jahr schlägt die TUM einen Dozenten bzw. eine Dozentin aus dem Kreis der wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und der Professorenschaft für den "Preis der guten Lehre" des Bayerischen Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst (StMBKWK) vor. Die Vorschläge kommen aus den Fakultäten und von den Studierenden. Eine zentrale Jury unter dem Vorsitz des Vizepräsidenten für Studium und Lehre lädt die Nominierten zu einem Auswahlgespräch ein. Professor Gehlen (Foto Mitte) wurde 2017 vorgeschlagen und hat aus der Hand von Professor Stephan Freudenstein, Studiendekan der BGU (Foto links), und dem Vizepräsidenten für Studium und Lehre der TUM, Professor Gerhard Müller (Foto rechts), die Urkunde erhalten.



6.3. 6th International Doctoral Symposium, November 8-10, 2017, Hokkaido University, Japan

Im November 2017 hat Linda Irbe, Wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe Bindemittel und Zusatzstoffe, am Internationalen Doktoranden-Symposium der Hokkaido University teilgenommen. Der Hauptcampus der staatlichen Universität befindet sich im japanischen Sapporo. Die von der eigenen Universität, aus ganz Japan und Übersee eingeladenen Promovenden hatten die Möglichkeit, ihre Forschung in Vorträgen zu präsentieren. Linda Irbe wurde mit dem Preis für die zweitbeste Präsentation geehrt.



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 Betonzusatzstoffe und die Entwicklung dauerhafter, nachhaltiger Bindemittel stellt seit Jahren den zentralen Aufgabenbereich der Arbeitsgruppe 1 dar. Auch in diesem Jahr darf die AG1 wieder eine neue Kollegin begrüßen. Frau Polina Secheyko, M. Sc., beschäftigt sich mit einem DFG-geförderten Forschungsprojekt „Gefügebildung in klinkerarmen Zementen mit hohem Kalksteinanteil.“ Frau Secheykos Arbeit soll neue Erkenntnisse zum Einfluss des Klinkeranteils (Partikelgröße und -abstand im Leim), des Chemismus der Porenlösung (Ionen, Fließmittelart und -dosierung), Fließfähigkeit (Zetapotential, Dispergierung) und dem Gefüge (Phasen, Porosität) liefern.

Abgeschlossen wurde 2017 das DFG-geförderte Forschungsprojekt zu Grundlagenuntersuchungen an aluminiumhaltigen C-S-H-Phasen (sogenannte C-A-S-H-Phasen) bei verschiedenen chemischen Angriffen (wie, z.B. Chlorid-, Sulfat- oder Säureangriff sowie Carbonatisierung) auf Beton.

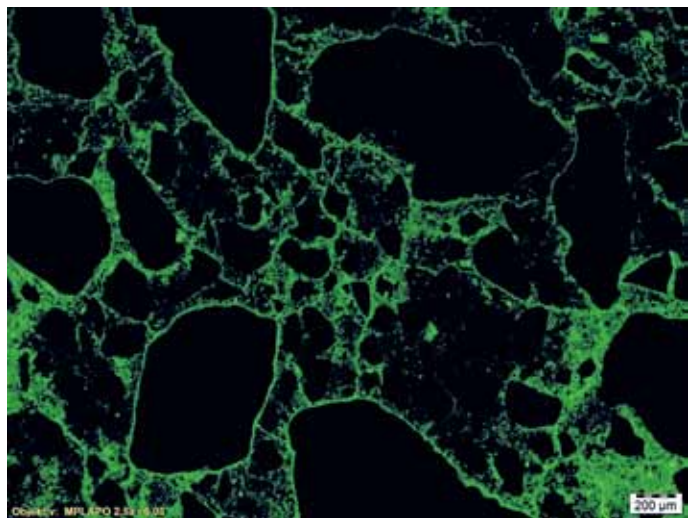


Abbildung 1: Mikroskopie eines Ettringitschadens unter dem UV-Licht

Ein großer Themenkomplex in der Arbeitsgruppe 1 ist die Forschung zur Dauerhaftigkeit zementgebundener Baustoffe. Ein DFG-gefördertes Forschungsprojekt zur Modellierung der Mechanismen des Sulfatangriffes auf Beton wurde fortgeführt, ebenso wie das Projekt zur Langzeitwirkung von Flugasche auf den Sulfatwiderstand von Betonen. In einem weiteren Projekt wird die Eignung verschiedener Bindemittel auf inneren Sulfatwiderstand der Betone untersucht.

Forschungsprojekte zur Thematik der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) wurden auch im Jahr 2017 in verschiedenen Projekten und Langzeitstudien breit behandelt. Weitergeführt wurden die Untersuchungen zum Verhalten verschiedener Gesteine, insbesondere Granite, unter beschleunigenden Reaktionsbedingungen in AKR-Prüfverfahren. Des weiteren wurden Projekte abgeschlossen, die das Verständnis der Mechanismen beim Eintrag von Tausalz auf die Löslichkeit von SiO_2 aus der reaktiven Gesteinskörnung bei einem externen Tausalzangriff vertiefen, als auch ein Projekt zur Bewertung des AKR-Potentials anhand von Laboruntersuchungen im Vergleich zu Probekörpern, die mehrere Jahre einer freien Bewitterung ausgesetzt waren. Ein Projekt zur Langzeitwirkung von Flugasche auf eine schädigende AKR wurde fortgesetzt. Ein weiteres Projekt, ebenfalls zur Langzeitwirkung von Flugasche auf NaCl-beanspruchte Betone, beendet.

Im Rahmen des Erasmus-Austauschprogrammes untersuchte die Studentin Frau Monika Stankevičiūtė von der Technologischen Universität Kaunas, Litauen, im Wintersemester die Hydratationseigenschaften selbst gebrannter Belit-Calciumsulfoaluminatzemente aus flugaschehaltigen Rohmehlen. Die Arbeit entstand im Rahmen eines von der VGB-Forschungstiftung geförderten Projektes das im Jahr 2017 ebenfalls abgeschlossen wurde.

Die Doktorandin Frau Agne Šmigelskytė, ebenfalls eine Erasmus-Studentin aus Kaunas, hat während ihres Aufenthalts den Einfluss der Carbonatisierung auf die Eigenschaften von synthetischem Rankinit untersucht.

Eng mit der Forschung verknüpft sind auch die Bereiche der Materialprüfung, die die Arbeitsgruppe 1 abdeckt. Neben der Klärung von Schadensursachen an Betonen oder der Lösung anwendungstechnischer Probleme bei Baustoffen hat die Prüfung der Alkalireaktivität von Gesteinen und die Beurteilung der AKR-Empfindlichkeit von Betonen unter den Einwirkungen der Feuchtigkeitsklasse WS (feucht + Alkalien von außen + dynamische Belastung) einen großen Anteil. Die Qualität der durchgeführten Laboruntersuchungen wird jährlich durch mehrere Vergleichsversuche mit anderen Prüflabors und -instituten überwacht und bestätigt. Darüber hinaus deckt das Labor der AG1 einen großen Teil der analytischen Untersuchungen anderer Arbeitsgruppen ab (z. B. Porositätsbestimmungen mittels Quecksilberdruckporosimeter, Phasenanalytik mittels Röntgenbeugungsdiffraktometrie, u.v.a.).

Die Mitarbeiter der Arbeitsgruppe veröffentlichen ihre Forschungsergebnisse im Rahmen von nationalen und internationalen Tagungen (z.B. 3rd International Congress on Durability of Concrete in Adelaide, Australien; 6th International Doctoral Symposium „Synergy in Civil Engineering Research towards the Realization of a Global Sustainable Society“ an der Hokkaido University in Sapporo, Japan; Euroseminar on microscopy applied to building materials in Les Diablerets, Schweiz) sowie in namenhaften Zeitschriften (z.B. Thermochemica Acta). Frau Irbe, M.Sc. erhielt im Rahmen des PhD-Symposiums an der Hokkaido University in Sapporo, Japan, den 2. Preis für den besten Vortrag.

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

Abbildung 2: Linda Irbe, M.Sc. mit den Teilnehmern des PhD-Symposiums in Japan



7.1.2. AG 3 Stahl und Korrosion

In der Arbeitsgruppe „Stahl und Korrosion“ steht der Werkstoff Betonstahl im Fokus. Mit experimentellen und numerischen Lösungsansätzen wird der Werkstoff allumfassend auf seine mechanischen und korrosiven Eigenschaften erforscht. In Verbindung mit dem Werkstoff Beton gehört die probabilistische Zustandsbewertung und Lebensdauerprognose von Stahlbetonbauwerken in Bezug auf Bewehrungskorrosion zum Portfolio der Arbeitsgruppe. Das neue Forschungsvorhaben „Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke“ für die Bundesanstalt für Straßenwesen steht stellvertretend für diesen Forschungsschwerpunkt.

Das Monitoring von Bewehrungskorrosion in Beton bildet einen weiteren Schwerpunkt. Gleich zwei neue Forschungsvorhaben „Einfluss einer Betonbeschichtung auf die Mechanismen der Bewehrungskorrosion in gerissenem, kurzzeitig tausalzexponiertem Stahlbeton“ gefördert von der DFG und das DAfStb-Vorhaben „Langzeit-Korrosionsmonitoring in Rissbereichen realer Stahlbetonbauteile zur Wirksamkeitskontrolle des Instandsetzungsprinzips W-CI“ knüpfen direkt an bereits erfolgreich abgeschlossene Forschungsvorhaben an. Das übergeordnete Ziel der Untersuchungen ist, zu klären, unter welchen Randbedingungen das Instandsetzungsprinzip 8.3 erfolgreich und dauerhaft angewendet werden kann und wie die geforderte Wirksamkeitskontrolle durchzuführen ist.

Im Bereich der Korrosionsdetektion an Stahlbetonbauwerken konnte das DFG-Projekt „Potentialfeldmessung: Bewertung der Prüfqualität und koordinierte Einbindung der Daten in Schädigungsmodelle“ erfolgreich abgeschlossen werden. Auf Basis der Probability of Detection Kurven kann nun die Zuverlässigkeit der Potentialfeldmessung probabilistisch beschrieben werden. Darauf aufbauend können nun die Daten aus der Potentialfeldmessung für das Update der Lebensdauerprognose herangezogen werden. Der Schädigungsprozess der Bewehrungskorrosion kann nun auch bei der probabilistischen Zustandsbewertung räumlich streuend berücksichtigt werden.

Eine mögliche Fehlerquelle von potentiometrischen Korrosionsmessungen wie der Potentialfeldmessung sind Diffusionspotentiale, die sich in dem porösen Werkstoff Beton aufgrund von Ladungstrennungen bilden können. Deren Erforschung und Quantifizierung ist das Ziel des DFG-Projektes „Diffusion potentials in concrete – error and information source“ in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich. Ziel ist es hierbei, ein Modell zu entwickeln, das die Größenordnung von Diffusionspotentialen abschätzen und prognostizieren soll.

Auch im Jahr 2017 durften wir wieder internationale Gäste in unserer Arbeitsgruppe begrüßen. Von 10/2016 bis 04/2017 beschäftigt sich Frau Hilke Verbruggen vom SURF, Research Group Electrochemical and Surface Engineering, der Vrije Universiteit Brussel mit dem Thema selbstheilender Betonstahlbeschichtungen als Korrosionsschutz der Bewehrung. Im Juli 2017 besuchte uns über das TUM Visiting Professor Programm Prof. Alberto A. Sagüés von der University of South Florida. In einem 2-tätigen Workshop „Corrosion Electrochemistry for Civil Engineers“ ließ uns Prof. Sagüés an tiefgehenden Verständnis zur Bewehrungskorrosion teilhaben und bot eine Plattform, um gängige elektrochemische Versuchstechniken zu diskutieren und zu hinterfragen.

Der Bereich der Materialprüfung trug auch im Jahr 2017 wieder maßgeblich zur erfolgreichen Bilanz der Arbeitsgruppe bei. Um der kontinuierlich wachsenden Anzahl von Prüfaufträgen gerecht zu werden, wurde das Team im Stahllabor mit zwei zusätzlichen Mitarbeitern

(Herr Maximilian Beck und Herr Daniel Yehia) verstärkt. Damit wird zudem sichergestellt, dass unsere Leistungen den hohen Qualitätsanforderungen unserer Kunden auch vor dem Hintergrund einer zunehmenden Komplexität der Projekte in gewohnter Weise gerecht werden.

Zur Verbesserung der internen Abläufe wurde die Datenbanksoftware „Shanti“ insbesondere für den Arbeitsbereich Betonstahlhersteller weiter ausgebaut. Die Software bildet die Bearbeitungsprozesse bei der Überwachung und Prüfung der von uns zertifizierten Betonstähle ab, unterstützt damit eine standardisierte Arbeitsweise und ermöglicht die Erstellung von Prüfaufträgen, Protokollen und Untersuchungs- bzw. Überwachungsberichten. Zudem bietet „Shanti“ die Möglichkeit, Versuchsergebnisse in effektiver Weise für statistische Auswertungen aufzubereiten.

Zur erfolgreichen Jahresbilanz gehört auch das am 30. November erfolgreich bestandene Audit zur Aufrechterhaltung unserer Akkreditierung nach ISO/IEC 17025:2005.

7.1.3. 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. Gesteine, 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 im steigenden Maß zur Charakterisierung von Ausgangsstoffen oder Produkten im Rahmen von Forschungsvorhaben des ganzen Hauses.

Nach dem Laborumbau im letzten Jahr war dieses Jahr direkt ruhig. Eine große personelle Änderung gab es jedoch: Isak Halegua ist nach fast 30-jähriger Tätigkeit als CTA im Februar in seinen verdienten Ruhestand gegangen. Eingestellt wurde er 1988 von dem damaligen Arbeitsgruppenleiter Dr. Dorner und war zu seiner Anfangszeit als „Einzelkämpfer“ im Labor tätig. So legte er mit seinem Wirken den Grundstein für das heutige Labor und begleitete die Entwicklung zu einem modernen und schlagkräftigen Team, in dem momentan bis zu fünf Laboranten arbeiten. Als Nachfolger konnte im direkten Anschluss der Auszubildende Roland Morber gewonnen werden, der für sein letztes Ausbildungsjahr vom AUTUM zu uns versetzt wurde und jetzt kurz vor der Abschlussprüfung steht.

Entsprechend dem jährlichen Rhythmus hat uns die angehende Chemielaborantin Caroline Herzinger nach Abschluss ihres ersten Ausbildungsjahres im September Richtung Chemiedepartment in Garching verlassen. An ihrer Stelle begann nun Maximilian Auer seine Ausbildung bei uns. Auch in diesem Jahr nutzten wieder eine größere Anzahl Schüler bzw. Ausbildungsanwärter ein einwöchiges Praktikum im Rahmen der Berufsvorbereitung bei uns, um Einblick in den Betrieb eines Chemielabors und den damit verbundenen Aufgaben des Chemielaboranten zu erhalten.

Zur Unterstützung der Arbeiten von Marco Decker konnte im Jahr 2017 ein Forschungsprojekt von der DFG eingelobt werden, das seine Arbeiten zur Optimierung der LA-ICP-MS für die nächsten zwei Jahre finanziert (siehe neue Forschungsvorhaben). Mit diesem Vorhaben wurden auch eine neue Laborpresse zur gezielten Herstellung von Zementsteinpresslingen mit definiertem Druck sowie ein Upgrade der Laserablationseinheit finanziert. Das Interesse an dieser Messmethode ist nicht nur in Wissenschaftskreisen groß (vgl. Kapitel „ausgewählte Materialprüfung“), sondern auch bei den Studierenden, was sich

in einer Masterarbeit (siehe Masterarbeiten) und mehreren Bachelorarbeiten in unserer Gruppe widerspiegelte.

Die Lehre umfasste im Sommersemester wieder den Teil der chemischen Analytik des Praktikums „Analytik und Prüftechnik“ für die Masterstudenten. Auch im zweiten Jahr machte es den Studierenden und auch den Dozenten viel Spaß, Lösungsansätze für Fallbeispiele aus der Praxis zu erarbeiten. Im Wintersemester wurde wieder parallel zur Vorlesung „Bauchemie“ (Teil der Baustoffkunde Vorlesung des Studiengangs „Bachelor Bauingenieurwesen“) die freiwillige Veranstaltung „Grundlagen Chemie für Bauingenieure“ angeboten, was auch wieder rege angenommen wurde. Beim Bauingenieur-Praktikum „Werkstoffe im Bauwesen“ im Sommersemester hatten wir wieder die Aufgabe, das Thema Kunststoffe abzudecken.



Fotos: Die alte Laborpresse (links) wurde gegen eine neue ausgetauscht (rechts):

7.1.4. AG 6 Zerstörungsfreie Prüfung

Die AG6 bearbeitet vermehrt Anfragen auf Amtshilfe der Kriminalpolizeidirektionen. Dabei geht es meist um die Unterstützung bei der Suche nach vermissten Personen und es kommen verschiedene Messverfahren zum Einsatz. Neben Ultraschall, Impakt-Echo und Videoendoskopie ist es vor allem das RADAR-Verfahren, welches eingesetzt wird. Außer RADAR-Geräten mit hochfrequenten Antennen (1,6 und 2,7 GHz), werden dabei auch die neue tieffrequente digitale Dualfrequenz-Antenne mit 300/800 MHz und das SIR4000-Steuergerät verwendet, welche aus Institutsmitteln beschafft wurden. Bei allen Einsätzen in der forensischen Archäologie ist eine hohe Geheimhaltungsstufe üblich.



Foto: C. Große (links) und R. Groschup (rechts) von der AG6 des cbm zusammen mit Mitarbeitern der Kriminalpolizei bei einem forensischen Einsatz.

7.2. Abgeschlossene Forschungsvorhaben

AG Bindemittel und Zusatzstoffe

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

Bearbeitung: Linda Irbe, M. Sc.

Förderer: DFG

In der Praxis werden Betonbauteile je nach Exposition von gelösten Stoffen wie Sulfaten, Alkalien, Säuren und Chloriden angegriffen oder durch CO_2 carbonatisiert, was ihre Lebensdauer verkürzt bzw. kostenintensive Sanierungsmaßnahmen verursacht. Lösungs- und Bildungsvorgänge führen zu Änderungen in der Phasenzusammensetzung des erhärteten Bindemittels und damit meist zu einer Verschlechterung der Festigkeit und Stabilität der Bauteile. Dabei sind die Eigenschaften der festigkeitsgebenden C-S-H-Phasen für die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen von zentraler Bedeutung, weil diese Phasen immer direkt oder indirekt an einer Schädigung beteiligt sind. Der gegenwärtige Trend zu höheren Anteilen von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen in Zementen und Betonen, wie Flugasche, Hüttensand und Metakaolin, ist zweifelslos ökologisch sinnvoll, erhöht aber die Menge von Aluminium im Bindemittel gegenüber reinem Portlandzement. Die C-S-H-Phasen können dann erheblich größere Mengen von Aluminium enthalten. Die Stabilität von C-A-S-H bestimmt, in welchem Maße Aluminium aus C-A-S-H in die Porenlösung eintritt und damit für chemische Reaktionen zur Verfügung steht. Dies kann zu einer zusätzlichen unerwünschten Ettringitbildung beim Sulfatangriff nach dem Verbrauch von AFm als Aluminiumquelle und Portlandit oder einer Begünstigung der Alkalikieselsäurereaktion führen, wenn gleichzeitig Alkalien als evtl. enthaltene Begleitonen freigesetzt werden. Die Stärke der Bindung von Al in C-A-S-H ist allerdings nicht eindeutig geklärt.

Im ersten Teil der Forschungsarbeit wurden über verschiedene Synthesewege gezielt C-A-S-H-Phasen hergestellt und charakterisiert. Durch NMR- und XRD Untersuchungen sowie die chemische Analyse wurden Zusammenhänge zwischen der Nanostruktur von C-A-S-H (Al-Gehalt, mittlere Kettenlänge, Al/Si-, Ca/Si-Verhältnis, Alkaligehalt) und der chemischen

Zusammensetzung der Porenlösung (Ca-, Si-, Al-, Alkali-Konzentrationen, pH) aufgestellt. Im zweiten Teil der Forschungsarbeit lieferten Lagerungsversuche in Na_2SO_4 - und NaCl-Lösungen sowie pH-STAT Versuche und Lagerungen unter definierten CO_2 -Konzentrationen Grunderkenntnisse über Änderungen in der C-A-S-H-Nanostruktur bei chemischem Angriff, insbesondere die Verfügbarkeit bzw. Stabilität von Aluminium und Alkalien bei einem simulierten Sulfatangriff, einer schädigenden AKR, der Carbonatisierung und einem Säureangriff.

		C-A-S-H			
		+			
		Na ₂ SO ₄	NaCl	HCl	CO ₂
		↓	↓	↓	↓
		Sulfatangriff	Tausalzangriff	Säureangriff	Carbonatisierung
		(Salze)		(Säuren)	
pH ≥ 12,4	Mittlere Kettenlänge	sinkt		Reaktion findet nicht statt	
	Al/Si im C-A-S-H	sinkt			
	Reaktionsprodukte	Ettringit, Gips	Friedelsches Salz		
pH ≤ 12,4	Mittlere Kettenlänge	steigt		Silicagel	
	Al/Si im C-A-S-H	sinkt			
	Reaktionsprodukte				

Tabelle 1.
Zusammenfassung der wichtigsten Eckdaten bezüglich der Wirkung des chemischen Angriffs auf die Nanostruktur vom C-A-S-H.

Die Mobilisierbarkeit von Aluminium aus CASH war allen Lagerungsexperimenten gemeinsam. Allerdings konnten zwei verschiedene Wirkungsmechanismen des chemischen Angriffs in Bezug auf die Stabilität der Nanostruktur von C-A-S-H unterschieden werden. Der Grad der Portlanditsättigung der Lagerungslösung, bzw. der pH-Wert spielen dabei eine zentrale Rolle, wie aus der Tabelle 1 ersichtlich wird. Oberhalb des Portlanditsättigungs-pH-Werts der Lagerungslösung (12,4) geht der Ausbau von Aluminium mit der Verkürzung der

mittleren Kettenlänge einher, wobei das Aluminium als ein Baustein für die Bildung sekundärer Phasen fungiert. Die Fernordnung von C-A-S-H bleibt dabei weitestgehend erhalten.

Bei einem pH-Wert $\leq 12,4$ ist die Lagerungslösung portlandituntersättigt, weshalb keine Pufferung der Decalcifizierung von C-A-S-H durch Ca_{2+} -Ionen stattfinden kann. Dieser Prozess wird begleitet von der Verlängerung der C-S-H-Kette im Zuge des Ladungsausgleichs durch Polymerisation. Mit dem sinkenden pH-Wert lösen sich die C-A-S-H-Phasen inkongruent. Dabei entsteht amorphes Silicagel. Das Aluminium wird bis zu einem pH ≥ 4 im Silicagel eingebaut und steht somit für die Bildung sekundärer Phasen nicht zur Verfügung.

7.2.2. Eigenschaften von Belit-Calciumsulfoaluminatzement aus flugaschehaltigem Rohmehl

Bearbeitung: Dr.-Ing. Anne Heisig

Förderer: VGB-Forschungstiftung

Für dieses Forschungsvorhaben wurden Belit-Calciumsulfoaluminatzemente aus flugaschehaltigen Rohmehlen hergestellt. Dabei wurden eine Braun- und eine Steinkohlenflugasche eingesetzt sowie Kalksteinmehl als Calciumquelle, Anhydrit als Sulfatquelle und ein kaolinhaltiger Schluff als Aluminiumquelle. Der Einfluss der unterschiedlichen Zusammensetzung dieser beiden Flugaschen auf die Klinkerphasenbildung und den Hydratationsverlauf als auch auf die Festigkeitsentwicklungen von Mörteln wurde untersucht.

Es wurden drei Rohmehlmischungen hergestellt. Mischung 1 (SFA + KSM + A) setzt sich aus Steinkohlenflugasche, Kalksteinmehl und Anhydrit zusammen, Mischung 2 (BFA + KSM + A) aus Braunkohlenflugasche, Kalksteinmehl und Anhydrit sowie eine Mischung 3 (BFA + S + KSM + A), die sich aus Braunkohlenflugasche, kaolinhaltigem Schluff, Kalksteinmehl und Anhydrit zusammensetzt.

Die Ergebnisse der Studie sind im Folgenden aufgelistet:

- In allen drei Mischungen entstehen Belit (C_2S) und Ye'elimite. Die Mischungen mit Braunkohlenflugasche weisen einen erhöhten Anteil an α' - C_2S auf. Auch bildet sich hier bei niedrigen Brenntemperaturen Ternesit. (Abbildung 1)
- Mit steigender Brenntemperatur, sowie steigender Haltedauer der Maximaltemperatur nimmt der Gehalt an Ye'elimite und Belit zu. Der Gehalt an Ternesit nimmt ab.
- Der Klinker der Mischung 2 mit Braunkohlenflugasche weist die höchsten Anteile an α' - C_2S auf.

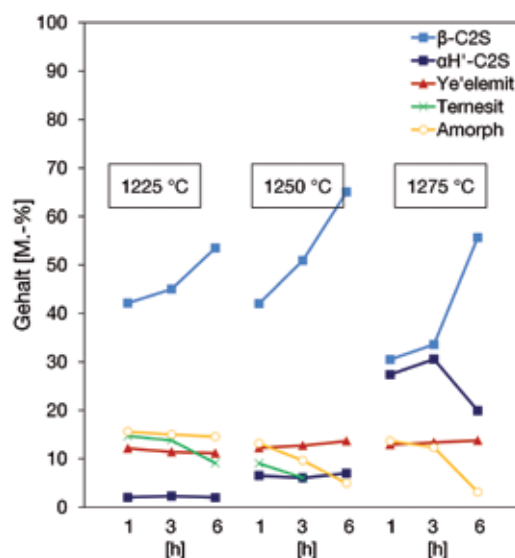


Abbildung 1:
Hauptphasen in Mischung 3
(Beispiel)

Für weiterführende Untersuchungen wurden eine Brenntemperatur von 1275 °C und eine Haltedauer auf Maximaltemperatur von 1 h gewählt:

- In allen drei Mischungen wird ein Gesamtbelitgehalt von etwa 60 M.-% erreicht. Das Verhältnis der α' / β Modifikation des C_2S liegt bei Mischung 1 bei 0,02; bei

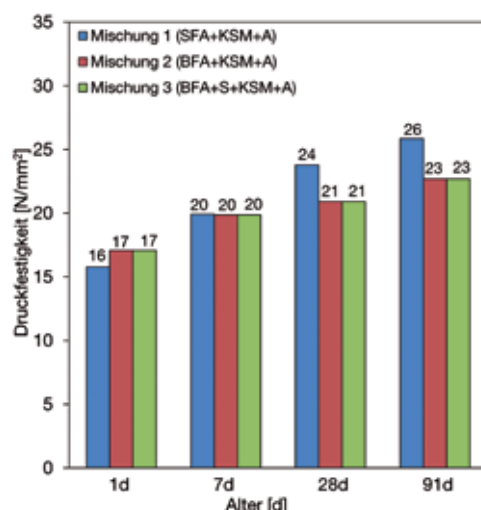
Mischung 2 bei 9 und bei Mischung 3 bei 1,4.

- Der Ye'elimitgehalt ist bei Mischung 1 mit 24 M.-% am höchsten und nimmt bei Mischung 2 auf ca. 12 M.-% sowie 13 M.-% bei Mischung 3 ab.

Es wurde bei den Mischungen 1 und 3 ein SO_3 / Ye'elimit-Verhältnis von 1,5 mit Gips eingestellt. Bei Mischung 2 lag ein Anhydritgehalt von etwa 5 M.-% im Klinker vor, daher wurde hier kein zusätzlicher Gips hinzugefügt. Die so hergestellten Zemente (spez. Oberfläche: $4200 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$) wurden hydratisiert und zu verschiedenen Zeitpunkten beprobt.

- Als Hydratationsprodukte entstehen in allen Mischungen Ettringit und C-S-H-Phasen.
- In Mischung 1 (SFA + KSM + A) mit einem höheren Alkaliegehalt von ca. 5 M.-% entsteht kurzzeitig Syngenit ($\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), der sich im Weiteren an der Ettringitbildung beteiligt. Die Ettringitbildung schreitet sehr schnell voran, was sich auf das Vorhandensein von Gips als Sulfatquelle zurückführen lässt. α'_H - und β - C_2S reagieren über Monate nur sehr langsam
- In Mischung 2 (BFA + KSM + A) läuft die Ettringitbildung, d.h. die Umsetzung von Ye'elimit mit Anhydrit, deutlich langsamer ab, als bei Mischung 1. Dennoch liegen nach 1 d Hydratation dieselben Gehalte (17 M.-%) an Ettringit vor. Die langsamere Umsetzung ist auf das Vorhandensein von im Klinker gebildetem Anhydrit als Sulfatquelle zurückzuführen. Die hohen Anteile an α'_H - C_2S reagieren in den ersten Stunden und Wochen zur C-S-H-Phasen. β - C_2S reagiert demgegenüber nur sehr träge. Nach etwa 7 d bildet sich Strätlingit.
- Mischung 3 (BFA + S + KSM + A) hydratisiert in ähnlicher Weise wie Mischung 2. Die Ettringitbildung scheint etwas beschleunigt zu sein, da hier neben dem Anhydrit aus dem Klinker auch der zudosierte Gips mit Ye'elimit reagieren kann. Trotz deutlich geringerer Gehalte an α'_H - C_2S und höherer Gehalte an β - C_2S reagiert auch in Mischung 3 die α'_H -Modifikation deutlich schneller. Nach etwa 28 d stagniert diese Reaktion jedoch und die β -Modifikation des C_2S beginnt mäßig zu C-S-H-Phasen zu reagieren. Auch hier bildet sich nach etwa 7 d zusätzlich Strätlingit.

Abbildung 2:
Druckfestigkeit der Mörtelproben



An allen drei BCSA-Zementen wurde Mörtel nach DIN EN 196 hergestellt und untersucht. Quelleigenschaften weist keine dieser Zemente auf. Die Zemente zeigen hohe Frühfestigkeiten im Vergleich mit einem herkömmlichen Portlandzement gleicher Feinheit. Die späteren Festigkeiten (7, 28, 91 d) steigen kaum noch an (Abbildung 2). Die Mörtelproben der Mischung 1 mit Steinkohlenflugasche (24 N/mm² nach 28 d) weisen im Vergleich zu den Mischungen mit Braunkohlenflugasche (21 N/mm² nach 28 d) einen etwas höheren Wert auf.

Aufgrund der geringen 28 d Festigkeiten, die sich bei den BCSA-Zementen ergeben, können folgende weiterführenden Untersuchungen sinnvoll sein. Grundsätzlich sollte eine höhere Feinheit der Zemente zu höheren Festigkeiten führen. Somit wäre es denkbar eine Studie zum Einfluss der Mahlfineinheit solcher BCSA-Zemente auf ihre Eigenschaften durchzuführen und den Gipsgehalt weiter zu optimieren.

7.2.3. Variierte Vorlagerungszeiten und deren Auswirkungen auf flugaschehaltige Betone im 40 °C- und 60 °C-Betonversuch (AKR-Performance Prüfung) - Fortsetzung

Bearbeitung: Kai Fischer, M. Sc.

Förderer: VGB-Forschungstiftung

Schäden infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) stellen ein weltweites Dauerhaftigkeitsproblem für Betonbauwerke dar. Allein auf Betonfahrbahndecken des Bundesautobahnnetzes in Deutschland summieren sich Schadens- und Verdachtsflächen auf knapp 400 km. Basierend auf dem Konzept der AKR-Performance-Prüfung an spezifischen Betonzusammensetzungen ist es für diesen Anwendungsbereich gelungen, eine schädigende AKR in Betonfahrbahndecken durch präventive Maßnahmen zu vermeiden. Die Grundvoraussetzung für die Etablierung einer solchen Vorgehensweise ist, dass die angewandten AKR-Prüfverfahren das Praxisverhalten der zu beurteilenden Betonzusammensetzungen korrekt abbilden. Durch Verwendung puzzolanischer Zusatzstoffe, wie beispielsweise Steinkohlenflugasche, lassen sich Schäden durch AKR in Beton nachweislich vermeiden. Im Hinblick auf die baupraktische Anwendung ist durch den gezielten Einsatz von Flugasche sogar die Verwendung alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen in Beton möglich. Für bestimmte Regionen in denen – geologisch bedingt – größtenteils Lagerstätten mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen vorkommen, wäre somit eine Verwendung der lokal verfügbaren Rohstoffe möglich, anstatt Gesteinskörnungen aus anderen Regionen zu beziehen.

Vor diesem Hintergrund wurden im abgeschlossenen VGB-Projekt Nr. 300 „AKR - Vermeidung durch Flugasche – Langzeitlagerung“ flugaschehaltige Betone mit einer schnell reagierenden Gesteinskörnung (E-III OF-Material) über einen Zeitraum von bis zu 13 Jahren der freien Bewitterung ausgesetzt und den Ergebnissen einer parallel durchgeführten 40 °C-Nebelkammerprüfung gegenübergestellt. Für Betonzusammensetzungen ohne puzzolanische Zusatzstoffe lässt sich durch die 40 °C-Nebelkammerprüfung das Praxisverhalten im Hinblick auf eine schädigende AKR zuverlässig abbilden.

Im Gegensatz dazu wurde festgestellt, dass flugaschehaltige Betone mit 15 bis 25 % Flugasche die Prüfung in der Nebelkammer grundsätzlich bestehen, allerdings unter freier Bewitterung nach 1 bis 2 Jahren Anzeichen von AKR-Schäden auftreten. Eine Beurteilung der AKR-Beständigkeit dieser Betone mittels Nebelkammerprüfung ist daher nicht zuverlässig und würde zu einer falschen Bewertung führen.

Um eine Erklärung dieses unstimmigen Verhaltens für flugaschehaltige Betone zu erhalten, wurden im Nachfolgeprojekt (VGB Nr. 349) und dem aktuell abgeschlossenen Fortsetzungsprojekt (VGB Nr. 402) Betone identischer Rezeptur nachgestellt und einer modifizierten Vorgehensweise in der 40 °C-Nebelkammerprüfung unterzogen. Durch eine Vorlagerung der Betonproben von bis zu 91 Tagen, sollte eine praxisferne Beschleunigung der puzzolanischen Reaktion, durch Einlagerung der Proben in das 40 °C-Klima bereits einen Tag nach der Betonherstellung, vermieden werden.

Unbefriedigender Weise bildet auch diese veränderte Prozedur die gleichartige Diskrepanz zwischen dem 40 °C-Nebelkammerprüfverfahren und dem realen Praxisverhalten ab – auch bei einer Vorlagerung der flugaschehaltigen Betone. Entsprechend zeigen sämtliche Betone mit Flugasche nach 4,5 Jahren in der Nebelkammerprüfung keine Anzeichen auf Schäden, wohingegen unter freier Bewitterung in Betonen mit 15 und 20 % Flugasche bereits nach 1 bis 2 Jahren Risse aufgetreten sind. Anhand mikroskopischer Untersuchungen

konnte eine schädigende AKR als Ursache dieser Risse eindeutig nachgewiesen werden. Die gewonnenen Praxisergebnisse bestätigen jedoch auch, dass selbst unter der Verwendung schnell reagierender Gesteinskörnungen eine ausreichende AKR-Beständigkeit eines Betons erzielt werden kann, wenn diesem genügend Flugasche – für diesen Fall 30 % – zugegeben wird.

Die Resultate zeigen übereinstimmende Zusammenhänge, die bereits von anderen Autoren festgestellt wurden. Unter Berücksichtigung dieser Literaturergebnisse, kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass eine AKR-Performance-Prüfung mittels 40 °C-Nebelkammerprüfverfahren für puzzolanhaltige Betonzusammensetzungen in Kombination mit schnell reagierenden Gesteinskörnungen keine praxisgerechten Ergebnisse liefert. Dieser Sachverhalt betrifft nicht nur Flugasche, sondern auch andere puzzolanische Materialien wie Silicastaub oder Metakaolin. Eigene Untersuchungen zeigen zusätzlich, dass eine derartige Unstimmigkeit auch für eine AKR-Performance-Prüfung mit dem ebenfalls etablierten 60 °C-Betonversuch zu erwarten ist. Einen möglichen Grund für dieses praxisferne Verhalten in den beschleunigten AKR-Prüfverfahren bei 40 °C, stellt die ausbleibende mikroskopische Bildung einer charakteristischen Reaktionszone am Rand von porösen Opalsandstein- und Flintkörnern dar, die laut Literaturangaben, essentiell für den Ablauf einer schädigenden AKR ist und u.a. verfügbares Calcium für ihre Bildung benötigt. Analoge Versuche aus abgeschlossenen Forschungsvorhaben an flugaschenhaltigen Betonen, allerdings nicht mit schnell, sondern mit langsam reagierenden Gesteinskörnungen, wie z. B. Grauwacke, liefern hingegen eine Übereinstimmung zwischen dem 40 °C- bzw. 60 °C-Prüfverfahren und dem Praxisverhalten.

Aus den gewonnenen Forschungsergebnissen sowie den daraus abgeleiteten Zusammenhängen resultiert der unbefriedigende Zustand, dass ein reelles Verwendungspotential, welches für schnell reagierende Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklassen E II-O, E III-O, E II-OF und E III-OF in Kombination mit Flugascheverwendung im Beton definitiv existiert, nicht in die Praxis umgesetzt werden kann. Dadurch wird in einigen Regionen die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit der Beton- und Stahlbetonbauweise eingeschränkt, da lokal verfügbare Gesteinskörnungen nicht genutzt werden können und stattdessen Gesteinsrohstoffe aus anderen Regionen bezogen werden müssen. Gegenwärtig sind davon schätzungsweise 50 bis 80 Kieswerke in Norddeutschland und in den neuen Bundesländern betroffen. Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte ist die Entwicklung eines zuverlässigen AKR-Prüfverfahrens für puzzolanhaltige Betone mit schnell reagierenden Gesteinskörnungen erforderlich, wenn man perspektivisch die Betonbauweise so effizient wie möglich gestalten möchte.

7.2.4. Einfluss von Tausalz und aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen der Alkali-Kieselsäure Reaktion in Beton (Fortsetzungsantrag)

Bearbeitung: Kai Fischer, M. Sc.

Förderer: DFG - Deutsche Forschungsgemeinschaft

In Deutschland sind Schäden infolge einer Alkali-Kieselsäure Reaktion (AKR) im Beton durch die Verwendung von alkalireaktiven Gesteinskörnungen (z. B. Opalsandstein, Flint, Grauwacke) bekannt. Ursache war hier die Verwendung reaktiver Gesteinskörnungen, die zusammen mit den Alkalien des Zementsteines und der Einwirkung von Wasser quellfähige Gele bilden. Überschreitet die Quellspannung der Gele die Festigkeit der Zementsteinmatrix, kommt es zu Rissen in der Matrix und fortlaufend zu einer Schädigung des Betons. In neuerer Zeit sind bekanntlich auch an Betonfahrbahndecken Schäden aufgetreten, die

nach ersten Untersuchungsergebnissen auf eine AKR zurückzuführen sind. Durch den steigenden Streusalzeinsatz des Winterdiensts erfolgt ein zunehmender externer Alkalieintrag in die mit Tausalz beaufschlagten Betonbauteile. Gerade in Bereichen mit Vorschädigungen durch Risse kann Feuchtigkeit eindringen und verstärkt Alkalien ins Bauteilinnere transportieren. Diese AKR-Schadensfälle deuten darauf hin, dass hier die Alkalizufuhr von außen eine schädigende AKR verursacht oder verstärkt hat.

Vor diesen Hintergründen bestand das Ziel des Forschungsvorhabens darin, den verschärfenden Effekt einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) in Beton durch externen NaCl-Eintrag zu untersuchen, wobei ein bedeutender Fokus des Projektes auf der ablaufenden AKR unter praxisnahen Temperaturbedingungen lag. Hierfür wurden verschiedene Betone bei 20 °C über einen Zeitraum von bis zu 3,5 Jahren in synthetischen Porenlösungen gelagert. Ein Teil der Lösungen wurde zusätzlich mit 20 M.-% NaCl aufdotiert. Im Besonderen sollte der Einfluss der Bindemittelzusammensetzung (Zement mit Flugasche und Metakaolin als Betonzusatzstoffe) in Kombination mit unterschiedlich reaktiven Gesteinskörnungen (u.a. Borosilicatglas, Grauwacke und Granit) auf die Veränderung der Betonporenlösung, die Zusammensetzung gebildeter Alkali-Kieselsäure-Gele (AK-Gele) und einem damit zusammenhängenden unterschiedlichem Ausmaß der AKR-Schädigung betrachtet werden.

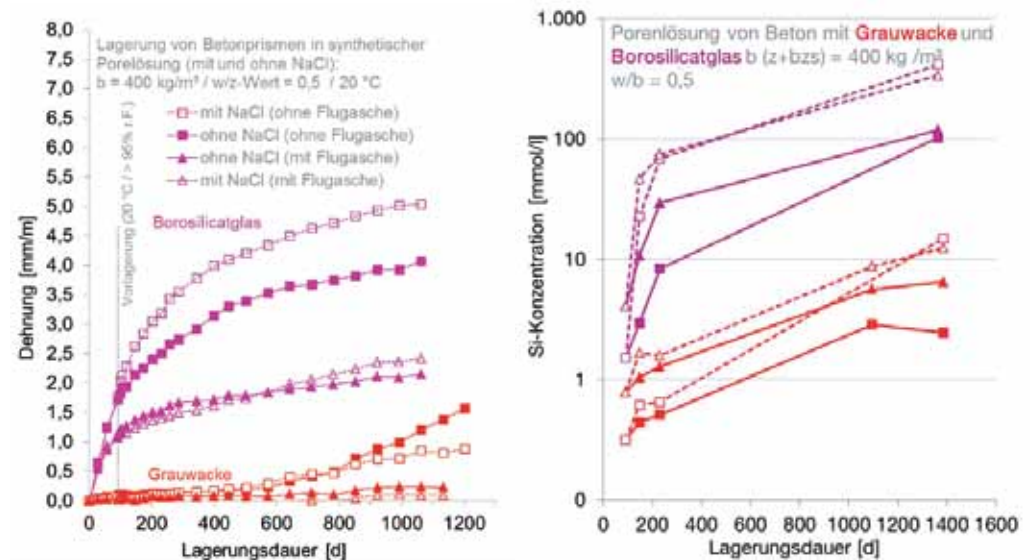
Nach einer Beanspruchungsdauer von 3,5 Jahren sind – abgesehen von den Betonen mit Borosilicatglas, in welchen bereits wenige Monate nach Lagerungsbeginn eine AKR zu verzeichnen war - auch in den Proben mit Grauwacke nachweisbare AKR-Schäden aufgetreten. Deutliche Dehnungen sowie typische durch Mikroskopie nachweisbare Schadensmerkmale bestätigen dies. Entgegen Erfahrungen aus der Baupraxis sowie auch aus eigenen Langzeitversuchen unter realer Bewitterung [1] ist keine Verschärfung der AKR durch den zusätzlichen NaCl-Eintrag feststellbar, obwohl die NaCl-Zufuhr mit einer höheren Siliciumfreisetzung aus der reaktiven Gesteinskörnung in Porenlösung korreliert (Bild 1, rechts). Dass dieser Effekt allerdings nicht zwangsläufig mit einer erhöhten AKR-Schädigung verbunden ist, belegen die Betone mit Grauwacke und Flugasche, in denen auch nach 3,5 Jahren Lagerung trotz erhöhter Si-Gehalte in der Porenlösung keine Schäden feststellbar sind. Der nicht bestätigte Einfluss der NaCl-Zugabe unterscheidet sich auch von den Untersuchungsergebnissen von Chatterji et al. [2], in welchen ein klare Verschärfung der AKR durch externe NaCl-Zufuhr nachgewiesen wurde. Ein Erklärungsansatz hierfür liegt in den abweichenden experimentellen Bedingungen. Chatterji et al. [2] führten die Versuche bei erhöhten Temperaturen von 50 °C durch und verwendeten offensichtlich eine poröse, schnell-reagierende Gesteinskörnung. Demgegenüber waren die in unserem Forschungsvorhaben vorgesehenen Gesteinskörnungen allesamt slow/late-Gesteinskörnungen. Dies betrifft ebenfalls die Betone mit synthetischem Borosilicatglas, die zwar sehr schnell reagieren, allerdings vorwiegend Schadensmerkmale einer durch slow/late-Gesteine verursachten AKR zeigt.

Zur weiteren Aufklärung der Zusammenhänge wurden daher Betone mit Grauwacke sowie zusätzlich Proben mit hoch reaktivem E III-OF –Material (Kies mit Opalsandstein/ Flint aus Norddeutschland) hergestellt und bei 20 sowie 40 °C in den synthetischen Porenlösungen mit und ohne 20 % NaCl gelagert. Die Dehnungsverläufe der Proben heben die deutlichen Unterschiede im Reaktionsvermögen zwischen dem porösen E III-OF-Material und der langsam reagierenden Grauwacke (E III-S-Material) besonders bei der 40 °C-Lagerung heraus. Übereinstimmend mit Chatterji et al. [2] bilden sich für das hoch reaktive E III-OF-Material bei 40 °C signifikante Unterschiede zwischen sehr hohen Dehnungen durch

eine zusätzliche NaCl-Zufuhr und geringeren Dehnungen ohne Eintrag von NaCl aus. Demgegenüber geht aus der 20 °C-Lagerung für beide Gesteinskörnungen keine eindeutige Verschärfung der AKR durch NaCl hervor. Welche Mechanismen die offensichtlich temperaturbedingten Diskrepanzen verursachen, konnte anhand dieses Forschungsprogramms nicht geklärt werden. In den Proben mit unreaktivem Diabas und dem sehr gering reaktiven Granit – sowie in allen Betonen mit Metakaolin – haben die 3,5 Jahre Lagerung bei 20 °C zu keiner Schädigung infolge AKR geführt.

Die Porenlösungen der Betone mit Borosilicatglas wurden zusätzlich mittels ^{29}Si -NMR untersucht, um, wie von DRESSLER [3] modelliert, mögliche Anzeichen für die Bildung eines NaHSiO_3 -Komplexes und eine damit verbundene Erhöhung der Si-Löslichkeit in der Porenlösung durch NaCl-Zufuhr nachzuweisen. Die ^{29}Si -NMR-Spektren (ohne Abbildung) zeigen deutliche Auffälligkeiten infolge der NaCl-Beanspruchung, die sich in Form ausgeprägter Q^2 -Peaks zeigen und darauf hindeuten, dass das gelöste Silicium in höher vernetzten Molekülen vorliegt. Zur genaueren Identifikation fehlen Vergleichsspektren, um den in HEISIG et al. [1] berechneten NaHSiO_3 -Komplexes nachweisen zu können. Im Gegensatz zu gelöstem Silicium aus der Gesteinskörnung und einer damit assoziierten Bildung von Alkali-Kieselsäure-Gel, verhindert nach HÜNGER [4] gelöstes Aluminium aus in Grauwacken vorhandenen mikrokristallinen Komponenten – wie Muskovit, Biotit oder eine spezielle $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Modifikation – die Bildung von quellfähigem AK-Gel. Ein signifikanter Beitrag an gelöstem Aluminium aus reaktiven Mineralphasen der Grauwacke ist unter diesen Versuchsbedingungen in den analysierten Porenlösungen nicht nachweisbar.

Bild 1:
Dehnungsverhalten von
Betonen mit Borosilicatglas
und Grauwacke (links) und Ver-
änderung der Silicium-Konzen-
trationen in den Porenlösungen
nach 3,5 Jahren Lagerung in
synthetischer Porenlösung mit
und ohne 20 M.-% NaCl.



Analog zu den höheren Siliciumkonzentrationen der Porenlösungen in den Betonen mit NaCl-Zufuhr, weisen auch die AK-Gele in diesen Proben erhöhte Si-Gehalte auf. Darüber hinaus scheinen Variationen im Silicium- und Calciumgehalt der Gele zusätzlich durch die alkaliempfindliche Gesteinsart (Grauwacke oder Borosilicatglas) und durch die Zusammensetzung des Bindemittels beeinflusst zu werden. Ein erhöhter Einbau von Aluminium durch die puzzolanisch reagierende Flugasche in den Gelen ist nicht feststellbar. Vielmehr treten auch hier Unterschiede in Abhängigkeit von der verwendeten Gesteinskörnung auf, die sich in höheren Al-Gehalten der Gele in den Proben mit Borosilicatglas äußern. Dieser Zusam-

menhang lässt sich mit einem höheren Umsatz des reagierenden Borosilicatglas erklären, obwohl dieses deutlich geringe Al_2O_3 -Gehalte, gegenüber der Grauwacke besitzt.

Das Dreistoffsystem $\text{CaO-SiO}_2\text{-K}_2\text{O+Na}_2\text{O}$ in Bild 2 veranschaulicht, dass durch Flugasche AK-Gele mit höheren Silicium- und geringeren Calciumgehalten gebildet werden. Da der Einbau von Calcium maßgeblich für ein betonschädigendes Quellvermögen von AK-Gelen verantwortlich ist (u.a. [5]), kann angenommen werden, dass durch Flugasche AK-Gele von geringerer Quellfähigkeit gebildet werden. Entsprechend liegen die Calciumgehalte der Proben mit Flugasche zumeist außerhalb jenes Bereichs, der von Mansfeld als quellfähig betrachtet wird. Zusätzlich zeigt sich ein Einfluss der reagierenden Gesteinskörnung auf die Si- und Ca-Mengen im AK-Gel. Anhand der Gelzusammensetzungen in den Proben mit Grauwacke und zusätzlicher NaCl-Beanspruchung, welche verhältnismäßig geringe Siliciumgehalte zwischen 40 und 70 M.-% und dafür höhere Calciumgehalte zwischen 20 und 55 M.-% zeigen, lässt sich dieser Zusammenhang feststellen.

Literatur

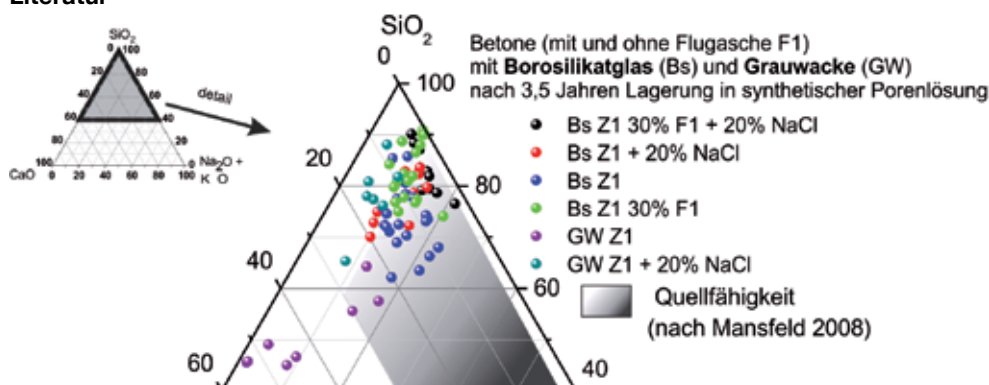


Bild: 2:
Zusammensetzung von AK-Gelen im Dreistoffsystem $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O+K}_2\text{O}$ nach 3,5 Jahren in synthetischer Porenlösung mit und ohne NaCl; markierter Bereich: Zusammensetzungen von AK-Gelen nach [5] deren zunehmende der Quellfähigkeit durch dunklere Grautöne symbolisiert ist.

- [1] Dressler, A., Urbonas, L., Heinz, D. (2014): Avoiding damaging alkali silica reaction with fly ash – long term storage investigations in EuroCoalAsh 2014 Munich. p. 281 – 292
- [2] Chatterji, S., N. Thaulow, and A.D. Jensen (1987): Studies of alkali-silica reaction. Part 4. Effect of different alkali salt solutions on expansion. Cement and Concrete Research, 17(5): p. 777-783.
- [3] Dressler, A. (2013): Einfluss von Tausalz und puzzolanischen, aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton. Technische Universität München. Munich, Germany. PhD thesis. p. 149
- [4] Hüngr, K.-J. (2007): The contribution of quartz and the role of aluminum for understanding the AAR with greywacke. Cement and Concrete Research, 37(8): p. 1193-1205.
- [5] Mansfeld, T. (2008): Das Quellverhalten von Alkalisilikatgelen unter Beachtung ihrer Zusammensetzung,. Bauhaus-Universität Weimar: Weimar. PhD thesis

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

Bearbeitung: Kai Fischer, M. Sc.

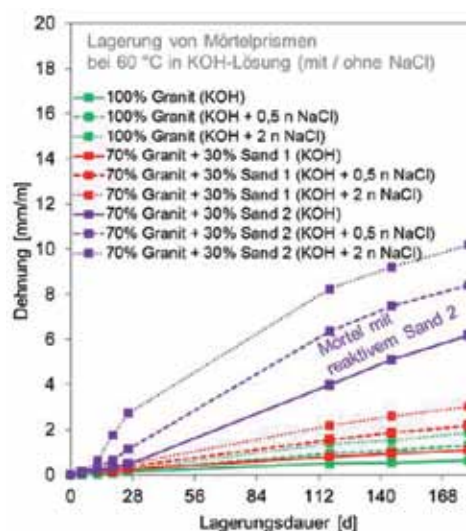
Förderer: Verein Deutscher Zementwerke e. V.

Fahrbahndecken aus Beton sind gemäß ZTV Beton-StB der Feuchtigkeitsklasse WS (feucht + Alkalizufuhr von außen + starke, dynamische Beanspruchung) zuzuordnen. Die Prüfung solcher Betone wird seit 2013 im Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau (ARS 04/2013) geregelt. Daher sind seitdem alle Betonrezepturen bzw. Gesteinskörnungen (> 2 mm) für Neubauten und Erneuerungen von Fahrbahndecken (Bk 1,8 bis 100 nach RStO 12) hinsichtlich ihrer Eignung für die Feuchtigkeitsklasse WS gutachterlich zu bewerten. Durch die Einführung des ARS sind die dort genannten Prüfungen gleichermaßen auch in Regionen anzuwenden, aus denen bisher offiziell keine Schäden durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) bekannt sind. Zu Diskrepanzen zwischen Praxiserfahrung und sog. 60 °C Betonversuch mit NaCl-Zufuhr [1] scheinen neben groben Gesteinskörnungen aus Granit auch die petrographische Zusammensetzung des verwendeten Sandes (Fraktion ≤ 2 mm) einen Einfluss auf AKR-bedingte Dehnungen im Prüfverfahren zu haben. Vor diesem Hintergrund sollte in dem Forschungsvorhaben ein Einfluss der Sandfraktion auf eine AKR unter beschleunigenden Prüfbedingungen (60 °C und NaCl-Zufuhr) betrachtet werden.

Gemäß Alkali-Richtlinie des DAfStb wurde ein Mörtel ($w/z = 0,47$, Gesteinskörnung/Zement-Verhältnis = 2,25:1) mit einem gebrochenen Granit (Fraktion 0,125 - 4 mm) hergestellt und bei 60 °C über einen Zeitraum von 180 Tagen in verschiedenen zusammengesetzten Prüflösungen gelagert. Als Basislösung wurde eine KOH-Lösung (pH-Wert rd. 13,8) verwendet. Weitere Proben wurden in identischen KOH-Lösungen gelagert, die zusätzlich mit 0,5 und 2 mol NaCl aufdotiert wurden.

In zwei zusätzlichen Mörtelrezepturen wurden 30 M.-% des Granits durch zwei petrographisch verschiedene Sande mit gleicher Kornverteilung wie der Granit ausgetauscht. In früheren AKR-Betonversuchen sind Rezepturen durch grenzwertüberschreitende Dehnungen aufgefallen, in welchen der eingesetzte Sand 2 an einer AKR beteiligt war [2]. Sand 1 zeigt erfahrungsgemäß keine Auffälligkeiten in AKR-Betonprüfungen

Bild 1:
Expansion der Prismen
bei 60 °C



Neben der Längen-, Massen- und E-Modul-Änderungen wurden ebenfalls die Porenlösungen nach 28 d und 180 d mittels ICP-OES analysiert sowie lichtmikroskopische Untersuchungen an den Mörtelprismen durchgeführt. Der Einfluss des zugegebenen NaCl und der Sande auf das Dehnungsverhalten der Mörtelprismen bei 60 °C ist in Bild 1 dargestellt. Darin zeigt sich, dass mit zunehmendem NaCl-Gehalt in der Lösung die Expansionen der Prismen ansteigen. Darüber hinaus weisen die Mörtelproben mit 70 M.-% Granit und 30 M.-% des reaktiven Sand 2 signifikant höhere Dehnungen als die anderen zwei Rezepturen auf. Reaktive Bestandteile des Sandes 2, wie Radiolarite (s. Bild

2, links) oder kieselige Kalke zeigen dabei deutliche Anzeichen einer AKR.

Im Gegensatz dazu enthalten die Mörtel mit Sand 1 geringere Schäden (Riss und Gelbildung) durch eine AKR. Die Proben mit 100 % Granit zeigen abgesehen von zahlreichen Mikrorissen in den Granitkörnern keine AKR und auch keine Bildung von Alkali-Kieselsäure-Gel (Bild 2, rechts).

Der Einfluss von NaCl und den Sanden spiegelt sich auch in der Zusammensetzung der Porenlösungen und der Lagerungslösungen wider. Durch die Zugabe von NaCl erhöht sich die Menge an gelöstem Silicium in der Porenlösung. Vergleichbar

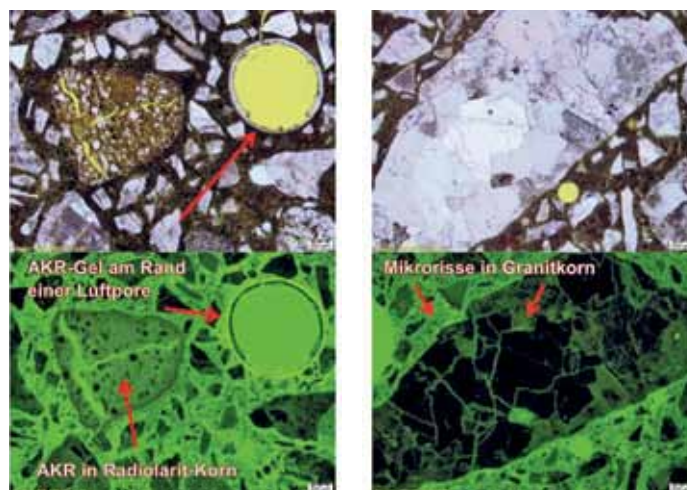
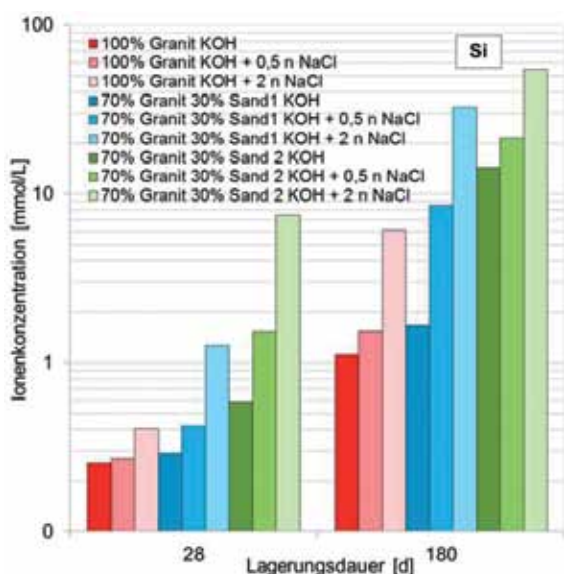


Bild 2: Lichtmikroskopische Aufnahmen mit Normallicht (oben) und UV-Licht (unten) an Proben 70%Granit+30% Sand 2 KOH+2 mol NaCl (links) und 100% Granit KOH+2 mol NaCl (rechts) nach 180 Tagen Lagerung



hohe Si-Konzentrationen in den Lagerungslösungen sind nur für die Proben mit Sand 2 feststellbar (Bild 3).

Dies deutet darauf hin, dass aufgrund fortgeschrittener AKR-Schäden in den Prismen und einer damit assoziierten Rissbildung, ein Konzentrationsausgleich zwischen Lagerungslösung und Porenlösung ermöglicht wird. Die gleichzeitige Reduzierung der Kalium- und Hydroxidkonzentrationen in Poren- und Lagerungslösung der Proben mit Sand 2 deutet auf das Ablaufen einer AKR hin.

Bild 3: Zusammensetzung der Porenlösungen nach 28 und 180 d: Si-Konzentration

Durch das Untersuchungsprogramm an Mörtelproben mit Granit bzw. Gesteinskörnungsgemischen Granit/Sand und deren Lagerung in KOH-Lösungen bei 60 °C, konnte eine Verschärfung der AKR mit zunehmender NaCl-Konzentration nachgewiesen werden. Zusätzlich zeigt sich ein signifikanter Einfluss auf die AKR durch die petrographische Zusammensetzung des Sandes.

Literatur

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

AG Betontechnologie

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

Bearbeitung: Daniel Weger, M.Sc.
Förderer: BASF SE

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

Ziel ist es, die Wirksamkeit der PAE-Fließmittel zu Reduzierung der Viskosität zementgebundener Systeme zu quantifizieren. Zu diesem Zweck wurden rheometrische Untersuchungen am Bindemittel, am Mörtel sowie am Beton durchgeführt.

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

Dabei konnte innerhalb einer Konsistenzklasse durch die Zugabe von PAE im Vergleich zu PCE eine viskositätsmindernde Wirkung erzielt werden, wobei der Effekt bei niedrigerem w/z-Wert stärker ausgeprägt war.

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

Bearbeitung: Dipl.-Ing. C. Thiel
Förderer: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen werden neben deskriptiven Regeln zunehmend probabilistische Bemessungsverfahren eingesetzt. Mit Hilfe der Modelle sind Prognosen zum Schädigungsverlauf möglich. Wichtig für die Güte der Prognosen ist die Qualität der Eingangswerte der Modelle. Beim Prozess der carbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion ist u. a. der Carbonatisierungswiderstand des Betons eine maßgebende Einflussgröße. Um diesen Widerstand bestimmen zu können, werden sogenannte Schnelltests mit hohen (praxisfremden) CO₂-Konzentrationen durchgeführt. Unklar war bisher, ob diese hohen Konzentrationen die natürlichen Vorgänge unverfälscht abbilden und Fehlprognosen ausgeschlossen werden können. Um zukünftige Verfahren mit höherer Zuverlässigkeit zu entwickeln, ist es notwendig, das Wissen über die Mechanismen der Carbonatisierung zu vertiefen. Dabei ist der Einfluss von CO₂-Partialdruck bei Gesamtgasdrücken über 1 bar und Betonfeuchtegehalt auf die Phasenbildung, Porengefüge und

Gastransport von zentraler Bedeutung. Für die Untersuchungen wurde ein Prüfgerät entwickelt, dass die einseitige Beaufschlagung von Proben mit unterschiedlichen CO_2 -Konzentrationen, definierter Feuchte und Temperatur bei verschiedenen konstanten Gasdrücken ermöglicht. In den Untersuchungen wurden dünne Mörtelscheiben in verschiedenen CO_2 / N_2 -Gasgemischen bei Variation des Gesamtgasdrucks gelagert. Mit hochmodernen Prüfgeräten wurden das physikalisch gebundene und das freie Wasser bestimmt, die Bildung und Lösung von Phasen beobachtet und das Porengefüge quantifiziert. Mörtel- und Betonzyylinder mit unterschiedlichem Feuchtgehalt wurden stirnseitig mit CO_2 belastet und Verteilungen von Wasser, Phasen sowie die Carbonatisierungstiefe und Oberflächenluftpermeabilität in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt. Die Ergebnisse wurden u.a. mit Proben verglichen, die für einen Zeitraum von bis zu fünf Jahren natürlich carbonatisierten.

Die Versuche bestätigten, dass bei moderaten Feuchtebedingungen von 65 % relativer Luftfeuchte zu hohe CO_2 -Konzentrationen ≥ 4 Vol.-% CO_2 nicht geeignet sind, um verschiedene Materialwiderstände im Rahmen einer Schnellprüfmethode zu ermitteln. So verändert ein zu hohes CO_2 -Angebot die natürlich ablaufenden Prozesse: Statt der unter natürlichen Bedingungen zeitbestimmenden Diffusion wird die Reaktionskinetik maßgebend. Es bilden sich vermehrt Reaktionsprodukte im stärker exponierten Randbereich, gleichzeitig verbleiben deutliche Mengen an Restportlandit in den Proben, was so unter natürlichen Bedingungen nicht auftritt. Durch die Verwendung moderater Gasdrücke von 2-3 bar kann diese Problematik umgangen werden, da das CO_2 durch Permeation direkt tiefer in den Baustoff eindringen kann und so eine mit der Praxis vergleichbare Reaktion hervorruft. Aufbauend auf den den Ergebnisse wurde schließlich eine Empfehlungen für einen Schnelltest für eine faire Differenzierung von Materialwiderständen hinsichtlich des Carbonatisierungswiderstands abgeleitet.

AG 3 Stahl und Korrosion

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

Bearbeitung: Dr.-Ing. Sylvia Keßler

Förderer: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

In dieser Forschungsarbeit wurde die Zuverlässigkeit der Detektion von Bewehrungskorrosion in Stahlbeton auf Basis der Potentialfeldmessung mit Hilfe der Probability of Detection (POD) Kurven quantifiziert. Die erforderlichen Datensätze für die Modellierung der POD-Kurven mit dem Hit/Miss Modell wurden numerisch generiert. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass die Prüfqualität der Potentialfeldmessung auf der Materialseite maßgeblich von der Position der Anode, vom Elektrolytwiderstand des Betons und somit auch von der Karbonatisierungstiefe des Betons bestimmt werden. Von der Inspektionsseite beeinflusst die Wahl des eingesetzten Messrasters und die Auswertungsmethode die Detektionswahrscheinlichkeit von Bewehrungskorrosion. Beispielsweise kann unter praxisnahen Randbedingungen wie einer Betondeckung von 40 mm, einem Elektrolytwiderstand von 400 Ωm und einem Messraster von 15x15 cm^2 eine Anodenfläche von 2,7 cm^2 mit 50%- und eine Anodenfläche von 5,6 cm^2 mit 90%-Detektionswahrscheinlichkeit identifiziert werden.

Für die Praxis kann abgeleitet werden, dass nun auf Grundlage der POD-Kurven die gewünschte Zuverlässigkeit der Potentialfeldmessung mit Wahl des Messrasters festgelegt werden kann. Neben der Abschätzung der Prüfqualität einer Potentialfeldmessung liefern die POD-Kurven unverzichtbare Informationen, um Potentialfelddaten für das Update der

probabilistischen Lebensdauerbewertung von Stahlbetonbauwerken nutzen zu können. Dies ist mit dem großen Vorteil verbunden, dass ein Parameter zum Updaten des Bauwerkszustandes herangezogen werden kann, der direkt den Korrosionszustand spiegelt und zudem auch räumliche Informationen zum Korrosionszustand beinhaltet. An einem Referenzbauwerk wird gezeigt, wie viel differenzierter das Update auf Basis von Potentialfelddaten ist im Vergleich zum Update mit Daten aus der Betondeckungsmessung. Dieses Beispiel zeigt, dass für die Festlegung von optimalen Inspektionsintervallen und Instandhaltungsmaßnahmen die Wahl des Inspektionsverfahren und dessen Prüfqualität von Bedeutung ist. Die Vernachlässigung der Unsicherheiten aus der Inspektion kann zu fehlgeleiteten Entscheidungen führen, die entweder unnötige Instandsetzungen verursachen oder zu Schäden mit erhöhten Kosten in der Instandsetzung.

Die ausgewerteten POD-Kurven beruhen auf einem numerischen Modell, indem der Elektrolytwiderstand homogen verteilt ist, d.h., Risse, Feuchteunterschiede etc. wie sie in natura vorkommen, wurden dadurch nicht abgebildet. Demzufolge ist davon auszugehen, dass die POD der Potentialfeldmessung bei realer Anwendung geringer ist. POD-Kurven aus numerisch ermittelten Datensätzen grenzen den unteren Bereich ab, d.h., die POD basierend auf künstlichen oder realen Defekten kann niemals besser sein.

Aufbauend auf dieser Arbeit ist in einem nächsten Schritt die Erweiterung der POD der Potentialfeldmessung von rein numerisch ermittelten Daten auf zusätzlichen Datensätzen mit künstlichen und realen Defekten wünschenswert. Die Daten aus den unterschiedlich generierten POD(numerisch), POD(künstlich) und POD(real) können anschließend auf Basis der Bayes'schen Statistik miteinander zu einer finalen POD verknüpft werden. Potentialfeldmessungen mit nachträglicher Bestimmung der Anodenfläche durch Betonabtrag sind aber nur unter großem Zeit- und Kostenaufwand realisierbar.

7.2.10. Korrosionsmonitoring in Rissbereichen realer Stahlbetonbauteile zur Wirksamkeitskontrolle des Instandsetzungsprinzips W-CI

Bearbeiter: Florian Hiemer, M.Sc.

Förderer: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb)

Befahrene Betonoberflächen von Parkbauten unterliegen infolge des Tausalzeintrages einer besonderen Gefährdung hinsichtlich Bewehrungskorrosion. Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit besteht nach dem DBV-Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ (2010) die Möglichkeit, die Betonoberfläche nach Rissbildung zeitnah mit einem rissüberbrückenden Oberflächenschutzsystem zu verschließen, auch wenn die Risse bereits einer kurzzeitigen Chloridexposition unterlagen. Zur Überprüfung, ob mit dieser Regelung womöglich ein fortlaufendes Korrosionsrisiko für die risskreuzende Bewehrung besteht, beschäftigte man sich im Rahmen von Laboruntersuchungen zunächst mit grundsätzlichen Fragen. Dabei wurde festgestellt, dass bei Biegerissen an Laborprobekörpern, die für eine kurze Zeit (vergleichbar mit einer typischen Winterperiode) für Chlorid offen zugänglich waren, das Instandsetzungsprinzip W-CI eine wirksame Maßnahme darstellt, um eine einmal initiierte Korrosion an der risskreuzenden Bewehrung wieder zu deaktivieren. Die festgestellten Querschnittsverluste blieben gering, die wenigen Lochfraßnarben wiesen nur niedrige Tiefen auf.

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war es, durch Untersuchungen an realen Bauwerken mit gerissener Betonoberfläche die Grundlagenuntersuchungen aus dem Labor durch Messungen unter praxisnahen und vergleichbaren Bedingungen zu ergänzen. Hierbei galt es, an drei Parkbauwerken im Münchener Raum mit vergleichbarer Sensorik,

die auch in den Laboruntersuchungen verwendet wurde, die Beeinflussung des Makroelementkorrosionsvorgangs im Rissbereich infolge der Aufbringung des Oberflächenschutzsystems zu bestimmen. Dafür wurde der Korrosionszustand der Bewehrung zunächst ohne Beschichtung und anschließend über den ersten Abschnitt des Lebenszyklus eines rissüberbrückenden Oberflächenschutzsystems (gesamter Messzeitraum von bis zu drei Jahren) erfasst und ausgewertet.

Grundsätzlich ermöglichte der Messaufbau die Erfassung wesentlicher Korrosionskenngrößen und damit die Bewertung des Korrosionszustands vor und nach der Beschichtung. Von den eingesetzten Messverfahren erwiesen sich die Messung des Korrosionsstroms, der Treibspannung, des anodischen Polarisationswiderstands sowie des Elektrolytwiderstands als geeignete Kenngrößen zur qualitativen Beurteilung des Korrosionszustands. Um die erfassten Parameter richtig einordnen zu können musste bei der Auswertung der Daten der Einfluss der Umgebungstemperatur berücksichtigt werden.

Es kann festgehalten werden, dass die Abdichtung von kurzzeitig chloridbelasteten Rissen bei langfristiger Betrachtung eine wirksame Maßnahme darstellte, um elektrochemisch erfasste Korrosion wieder zu deaktivieren. In 6 von 11 Fällen konnte binnen max. 21 Monaten eine komplette Deaktivierung des Korrosionsprozesses beobachtet werden. Bei den 5 verbleibenden Sensoren waren zumindest rückläufige Makroelementströme während des Beobachtungszeitraums nach der Beschichtungsmaßnahme (zwischen 6 und 22 Monaten) festgestellt worden. Hier muss das Monitoring weiter fortgeführt werden. An einem Referenzbauwerk ohne nachträglich aufgebrachtetes Oberflächenschutzsystem verstärkte sich die Korrosion hingegen deutlich.

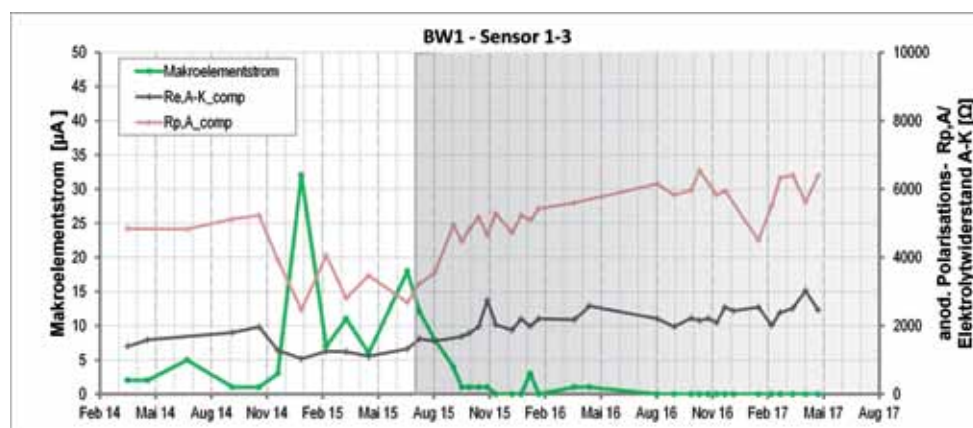


Bild 1:
Temperaturbereinigte Elektrolyt- sowie Polarisationswiderstände des Sensors 1-3

Die Ursache für die Deaktivierung der Korrosion konnte in den meisten Fällen der Erhöhung des anodischen Polarisationswiderstands zugeordnet werden, der vermutlich infolge einer auftretenden Chloridverknappung anstieg. Trocknungseffekte in Form eines steigenden Elektrolytwiderstands waren nur in zwei Fällen der maßgebende Grund. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus umfangreichen Untersuchungen, die an Laborprobekörpern bereits durchgeführt wurden.

Es bleibt jedoch zu bemerken, dass der Korrosionszustand der Bewehrung nur qualitativ beurteilt werden konnte. Eine Berechnung von Korrosionsraten war aufgrund fehlender Informationen zur wirksamen Anodenfläche nicht möglich.

AG Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine

7.2.11. FE 06.0101/2012/DRB Frostprüfung an Asphalt

Entwicklung eines Performance-Prüfverfahrens an Asphalt zur Beurteilung des Widerstands gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung von Gesteinskörnungen

Bearbeitung: Dr.-Ing. Thomas Wörner, Dipl.-Ing. Thomas Patzak

Förderer: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

Asphaltfahrbahnen sind im Winter extremen Belastungen durch Frost-Tauwechsel und den Einsatz von Taumitteln ausgesetzt. Diese Beanspruchungen können zu einer starken Schädigung vor allem der Asphaltoberfläche führen. Die derzeit geltenden Anforderungen an die Gesteinskörnungen hinsichtlich des Widerstandes gegen Frost-Tausalzbeanspruchung sind empirisch begründet. Die sich in der Praxis einstellenden Veränderungen der Fahrbahnoberfläche – vor allem durch die Einwirkung von Frost-Tauwechseln in Verbindung mit Taumitteln – können derzeit aufgrund eines fehlenden Prüfverfahrens im Labor nicht nachgestellt werden. Mit den Erkenntnissen aus den Untersuchungen wurde der Entwurf einer „Arbeitsanleitung zum CDF-Asphalt-Verfahren“ erarbeitet, auf den bei weiteren Versuchen zurückgegriffen werden kann.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Frostepfindlichkeit der untersuchten Asphaltproben – ausgedrückt mit der Oberflächenabwitterung – im Wesentlichen von den im Asphalt eingesetzten Gesteinskörnungen abhängt und nicht von den Randbedingungen beim Versuch bzw. der Vorbehandlung der Proben. Mit dem CDF-Asphalt-Verfahren sollte ein Bewertungshintergrund aufgebaut werden, in den auch die Frost-Tausalzwerte der Gesteinskörnungen mit einfließen müssen. Nur so wird es möglich sein, genauere Differenzierungen zwischen einzelnen Gesteinskörnungen anstellen zu können. Nach derzeitigem Stand bestätigen die Ergebnisse die geltenden Anforderungen an die Gesteinskörnungen; Gesteinskörnungen mit anforderungsgerechten Eigenschaften im Frost-Tausalzversuch führen auch im Asphaltversuch zu geringen Oberflächenabwitterungen. Für das CDF-Asphalt-Verfahren kann ein Orientierungswert von 200 g/m² angesetzt werden. Die Präzisionsdaten sind zu ermitteln. Das CDF-Asphalt-Verfahren kann auch zur Bewertung bereits beanspruchter Verkehrsflächen herangezogen werden. Welchen Einfluss die Versuche auf die Performance-Eigenschaften des Asphaltes haben, kann nicht abgeschätzt werden.

7.3. Laufende Forschungsvorhaben

AG Bindemittel und Zusatzstoffe

7.3.1. Einsatz von Flugasche im Beton zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion – Langzeitverhalten

Bearbeitung: Dr.-Ing. A. Heisig

Förderer: VGB-Forschungstiftung

7.3.2. AKR-Vermeidung durch Flugasche bei Alkalieintrag von außen – Langzeitlagerung

Bearbeitung: Dr.-Ing. A. Heisig

Förderer: VGB-Forschungstiftung

7.3.3. Wirkung von höheren Flugaschegehalten auf den Sulfatwiderstand von Beton – Langzeitlagerung

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

7.3.4. Expansionsspannung beim Sulfatangriff auf Beton – Einfluss von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen

Bearbeitung: M. Wagner, M. Sc.
Förderer: DFG

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

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

AG Betontechnologie

7.3.6. Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton-Auslagerungsversuch

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

7.3.7. Schalen aus gradierten Betonfertigteilen

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

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

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

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

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

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

Bearbeitung: Nicolai Klein M.Sc.
Förderer: BMVI / BAST

7.3.11. Rheology and Workability Testing of Deep Foundation Concrete

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

7.3.12. Optimale Verdichtung leichtverarbeitbarer Betone mit hoher Robustheit

Bearbeitung: Dipl.-Ing. T. Kränkel
Förderer: AiF / VDZ gGmbH

7.3.13. Optimierung von Grinding und Grooving von Betonfahrbahndecken

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

AG Stahl und Korrosion

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

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

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

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

7.3.16. WinConFat - AP3: Betonstahl unter sehr hohen Lastwechselzahlen

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

AG Zerstörungsfreie Prüfung

7.3.17. COST TU1404

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

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

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

7.4. Neue Forschungsvorhaben

AG Bindemittel und Zusatzstoffe

7.4.1. Gefügebildung in klinkerarmen Bindemitteln mit hohem Kalksteinanteil

Bearbeitung: P. Secheyko, M.Sc.
Förderer: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Im März 2017 wurde ein Forschungsvorhaben zum Thema „Gefügebildung in klinkerarmen Bindemitteln mit hohem Kalksteinanteil“ durch die DFG bewilligt.

Auf Grund der energieintensiven Herstellung von Portlandzementklinker ist die Entwicklung leistungsfähiger Betone mit einem möglichst geringen Klinkergehalt hinsichtlich der Reduzierung von CO₂-Emissionen und der Einsparung von Energie zukunftsweisend. Dabei ist Kalkstein ein Zusatzstoff, der relativ wenig Mahlenergie benötigt und nahezu uneingeschränkt zur Verfügung steht. Die Herstellung von Bindemitteln mit über 50% Kalksteinmehl liegt allerdings außerhalb der Grenzen der heutigen Technologie und kann nur mit Kenntnis der Mechanismen, welche die Entwicklung des festen Gefüges aus einem dichtgepackten Bindemittelleim steuern, erreicht werden. Dazu gehören die Wechselwirkungen

zwischen den Partikeloberflächen und den gelösten Ionen sowie den Fließmittelmolekülen. Sie bestimmen die Dispergierung der Partikel, die Keimbildungs- und Wachstumsvorgänge und vor allem die räumliche Verteilung der Hydratationsprodukte zwischen den Kalksteinpartikeln und steuern den Verlauf der Hydratation und die Festigkeitsentwicklung.

In den Experimenten werden die Ausgangsstoffe (CEM I, Calcit) in eine Reihe einzelner Korngrößenfraktionen getrennt. Zunächst werden Calcit-Fraktionen systematisch zusammengestellt, um ein Korngemisch mit einer möglichst hohen Packungsdichte zu erhalten. Im nächsten Schritt werden verschiedene Fraktionen des Calcit-Korngemisches durch CEM I-Fraktionen gleicher Größe volumetrisch ersetzt, um unterschiedliche Leime herzustellen. Dabei entspricht der Wassergehalt der Leime dem Hohlraum zwischen den Partikeln. Die Art und Dosierung des Fließmittels wird variiert. Neben der Fließfähigkeit der Leime wird die Frühhydratation detailliert untersucht. Nach längeren Hydratationszeiten werden Festigkeiten und Porengrößenverteilungen ermittelt. Der Einfluss anderer Gesteine als Substrat für die Keimbildung der Calciumsilikathydrate in dichtgepackten Bindemittelsystemen wird vergleichend untersucht. Dazu dienen dichtgepackte Korngemische aus Quarz bzw. Aragonit, die analog zu Calcit hergestellt werden. Es ist zu erwarten, dass die Entwicklung des Gefüges auch vom verfügbaren Aluminiumgehalt der Bindemittelkomponenten abhängt, weil dadurch die chemische Reaktivität des Kalksteins beeinflusst wird. Um dies zu untersuchen, werden CEM I-Partikel z.T. durch Feinstflugasche ersetzt.

Ziel des Projekts ist es, neue Erkenntnisse über Zusammenhänge zwischen der Granulometrie des Bindemittels (Bestandteile, Oberflächen, Partikelgrößen, Packung, Partikelabstand), der Porenlösung, der Adsorption von Ionen und Fließmittelmolekülen sowie deren Auswirkung auf Fließfähigkeit und den Verlauf der Gefügeentwicklung (Phasen, Porosität und Festigkeit) zu liefern.

AG Betontechnologie

7.4.2. Additive Fertigung von multifunktionalen, monolithischen Wandelementen durch Extrusion von Leichtbeton (kurz: Leichtbeton 3D-Druck)

Bearbeitung: C. Matthäus, M.Sc.

Förderer: BMUB in der Forschungsinitiative Zukunft Bau

Während in vielen Industriezweigen die additiven Fertigungsverfahren (3D-Drucken) bereits zum Stand der Technik gezählt werden können, befindet sich ihre Anwendung im Bauwesen noch in den Anfängen. Jedoch gerade für das Bauen, wo Einzelfertigung und geometrische Komplexität die Regel darstellen, birgt diese Zukunftstechnologie gewaltige Potenziale, insbesondere für eine automatische Fertigung von individualisierten Bauteilen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass additive Fertigungsprozesse langfristig auch in der Bauindustrie zu fundamentalen Veränderungen führen werden. Die Extrusion von Beton ist, aufgrund der erreichbaren Festigkeiten und Baugeschwindigkeiten, der vielversprechendste Ansatz zur additiven Herstellung von großformatigen Bauelementen. Defizite in Bezug auf Formfreiheit, Gewicht und Wärmedämmung stellen dabei jedoch noch Hemmnisse für eine in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht zufriedenstellende Anwendung in der Praxis dar.

Gegenstand des Vorhabens, das vom Centrum Baustoffe und Materialprüfung gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TUM und den Forschungspartnern HeidelbergCement, Züblin, Knauf PFT und Poraver bearbeitet wird, ist die Entwicklung

eines neuartigen industriellen Bauverfahrens für die automatische und schalungsfreie Herstellung von individuell geformten Bauelementen aus unbewehrtem Leichtbeton. Bei der vorgeschlagenen Lösung handelt es sich um ein additives Fertigungsverfahren in der Verfahrensvariante Extrusion. Aus den von einem Industrieroboter geführten Düsen wird das Material in schmalen Strängen ausgebracht; mehrere Stränge bilden eine Schicht des aus einer Vielzahl von Schichten bestehenden Bauteils. Das Verfahren erlaubt die Ausbildung von Vor- und Rücksprüngen in der Bauteiloberfläche, sowie von filigranen Hohlraumstrukturen und Kanälen, welche für eine Gradierung und Funktionalisierung des Bauteilquerschnitts genutzt werden können. Das in dem Prozess zum Einsatz kommende Druckmaterial ist ein Leichtbeton mit Blähglasgranulat und einem speziell für den Druckprozess optimierten Zement. Durch den Einsatz von Leichtbeton als Druckmaterial können die eingangs beschriebenen Hemmnisse abgebaut werden.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es mithilfe einer systematischen Werkstoffentwicklung, sowohl hinsichtlich des Zements als auch der Rheologie des Frischbetons, anwendungsreife Leichtbetonrezepturen zu finden, die sowohl in Hinblick auf die Frischbetoneigenschaften, als auch auf die Festbetoneigenschaften optimiert sind. Die Thixotropie und das Erstarrungsverhalten des Frischbetons sollen mithilfe eines rheologie-basierten Konzepts zielgenau auf die Druckgeschwindigkeit angepasst werden. Zudem berücksichtigt das Konzept, dass zwischen nebeneinander liegenden Strängen und übereinander liegenden Schichten ein guter Verbund erreicht wird. Für den Fertigungsprozess wird eine auf den Werkstoff abgestimmte, kontinuierlich arbeitende Mischer-Extruder-Einheit mit kurzen Wegen für den Frischbeton genutzt. Durch die Optimierung und Automatisierung der Prozesse soll das Ziel einer durchgängigen digitalen Prozesskette erreicht werden.

Durch die Kombination des Fertigungsverfahrens Extrusion mit dem Werkstoff Leichtbeton wird es möglich, frei geformte, monolithische Außenwandbauteile ohne zusätzliche Wärmedämmschichten, auch für den Einsatz unter mitteleuropäischen Klimaverhältnissen und Standards, zu fertigen.

7.4.3. Industrieller 3D-Betondruck durch selektive Zementaktivierung – Verfahren, Material, Anwendungen (Erkenntnistransfer-Projekt)

Bearbeitung: D. Weger, M.Sc.

Förderer: DFG

Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse des DFG Vorgängerprojekts „Additive Fertigung frei geformter Betonbauteile durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen“ (GE 1973/19 und WI 2879/4) im Rahmen des SPP1542 „Leicht Bauen mit Beton“ ist es das Ziel des Transferprojektes, das selektiv bindende 3D-Druckverfahren „selektive Zementaktivierung“ aus dem Stadium der Grundlagenforschung in ein für die Bauindustrie anwendbares Prototypenstadium zu überführen und mit dieser Technik erstmalig Bauteile aus Beton mit relevanten Festigkeiten und Größen für den Bau fertigen zu können.

Bei der selektiven Zementaktivierung wird ein trockenes Partikelbett bestehend aus feiner Gesteinskörnung und Zement durch das Aufbringen einer flüssigen Phase bestehend aus Wasser und ggf. Additiven selektiv verfestigt. Im laufenden Vorhaben GE1973/19 und WI 2879/4 wurden bereits fundierte Kenntnisse über die Material- und Verfahrenstechnik gewonnen, die im Labormaßstab die Fertigung von Bauteilen mit konstruktiv relevanten Festigkeiten und mit guter Oberflächenauflösung und Formtreue ermöglichten. Dazu wurden kleinmaßstäbliche Demonstratoren erstellt, die die Möglichkeiten der Produktion von

hochkomplexen Bauteilen mit Überhängen ohne weitere Stützkonstruktionen zeigten, die mit anderen Verfahren wie geschaltem Beton oder der additiven fertigen Betonextrusion nicht oder nur schwer realisierbar sind.

Am Ende des Transferprojektes soll ein vom Anwendungspartner Progress entwickelter und produzierter, großmaßstäblicher Prototyp eines 3D-Druckers mit einem Bauraum von ca. (L x B x H) 4,5 m x 2,5 m x 1,0 m für die Produktion von maßgefertigten, frei geformten Bauteilen für den Einsatz in kraftflussoptimierten, leichten Tragwerken und für den Bau verlorener Schalung im Realmaßstab zur Verfügung stehen. Des Weiteren soll durch die Weiterentwicklung der Materialtechnik die Produktion von Bauteilen für den Einsatz in tragenden Bauteilen im Innen- und Außenbereich möglich sein sowie Rahmenbedingungen für den Einsatz geeigneter Material-Nachbehandlungs-Kombinationen in großen 3D-Drucksystemen geschaffen werden. Besonderer Fokus liegt dabei auf der Isotropie der Materialeigenschaften sowie dem Schichtenverbund. Abschließend soll durch neu entwickelte Anwendungskonzepte und Detaillösungen ein vereinfachter Einstieg für den Einsatz der selektiven Zementaktivierung im Bauwesen geschaffen werden. Neben dem Schwerpunkt der Herstellung unbewehrter Bauteile sollen erstmals Konzepte für die Anwendung von nachträglich eingebrachter und extern vorgespannter Spannbewehrung entwickelt und in einem Prototyp umgesetzt werden.



Mittels selektiver Zementaktivierung hergestellter Demonstrator (links)
Extrudiertes Wandelement aus Holzfaserbeton (rechts)
(Fotos: D. Weger)

7.4.4. Potentialanalyse – Prozesssichere Herstellung lärmarmer Straßen in Betonbauweise (OPB – Offenporiger Beton)

Bearbeitung: N. Klein, M.Sc.
Förderer: BAST

Straßenbetone gelten im Allgemeinen als „laute“ Bauweise. Zwar wird mit der derzeitigen Regelbauweise Waschbeton eine regulative Pegelminderung um -2 dB(A) gegenüber einer Referenzoberfläche erreicht, einem Vergleich mit dem seit Jahren eingesetzten offenporigen Asphalt mit einer Pegelminderung von -5 dB(A) hält dieser jedoch nicht stand. Demgegenüber weist die Betonbauweise signifikante Vorteile bei der Dauerhaftigkeit und

Bild 1:
Zylinder aus offenporigem
Beton



dem Lastabtrag auf. Um die Vorteile des Betonstraßenbaus auch in Bereichen nutzen zu können, bei denen ein erhöhtes Maß an Lärmschutz eingehalten werden muss, wurden in den letzten Jahren wiederholt Ansätze zum Bau von offenporigen Betonfahrbahnen gestartet. Zwei Beispiele hierfür stellen eine Versuchsstrecke auf der duraBAST [1] und die PWC-Anlage Silberbach (nahe Ansbach) dar. Hier traten jedoch Probleme sowohl im Bereich der Betontechnologie als auch der Prozesstechnik auf. Vor diesem Hintergrund werden derzeit in einem gemeinsamen Forschungsprojekt des Lehrstuhls für Verkehrswegebau und des cbm Lösungen entwickelt, die im Rahmen einer Teststrecke nahe München erprobt werden sollen.

Im Rahmen der Untersuchungen am cbm wird hierbei die eingesetzte Rezeptur für offenporigen Beton optimiert. Neben dem obligatorischen Hohlraumgehalt des Betons, liegt der Fokus auf der Verarbeitbarkeit. Dabei soll die für den Fertiger optimale Konsistenz erreicht und diese für mindestens 90 Minuten beibehalten werden. Auch jahres- und tageszeitabhängige Temperaturen und deren Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Betons werden berücksichtigt. Zudem muss die Festigkeit und Dauerhaftigkeit der entwickelten Rezeptur sichergestellt werden.

[1] http://www.durabast.de/durabast/DE/Untersuchungen/OPB/OPB_node.html, aufgerufen am 31.01.2018

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

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

Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen werden neben deskriptiven Regeln zunehmend probabilistische Bemessungsverfahren eingesetzt. Mit Hilfe der Modelle sind Prognosen zum Schädigungsverlauf möglich. Wichtig für die Güte der Prognosen ist die Qualität der Eingangswerte der Modelle. Beim Prozess der carbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion ist u. a. der Carbonatisierungswiderstand des Betons eine maßgebende Einflussgröße. Um diesen Widerstand bestimmen zu können, werden sogenannte Schnelltests mit hohen (praxisfremden) CO₂-Konzentrationen durchgeführt. Unklar war bisher, ob diese hohen Konzentrationen die natürlichen Vorgänge unverfälscht abbilden und Fehlprognosen ausgeschlossen werden können. Um zukünftige Verfahren mit höherer Zuverlässigkeit zu entwickeln, ist es notwendig, das Wissen über die Mechanismen der Carbonatisierung zu vertiefen. Dabei ist der Einfluss von CO₂-Partialdruck bei Gesamtgasdrücken über 1 bar und Betonfeuchtegehalt auf die Phasenbildung, Porengefüge und Gastransport von zentraler Bedeutung. Für die Untersuchungen wurde ein Prüfgerät entwickelt, dass die einseitige Beaufschlagung von Proben mit unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen, definierter Feuchte und Temperatur bei verschiedenen konstanten Gasdrücken ermöglicht. In den Untersuchungen wurden dünne Mörtelscheiben in verschiedenen CO₂/N₂-Gasgemischen bei Variation des Gesamtgasdrucks gelagert. Mit hochmodernen Prüfgeräten wurden das physikalisch gebundene und das freie Wasser bestimmt, die Bildung

und Lösung von Phasen beobachtet und das Porengefüge quantifiziert. Mörtel- und Betonzyylinder mit unterschiedlichem Feuchtgehalt wurden stirnseitig mit CO₂ belastet und Verteilungen von Wasser, Phasen sowie die Carbonatisierungstiefe und Oberflächenluftpermeabilität in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt. Die Ergebnisse wurden u.a. mit Proben verglichen, die für einen Zeitraum von bis zu fünf Jahren natürlich carbonatisierten.

Die Versuche bestätigten, dass bei moderaten Feuchtebedingungen von 65 % relativer Luftfeuchte zu hohe CO₂-Konzentrationen ≥ 4 Vol.-% CO₂ nicht geeignet sind, um verschiedene Materialwiderstände im Rahmen einer Schnellprüfmethode zu ermitteln. So verändert ein zu hohes CO₂-Angebot die natürlich ablaufenden Prozesse: Statt der unter natürlichen Bedingungen zeitbestimmenden Diffusion wird die Reaktionskinetik maßgebend. Es bilden sich vermehrt Reaktionsprodukte im stärker exponierten Randbereich, gleichzeitig verbleiben deutliche Mengen an Restportlandit in den Proben, was so unter natürlichen Bedingungen nicht auftritt. Durch die Verwendung moderater Gasdrücke von 2-3 bar kann diese Problematik umgangen werden, da das CO₂ durch Permeation direkt tiefer in den Baustoff eindringen kann und so eine mit der Praxis vergleichbare Reaktion hervorruft. Aufbauend auf den den Ergebnisse wurde schließlich eine Empfehlungen für einen Schnelltest für eine faire Differenzierung von Materialwiderständen hinsichtlich des Carbonatisierungswiderstands abgeleitet.

AG Stahl und Korrosion

7.4.6. Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

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

Eine leistungsfähige Infrastruktur ist das Rückgrat des Wirtschaftsstandortes Deutschland. Die Ingenieurbauwerke sind hierbei die neuralgischen Punkte – nicht nur weil sie zu den teureren, sondern auch zu den langlebigeren Gütern einer Verkehrsinfrastruktur zählen. Damit die Ingenieurbauwerke ihre geplanten Lebensdauern erreichen, stehen für die Bemessung der Dauerhaftigkeit im Bereich der karbonatisierungs- und chloridinduzierten Bewehrungskorrosion voll-probabilistische Prognosemodelle zur Verfügung. In den Prognosemodellen wird der Widerstand (Material) der Einwirkung (Exposition) gegenübergestellt unter der Grenzzustands-betrachtung der Depassivierung der Bewehrung. Die Bewehrungskorrosion wird dann initiiert, wenn ein kritischer Chloridgehalt die Betonstahloberfläche erreicht, bzw. die Karbonatisierungsfront bis zur ersten Bewehrungslage vordringt.

Die Dauerhaftigkeitsbemessung von neu zu errichteten Infrastrukturbauwerken erfolgt nach aktuellen Regelwerken rein deskriptiv. In Abhängigkeit der zugeordneten Expositionsklasse werden Mindestanforderungen an die Betonzusammensetzung und die Betondeckung gestellt, so werden Vorgaben an die Parameter max. Wasserzementwert, Mindestzementgehalt, höchstzulässiger Mehlkorngelalt, zugelassene Zementart, Mindestdruckfestigkeit, Mindestbetondeckung und ein zulässiges Vorhaltemaß, max. Eigenchloridgehalt des Betons und max. Rissbreite gemacht. Diese Parameter beschreiben den Widerstand des Betons gegenüber einer Depassivierung der Bewehrung infolge von Chlorideindringen und Karbonatisierung. Diese Mindestanforderungen der Normung beruhen neben wissenschaftlichen Erkenntnissen und Produktnormen von Betonausgangsstoffen im Wesentlichen auf nationalen Erfahrungen und sollen eine geplante Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren unter üblichen Instandhaltungsbedingungen sicherstellen.

Die deskriptive Dauerhaftigkeitsbemessung hat den großen Nachteil, dass die Beurteilung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke mangels Informationen der Betonzusammensetzung meist nicht anwendbar ist. Zielführender und praktikabler wäre ein auf Performance basierendes Bemessungsverfahren, das durch den Einsatz von voll-probabilistischen Bemessung realisierbar ist. In einem ersten Schritt in diese Richtung ist es sinnvoll, zunächst die deskriptiven Anforderungen im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit zu überprüfen. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist daher, ein Benchmark der deskriptiven Dauerhaftigkeitsbemessung für Brückenbauwerke der Bundesanstalt für Straßenwesen mit dem Fokus auf Depassivierung der Bewehrung aufgrund von Chlorideindringen und Karbonatisierung auf Basis von voll-probabilistischen Modellen aufzustellen und auszuwerten.

7.4.7. Einfluss einer Betonbeschichtung auf die Mechanismen der Bewehrungskorrosion in gerissenem, kurzzeitig tausalzexponiertem Stahlbeton

Bearbeitung: Florian Hiemer, M.Sc.

Förderer: DFG

Befahrene Stahlbetonoberflächen und aufgehende Bauteile von Parkbauwerken sind in den Wintermonaten einer besonderen Korrosionsbelastung ausgesetzt. Gerissene Betonbauteile sind besonders gefährdet, da Risse eine erhebliche Schwachstelle gegenüber eindringenden Chloriden darstellen. Daher wird in einschlägigen Regelwerken vorgegeben, bei besonders gefährdeten Bauwerken wie Parkdecks, dem Eindringen von Chloriden durch zusätzliche Maßnahmen dauerhaft entgegenzuwirken. Für die Erstellung solcher Bauwerke wird weiterhin auf das DBV Merkblatt 2010 „Parkhäuser und Tiefgaragen“ verwiesen, in dem verschiedene Entwurfssätze und Ausführungsvarianten zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit beschrieben werden. Eine Variante sieht vor die Betonoberfläche mit einem rissüberbrückendem Oberflächenschutzsystem (OS) nach abgeschlossener Rissbildung zu verschließen, um eine weitere Chlorid- und Feuchtezufuhr zu verhindern und damit den elektrischen Widerstand des Betons zu erhöhen. Darin wird davon ausgegangen, dass eine vorangegangene kurzzeitige Chloridexposition von maximal einer Winterperiode keine sicherheitsrelevanten Korrosionsschäden bewirkt.

Im Rahmen eines vorangegangenen Forschungsvorhabens wurde in praxisnahen Experimenten der Fragestellung nachgegangen, ob die im DBV Merkblatt 2010 formulierte Position bestätigt werden kann. Dabei wurden aufwändig instrumentierte Stahlbetonproben mit Biegerissen einer 12-wöchentlichen Chloridbelastung ausgesetzt, anschließend beschichtet und während des gesamten Zeitraums alle relevanten Korrosionsparameter der Bewehrungselemente erfasst und kontinuierlich aufgezeichnet.

Die zur statistischen Absicherung in großem Umfang durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass bei Biegerissen die Beschichtung der Betonoberfläche tatsächlich eine wirksame Maßnahme darstellt, um eine kurzzeitig an der risskreuzenden Bewehrung initiierte Makrokorrosion wieder zu deaktivieren. Binnen einem Jahr nach Beschichtung kamen bis auf eine Ausnahme alle zuvor aktivierten Proben zum Erliegen (der Chloridgehalt lag bei 95% der Proben über 0,5 M.-%/z).

Überraschende Erkenntnis nach Auswertung aller erfassten Korrosionsparameter war aber, dass die Wirksamkeit der nach kurzzeitiger Chloridexposition aufgetragenen Beschichtung nicht mit einer Trockenlegung (relevante Erhöhung des Elektrolytwiderstands) des Betons begründet werden konnte (Prinzip W-Cl). Weitergehende Auswertungen ergaben, dass die aufgezeichneten Entwicklungen der anodischen Polarisationswiderstände R_{pa} darauf hin-

deuten, dass entweder Deckschichtbildung und/oder ein Wegtransport korrosionsauslösender Chloride (Verknappung des Chloridangebots) verantwortlich sein könnten.

Welchen genauen Einfluss aber diese beiden vermuteten Effekte auf die festgestellte Wirksamkeit der Maßnahme bei Biegerissen genau hatten, war mit der in diesem Vorhaben gewählten Methodik und Vorgehensweise nachträglich nicht mehr möglich. Auch war mit der im erwähnten Vorhaben verwandten Methodik eine Trennung zwischen Mikro- und Makrokorrosion nicht möglich, die bei genauer Quantifizierung Gewissheit darüber hätte geben können, zu welchen Anteilen Mikro- und Makrokorrosionsaktivität an den nach Ausbau festgestellten Korrosionsnarben beteiligt war. Auch konnte nicht quantifiziert werden, ob nach Deaktivierung von Makrokorrosionselementen sich ggf. abgekoppelte Mikrokorrosionselemente noch zu weiterem Abtrag führen können.

Erweitert man die in diesem Vorhaben ausschließlich untersuchte Problematik von Biegerissen auf die in diesem Vorhaben komplett ausgeklammerte Problematik der Trennrisse, kommen weitere Fragezeichen dazu. Anders als bei Biegerissen, in denen das chloridbelastete Tauwasser i.d.R. vergleichsweise lange ansteht, werden Trennrissen intermittierend stetig von frischer Lösung, d. h., von stetig neu eingetragenen Schadstoffen durchdrungen. Auch die Versorgung mit Sauerstoff ist mit von unten intermittierend belüfteten Trennrissen eine völlig andere als bei Biegerissen. Die Rissart könnte daher ein maßgebender Einflussfaktor hinsichtlich der Korrosionsgefährdung nachträglich beschichteter, befahrener Betonoberflächen sein. Im neuen Vorhaben soll daher geklärt werden:

- Welche Mechanismen (Deckschichtbildung oder Verknappung des Chloridangebots) sind mit welcher Gewichtung für die signifikante Reduktion der Makrokorrosionsaktivität auf technisch vernachlässigbare Werte im Biegeriss verantwortlich?
- Können die an Biegerissen beobachteten Zusammenhänge auch in gleicher Weise auf Trennrisse übertragen werden, oder schlägt hier u. U. durch die mögliche Austrocknung von unten die elektrolytische Kontrolle des Systems stärker durch?
- Können sich in Lochfraßnarben auch Mikrokorrosionselemente komplett abkoppeln?

AG Chemie

7.4.8. Aufklärung dauerhaftigkeitsrelevanter Transportphänomene in Beton durch Optimierung der ortsaufgelösten mikrochemischen Analyse mit Laserablations-ICP-MS

Bearbeitung: Marco Decker, M.Sc.
Förderer: DFG

Die LA-ICP-MS eine Messmethode mit großem Potential in Bezug auf ortsaufgelöste Flächen- und Tiefenprofilanalysen von Elementverteilungen in und auf Bauwerkstoffen. Vorteile liegen in der Probenpräparation, sehr niedrigen Nachweisgrenzen (ppb Bereich für die meisten Metalle) sowie die quasi-zerstörungsfreie Prüfung (Abtrag im mg-Bereich). Die Ergebnisse der verschiedenen Anwendungen wurden jedoch immer wieder dadurch limitiert, dass oft keine genaue Quantifizierung möglich war. Die Ursache liegt in dem komplex zusammengesetzten Material Beton, sowohl im Mikro- als auch im Makromaßstab.

Aufgrund der unterschiedlichen Wechselwirkungen des Lasers mit den Phasen in den Gesteinskörnungen und der Zementsteinmatrix wird während einer Analyse Material aus unterschiedlichen Tiefen der Betonoberfläche ablatiert und analysiert. Dieser Effekt kann die Gesamtmessung, aber auch nur einzelne Elemente („Fraktionierung“) betreffen.

Dieses Phänomen hängt von verschiedensten Faktoren wie Härte und UV-Absorption der Phasen bei der Wellenlänge des Lasers (213 nm) ab. Im Mörtel/Beton-System kommen vor allem Silicium und Calcium in verschiedensten Phasen vor (Si in CSH im Zementstein und als Quarz in der Gesteinskörnung oder als mehlfeiner Zusatzstoff; Ca in CSH und in Calcit/Dolomit in der Gesteinskörnung oder als Zusatzstoff).

Hier soll das neue Forschungsprojekt ansetzen. Mit dessen experimentellen Ergebnissen sollen Mess- und Auswertemethoden entwickelt werden, die eine schnelle und eindeutige Differenzierung von Zementstein und Gesteinsmaterial sowie eine genaue Bestimmung der Verteilungen von Elementen in der Zementsteinmatrix, Übergangszone und Gesteinskörnungen des Betons ermöglichen.

Es sollen zwei Haupttypen von Prüfkörpern untersucht werden, um diese Effekte zu analysieren: Zum einen Presslinge, die aus Mischungen von gemahlten Zementsteinen (mit unterschiedlichen w/z-Werten und Zusatzstoffen) und Gesteinsscheiben oder gesiebten Gesteinskörnungen hergestellt werden. Diese bieten den Vorteil hoher Homogenität. Die Zumischung, zum einen als Mehl und zum anderen als Sand, ermöglicht es, dass der Laser jeweils nur eine Phase nach der anderen ablatiert (Sand) oder beide gleichzeitig (Mehl). Zum anderen werden Schnittflächen von Proben untersucht, die wiederum aus den gleichen Stoffen zusammengesetzt sind und bei denen aber durch reguläres Abbinden des Zements im Kontakt mit den Gesteinsscheiben bzw. -körnungen Inhomogenitäten in den Kontaktbereichen und Poren zu erwarten sind.

Die gewählten Probenzusammensetzungen sollen zum einen breites Spektrum an Elementzusammensetzungen der Zementsteinmatrix bieten (je nach Mischung hohe Al-, Si- oder Ca-Anteile) und zum anderen als weiteres Ziel Aussagen zum Einfluss von Zusatzstoffen auf die Laser-Material-Wechselwirkungen ermöglichen. Die verschiedenen w/z-Werte der geschnittenen Proben führen zu unterschiedlichen Härten, welche bei der Untersuchung einen Aufschluss geben, welchen Einfluss die makroskopische Härte des Betons auf die Ablationseigenschaften hat. Bei den Presslingen können durch unterschiedliche Drücke verschiedene Härten generiert werden und die Ergebnisse denen der Prismenversuche gegenübergestellt werden.

Um die Fraktionierung weiter zu untersuchen, werden die Ablationskrater nach den Messungen mit einem Mikroskop vermessen und die jeweils ablatierten Materialmengen bestimmt. Verschiedene Kalibrationsstrategien, die es ermöglichen sollen, die Effekte auszugleichen, werden getestet. Ziel ist es, einen Korrelationsfaktor zwischen der Menge an ablatiertem Material und Detektorsignal zu bestimmen, um mit der verbesserten Auswertestrategie den Weg zu einer quantitativen Analyse des heterogenen Materials mit verringerter Varianz zu ebnen.

Die Ergebnisse aus der LA-ICP-MS werden zur Kontrolle mit den nasschemischen Analysen der verschiedenen Phasen korreliert. Nach entsprechender Optimierung können mit LA-ICP-MS Verteilungen von C, S, Na, K, Ca, Mg, Al, Si und Fe über die Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung von zementgebundenen Baustoffen bestimmt werden. Die Bestimmung von solchen Verteilungen ist von hoher Bedeutung für die aktuellen Forschungsschwerpunkte am cbm: AKR-Schädigung, Sulfatwiderstand, Carbonatisierungswiderstand, Eindringen von Chlorid, Freisetzung von umweltrelevanten Stoffen. Dabei können folglich mit quantitativen Elementverteilungen zahlreiche aktuelle experimentelle Arbeiten ergänzt werden und die makroskopischen Effekte in Betonen noch weitergehend als bisher mit mikrochemischen Abläufen verknüpft und erklärt werden.

AG Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine

7.4.9. Praxisgerechte Beurteilung der Qualität von feinen Gesteinskörnungen für den Anwendungsbereich Asphalt

Bearbeitung: Dr.-Ing. T. Wörner

Partner: TPA – Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation GmbH, Wien
Institut für Angewandte Geologie (IAG), Universität für Bodenkultur Wien
PETRO-MIN Experts Sàrl/GmbH

Zur Beurteilung der Qualität der Feinanteile ($< 0,063$ mm) fordern europäische Produktnormen für Asphalt die Ermittlung von Kennwerten nach dem Methylenblau (MB)-Verfahren und für ungebundene Schichten zusätzlich nach dem Sandäquivalent (SE)-Verfahren. Die europäische Normung wird daher künftig für beide Verfahren Kategorien vorgeben, die in nationalen Anwendungsdokumenten Qualitätseinstufungen zugeordnet werden müssen. Ziel des Forschungsvorhabens ist es daher, mit geeigneten Methoden die Aussagekraft dieser Verfahren zu verifizieren, praxisgerechte Qualitätseinstufungen vorzunehmen oder besser geeignete Alternativen vorzuschlagen.

Der Innovationsgehalt des Vorhabens liegt in der wissenschaftlichen Herangehensweise zur Klärung der Fragestellung. Nachdem die Qualität der Feinanteile überwiegend von den Eigenschaften der enthaltenen Schichtsilikate abhängt, hat die BIEGE den Ansatz gewählt, MB- und SE-Werte an künstlich zusammengesetzten Gemischen mit schädlichen Mineralen zu ermitteln. Diese werden die wesentlichen Schichtsilikate als Reinphasen in definiert abgestuften Gehalten, aber auch häufige natürliche vorkommende Schichtsilikatgemenge umfassen, die zuvor in einem mineralogischen screening von natürlichen Straßenbaumaterialien erfasst werden.

Gleichzeitig werden praxisnahe Bewertungshintergründe für die durchgeführten Versuche aufgebaut. Dafür werden die Ressourcen der Konsortialpartner gebündelt und aus allen 3 DACH-Ländern zumindest 30 natürliche repräsentative Materialien bekannten Verhaltens beschafft und den vorgesehenen Untersuchungen unterzogen. Diese beinhalten neben MB und SE auch umfassende mineralogisch-petrographische Charakterisierungen nach dem Stand der Technik mit besonderem Bezug zu den Erfahrungen in Österreich und Schweiz sowie performance-Versuche (deutsche Schüttelabriebe sowie Spaltzugversuche an Asphaltprobekörpern und Frosthebungsversuche an ungebundenem Material). Korrelationen der Versuchsergebnisse mit exakt bekannten Mineralgehalten ermöglichen die Evaluierung deren Aussagekraft. Mit Hilfe der ermittelten Bewertungshintergründe können schließlich Kategorien mit sinnvollen Qualitätsabstufungen vorgeschlagen werden. Grundlage für optimale Vergleichbarkeit der verschiedenen Versuche ist die ausschließliche und exakt definierte Variation der Feinanteile bei Konstanz der gröberen Fraktionen in mineralogischer und granulometrischer Hinsicht (Verwendung eines Referenzmaterials). Dies gewährleistet die einwandfreie Beurteilung, welche Minerale bei Kontakt mit Wasser als schädlich für Asphalt einzustufen sind.

Durch gezielte Variation der Feinanteil-Gehalte in der Prüfkörnung wird außerdem die schädliche Menge an Feinanteilen in der Lieferkörnung eruiert. Ergänzende Messreihen an natürlichen Materialien, deren Feinanteile durch inaktives Kalksteinmehl ersetzt werden, erlauben schließlich Aussagen zur Relevanz der Sandfraktion für die Beurteilung der Qualität der feinen Gesteinskörnung. Als vielversprechendes alternatives Verfahren zu MB und SE wird der in Deutschland bereits seit Jahren erfolgreich praktizierte Schüttelabrieb

erachtet. Ebenso könnte eine vereinfachte mineralogisch-petrographische Analyse eine für den Routine-Laborbetrieb taugliche Methode darstellen, Feinanteilqualitäten für Asphalt praxisgerecht und zeitnah zu beurteilen.

7.5. Wissenschaftliche Materialprüfung

Auf den Spuren dunkler Materie

Die Arbeitsgruppe 4 des cbm wurde letztes Jahr für eine sehr spezielle Materialprüfung aufgesucht. Im Rahmen des europaweiten CRESST-Projektes (CRESST - Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers) an dem mehr als 50 Forscher aus vielen Nationen beteiligt sind, suchen Wissenschaftler nach nichts geringerem als dem Nachweis dunkler Materie. Hierbei arbeiten speziell entwickelte Detektoren bei sehr tiefen Temperaturen. Im Zentrum jedes Detektors befindet sich ein Calciumwolframatkristall, der die Detektion der zu messenden Teilchen übernimmt. (Bild 1). Bei der Herstellung des hochreinen Kristalls ist vor allem darauf zu achten, dass der Kristall frei von radioaktiven Strahlern wie Thorium, Strontium, Uran etc. ist, welche als Spurenbestandteil jedoch fast überall vorkommen. Diese Strahler würden bei der Messung der dunklen Materie durch die emittierte radioaktive Strahlung einen Untergrund erzeugen, der zu einer Fehlinterpretation eines möglichen Signals führen könnte.

Die Schwierigkeit des Nachweises, ob der Calciumwolframatkristall frei von Strahlern ist, bestand hierbei darin, dass das für die Detektorkerne benötigte hochreine Calciumwolframat in Säuren sehr schlecht löslich ist. Darüber hinaus geht das Auflösen an sich auch wieder mit Kontaminationen von Behältern, Luft, und dem Lösemittel an sich einher, weshalb nachschemische Analysemethoden hier nicht anwendbar sind. Andere zerstörungsfreie Methoden wie EDX sind für den Spurennachweis in solchen Größenordnungen nicht sensitiv genug.

Hier konnte das cbm mit der Laser-Ablation-ICP-MS Abhilfe leisten. Die ICP-MS ist für den Nachweis von schweren Metallen (allerdings in Lösung) im ppb-Bereich (ppb = part per billion, Einheit ng/g) wie sie in diesem Fall von Interesse waren, bereits weit verbreitet. Mithilfe der vorgeschalteten Laser Ablationseinheit konnte auf das Aufschließen verzichtet werden, da ein hochenergetischer gepulster Laserstrahl das Material verdampft und mithilfe von hochreinem Heliuminertgas direkt in die ICP-MS leitet.

Element	vorher [ng/g]	nachher [ng/g]
Sr	27585,02	521,45
La	51,07	14,12
Ce	35,74	13,42
Au	364,49	338,77
Th	2,56	1,67
U	1,86	0,20

Tabelle:
Ausgewählte Elementgehalte
vor und nach dem Reinigen der
Kristalle

Kommerziell erworbene Calciumwolframatkristalle (welche für diese Anwendung noch einen zu hohen Gehalt an Verunreinigungen enthalten) wurden nach einem durch die TUM-Physik durchgeführten speziell entwickelten Reinigungsschritt analysiert und so konnten die Gehalte jedes Elements vor und nach der Reinigung verglichen werden (siehe Tabelle 1). Folglich ist deutlich zu erkennen, dass durch die Produktion an der TUM

mit ausgewählten Rohmaterialien und in sauberer Umgebung bereits ein Fortschritt in Sachen Reinheit erzielt werden konnte, wobei allerdings der Reinigungsschritt bei manchen Elementen effektiver war als bei anderen ist. Wie bereits zu Beginn erwähnt zeigt sich an diesem Beispiel die hohe Nachweisempfindlichkeit der LA-ICP-MS sehr eindrucksvoll.



Bild 1: Forscher des CRESST Projektes beim Einbau von Detektoren, welche im Inneren Calciumwolframatkristalle enthalten.

[1] http://www.cresst.de/exp_overview.php

7.6. MPA BAU – fast 150 Jahre Laborgeschichte

Materialprüfungsamt für das Bauwesen, Abteilung Baustoffe

Nur zwei Jahre nach Entstehung der Technischen Universität München im Jahr **1868** eröffnete innerhalb der TUM das *Mechanisch-Technische Laboratorium (MTL)* unter der Leitung von Johann Bauschinger (Mathematiker und Bautechniker) und war damit das erste Werkstoffprüfungsinstitut an einer Hochschule. Als **1912** das *Institut für Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Betons und der Mörteltechnik* gegründet wurde, führte das zur Trennung der Forschung von den amtlichen Prüfungen, die weiterhin im MTL durchgeführt wurden. 13 Jahre später nahm man eine weitere Teilung des MTL vor: Ab **1925** wurden Prüfungen, die dem Maschinenbau zugeordnet wurden im *Mechanisch-Technischen Laboratorium* fortgeführt, während Materialprüfungen des Bautechnischen Laboratoriums nun innerhalb des *Forschungsinstituts für Beton und Mörteltechnik* bearbeitet wurden. **1955** wurde der Neubau „Theresienstraße 90“ (Ecke Arcisstraße) bezogen und die Namensänderung in *Materialprüfungsamt für das Bauwesen* vollzogen. Als dieses **1999** mit dem *Prüfamt für Bituminöse Baustoffe und Kunststoffe* zum *Vereinigten Materialprüfungsamt für das Bauwesen* wurde, entstand das heutige **MPA BAU**. Die Abteilungen Massivbau, Metallbau und Holzbau und Baukonstruktion sind noch immer an der TUM in der Innenstadt untergebracht, während die Abteilung Baustoffe in den 70er Jahren in die Baumbachstraße 7 nach Pasing umzog. Die Abteilung Baustoffe des **MPA BAU** ist zudem in das **Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm)** integriert.

Nachdem die Materialprüfung an der TU München fast so alt ist wie die TUM selbst, sollen an dieser Stelle mehrere der langjährig am cbm eingestellten, leitend tätigen Laboranten vorgestellt werden, um einem Teil der Menschen, die hinter den Prüfergebnissen stehen, ein Bild zu geben.

AG 5 „Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine“

Grisha Asenov Barabunov ist seit **1988** im cbm beschäftigt. Sein Arbeitsplatz ist überwiegend das **Asphaltlabor** im Bereich der AG 5 „Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine“ des cbm. Er ist aber auch der Mann für den Außendienst, der u. a. immer wieder Bohrkern an Asphaltstraßen entnimmt, die dann im Labor untersucht werden. Damit konnte er auch die gerade abgeschlossene Promotion eines wissenschaftlichen Mitarbeiters im Themenbereich der Griffigkeitsentwicklung von Asphalten unterstützen. Zu seinen interessantesten Materialprüfungsaufträgen gehören die Untersuchungen, die er mit der Oberflächenverschleißprüfmaschine durchführen kann. Dabei wird der Abrieb von Asphalt-Deckschichten mit Hilfe des Scuffing-Tests untersucht. Ganz seinem Lebensmotto folgend, „Sende die Energie aus, die du selbst anziehen möchtest“, schickt er täglich seine gute Laune aus dem Labor in das Institut.



Bilder von links:
Grisha Asenov Barabunov,
Karl-Heinz Kreft
Bild unten: Andreas Gmell
(Fotos K.-H. Kreft)



Auch **Karl-Heinz Kreft** hat die über 20-jährige Zugehörigkeit zur TU bereits erreicht. Seit **1995** steht er dem cbm - inzwischen als Oberlaborant – im **Gesteinslabor** der AG 5 „Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine“ zur Seite. Er organisiert die Abläufe im Labor und setzt die Mitarbeitenden für die unterschiedlichsten Aufgabenbereiche ein. Seine routinierten Laboraufgaben beim Testen der Eigenschaften und Einsatzfähigkeit bestimmter Gesteine und Gesteinskörnungen z. B. auf Druckfestigkeit, Verhalten bei Hitze und Kälte, Zugehörigkeit zu Güteklassen, werden mit regelmäßigen Fotografaufträgen be-

reichert. Er ist inzwischen selbstständig dafür verantwortlich, dass alle Mitarbeitenden auf unserer Internetseite ins beste Licht gerückt und mit guten Porträtfotos vorgestellt werden. Wann immer eine Veranstaltung stattfindet und das cbm ihn braucht, ist er zur Stelle. Das Fotografieren ist zu seinem schönsten Hobby geworden, das er intensiv mit Fotoworkshops und Fotoreisen ausübt. So lässt er den Arbeitsalltag hinter sich, denn "Wer das Leben nicht schätzt, hat es auch nicht verdient". Weit entfernt von Karl-Heinz Krefts Arbeitsplatz im Untergeschoss befindet sich das Labor der AG 4 „Chemie“ im Süden des Laborbau-OGs.

AG 4 „Chemie“



Dort trifft man auf **Andreas Gmell**. Er ist ebenfalls mehr als zwei Jahrzehnte (seit **1997**) an der TU im cbm tätig und liebt es, Antworten auf analytische Fragestellungen zu finden. Das Ganze in seine einzelnen Stoffe zu zerlegen und damit das Problem zu lösen, ist für ihn tägliche Routine. Mit Neugier startet er jeden Tag und hält dabei nichts für selbstverständlich, wenn er chemische Untersuchungen und Versuchsreihen durchführt.

Besonders interessant ist für ihn ein Projekt in Zusammenarbeit mit der Universität Bamberg. Hier werden Oberflächenanalysen an kulturhistorischen Proben (Beile aus der Steinzeit) durchgeführt. Mit Ruhe und Gelassenheit führt er jedes Jahr auszubildende Chemielaboranten in die Basis ihres Berufes ein. Es erstaunt nicht, dass er in seiner Freizeit ruhigeren Hobbys nachgeht und beim Musizieren am Klavier, beim Fischen oder beim Kickern mit seinen Kindern Entspannung findet.



AG 2 „Betontechnologie“

Klaus Linz – der Stein in der Brandung der AG 2 „Betontechnologie“ – ist seit **2002** für das cbm engagiert tätig und geht die Arbeit nach dem Motto an „Was Du heute kannst besorgen, verschiebe nicht auf morgen.“ Die abwechslungsreichen Baustoffprüfungen nach aktuellen Normen und Richtlinien auch im Forschungsbereich der Betontechnologie lassen für den Oberlaborant keine Langeweile aufkommen. Wenn dann noch zwischendrin eine aufwendige Probekörperherstellung oder eine Bohrkernentnahme wie an der A12 bei Brixen ins Spiel kommt, beschert ihm der Arbeitsalltag spannende Highlights. Als großer FC Bayern München-Fan findet er Entspannung beim Fußballschauen.

Bilder von links:
Klaus Linz, Karin Hartlieb-Pfüller (Fotos: K.-H. Kreft), Carsten Kriegel

AG 1 „Bindemittel und Zusatzstoffe“

Karin Hartlieb-Pfüller, die seit **2005** unser **Physiklabor** leitet, muss, um Ruhe zu finden, beim Sport und Wandern selbst aktiv werden. Auch wenn sie mit ihrem Lebensmotto „Denke nicht so oft an das, was dir fehlt, sondern an das, was du hast!“, jeden Arbeitstag startet, steht und fällt ihre Freude an der Arbeit mit der Zuverlässigkeit der zu bedienenden Geräte mit denen sie forscht, prüft, konstruiert und misst. Neben der Wartung und der Instandhaltung physikalischer Messeinrichtungen gehört die Mithilfe bei der Auswertung und Protokollierung physikalischer Messungen zu ihrem Alltag; sie ist zudem vertraut mit chemischen Arbeitstechniken.

Das Physiklabor ist der AG 1 „Bindemittel und Zusatzstoffe“ zugeordnet und befindet sich in unmittelbarer Nähe zum ebenfalls in die AG 1 integrierten **Mörtellabor**, das von **Carsten Kriegel** geführt wird.

Seit 2009 befasst er sich mit Mörtel, Bindemittelleim und Betonversuchen. Am liebsten beschäftigt er sich mit den Schnelltests für Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). Es ist spannend zu sehen, ob alkaliempfindliche Bestandteile einer Gesteinskörnung mit Bestandteilen des Bindemittels reagieren, so dass die Betondauerhaftigkeit beeinträchtigt sein kann. Auch die Untersuchungen von Flugaschen fallen in sein Ressort. Zu den vorbereitenden Arbeiten gehören auch Probenahmen, die dann schon einmal zu weit entfernten Zielen führen. Weit entfernt und hoch hinaus passt gut zu Carsten Kriegel. Als leidenschaftlicher Bergsteiger hat er sein Ziel immer vor Augen, denn „dass alles machbar ist, wenn man es will“, hat er sich auf die Fahne geschrieben.

AG 3 „Stahl und Korrosion“



Die Jüngste im Bunde mit Laborverantwortung ist **Nina Lillich**. Sie betreut das **Korrosionslabor** der AG 3 „Stahl und Korrosion“ und ist **2013** ans cbm gekommen. Frau Lillich betreut elektrochemische Untersuchungen. In besonderem Maße sind das Chloridmigrationsversuche zur Feststellung des Chloridwiderstands von Beton. Mit der Elektrochemischen Impedanzspektroskopie misst sie die während der Korrosion ablaufenden Vorgänge oder setzt potentiostatische Halteversuche als Zulassungsversuche für Zusatzmittel ein. Mit dem Motto „Kann ich nicht – gibt es nicht!“ geht sie auch außergewöhnliche Prüfaufträge an. Und mit dem Leitgedanken „Man muss alles ausprobieren!“, steht sie jeder neuen Forschungsidee offen gegenüber. Und wenn’s unerwarteter Weise nicht gelingt? Macht nichts – Nina Lillich hat immer einen Lösungsvorschlag für einen Plan B. In ihrer Freizeit unterrichtet sie Tanz und Akrobatik und würde – wenn es die Möglichkeit gäbe – am liebsten nachts arbeiten.

Bald ein halbes Jahrhundert MPA in Pasing

Neben dem Vorschlag flexiblerer Arbeitszeiten führten die Oberlaborantinnen und -laboranten noch andere Anregungen zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen in den Laboren an. Dass die Raumsituation im Centrum Baustoffe und Materialprüfung und damit auch der Arbeitsplatz nicht nur für einen 1,95 m-Mann wie Klaus Linz sehr beengt ist, ist der baulichen Situation geschuldet. Das cbm wurde vor über 40 Jahren für 45 Mitarbeitende konzipiert. Die Belegschaft zählt inzwischen über 100 Personen; dafür sind die Gebäude und Anlagen nicht ausgelegt. Auch dem Wunsch nach helleren, offeneren Arbeits- und Laborräumen, ist schwer zu entsprechen. Aufgrund der bereits ausgelasteten Klimaanlage, müssen die Räume verschattet werden, um ein ausgeglichenes Raumklima dauerhaft zu erreichen.

Trotzdem strahlen die Ergebnisse der Materialprüfung, die Erkenntnisse der Forschung und das Erlebnis der Lehre aus dem cbm weit nach Deutschland und Europa hinein. Dass die Fähigkeiten der Menschen, die diese Gebiete mit ihren Fertigkeiten und Möglichkeiten bearbeiten, auf mehr Platz und besseren räumlichen Bedingungen zur Geltung kommen, ist ein angestrebtes Ziel der Geschäftsleitung: Der große Wunsch einer Integration in den Campus Garching steht ganz oben auf der Liste.

8. Mitarbeit in Ausschüssen, Arbeitskreisen, Gremien und Fachkommissionen

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

TC CCC	„Carbonation of concrete with supplementary cementitious materials ”	Gehlen/Keßler
TC CCH	„Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of concrete-reinforcing steels”	Keßler
TC CIM	„Benchmarking Chloride Ingress Models on Real-life Case Studies“	Gehlen
TC DFC	„Digital Fabrication with Cement-based Materials”	Weger
TC FPC	„Form pressure generated by fresh concrete”	Lowke
TC ISC	„Non destructive in situ strength assessment of concrete”	Große
TC MCM	„On-site measurement of concrete and masonry structures by visualized NDT”	Große
TC MMB	„Methods of measuring moisture in building materials and structures”	Gehlen/Thiel
TC PSC	„Performance-based specifications and control of concrete durability”	Gehlen/Große
TC SCI	„Characteristics of the steel/concrete interface and their effect on initiation of chloride-induced reinforcement corrosion”	Gehlen

Comité Européen de la Normalisation (CEN)

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

fib (fédération internationale du béton)

Commission 3	„Existing concrete structures”	
TG 3.3	„Assessment/evaluation procedures for existing structures”	Gehlen/Keßler
Commission 8	„Durability”	Gehlen
TG 8.6	„Calibration of Code deemed to satisfy provisions for durability”	Gehlen**
TG 8.9	„Deterioration Mechanism“	Gehlen**
Commission 10	„Model Codes”	
TG 10.1	„MC2020”	Gehlen

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton / DAfStb

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

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

NA 021-00-03 AA	„Betonstahl und Spannstahl“	Gehlen*/Meyer
NA 021-00-08-02 UA	„Walzdraht zum Ziehen“	Meyer
NA 005-02-10 AA	„Dach und Dichtungsbahnen“	Wallner
NA 005-02-19 AA	„Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen“	Wallner
NA 005-07-02 AA	„Betontechnik“ (Sp CEN/TC 104)	Gehlen/Heinz
NA 005-07-06 AA	„Schutz, Instandsetzung, Verstärkung“ (Sp CEN/TC 104/SC 8)	Gehlen
NA 005-07-13 AA	„Zement“ (Sp zu Teilbereichen von CEN/TC 51 und ISO/TC 74)	Heinz
NA 005-07-15 AA	„Gesteinskörnungen“ (SpA zu CEN/TC 154/SC 1-5/WG 11 und SpA zu CEN/TC 227/WG 4)	Westiner
NA 005-07-24 AA	„Betonzusatzstoffe“ (Sp CEN/TC 104/WG 4, 9, 15)	Heinz*
NA 005-07-27 AA	„Betonangreifende Stoffe – DIN 4030“	Heinz
NA 005-10-10	„Asphalt“	Wörner
NA 062-01-71 AA	„Korrosion und Korrosionsschutz“	Keßler
NA 062-01-78 AA	„Kathodischer Korrosionsschutz“	Keßler
NA 062-03-13 AA	„Gesteinskörnungen; Prüfverfahren, Petrographie, Probenahme“	Neidinger
NA 062-03-32	„Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel“	Wörner

Sachverständigenausschüsse d. Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt)

SVA 1	SVA-A „Betonstähle und Betonstahlverbindungen“	Meyer
	SVA-B „Betonstähle und Betonstahlverbindungen“	Meyer
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
SVA 12	SVA-A „Spannstähle“	Meyer
	SVA-B1 „Spannstähle“	Meyer
SVA 72	SVA-A „Bauwerks- und Dachabdichtungen“	Wallner
	SVA-B „Bauwerks- und Dachabdichtungen“	Wallner
PG	Projektgruppe „Bahnen zur Dach- und Bauwerksabdichtung“	Wallner

PG	Projektgruppe „Flüssig aufzubringende Bauwerksabdichtungen“	Wallner
PG	Projektgruppe „Fugenabdichtungen“	Wallner
PG	Projektgruppe „Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen“	Wallner

FGSV Forschungsgesellschaft Straßen- und Verkehrswesen

KOA Bau	Koordinierungsausschuss "Bau"	Westiner
AA 5.6	Grundbau	Westiner
AK 5.6.3	TL Gabionen	Westiner*
LA 6.0	Gesteinskörnungen, ungebundene Bauweisen	Westiner*
AA 6.1	Gesteinskörnungen	Westiner
AK 6.1.1	Polierresistenz und Polierprüfung	Westiner
AK 6.1.2	Füller- und Sandeigenschaften	Westiner
AA 6.2	Industrielle Nebenprodukte und Recycling-Baustoffe	Westiner
AA 6.3	Schichten ohne Bindemittel	Neidinger
AK 6.3.1	Infiltrationsverfahren, Merkblatt für Schichten ohne Bindemittel	Neidinger
AK 6.3.2	Überarbeitung des Regelwerks 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*
Ad hoc 7.6.001	Prüfmittelüberwachung	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
AK 8.3.5	Hinweise zur Bauweise "Betondecke auf modifizierter Kiestragschicht" KTSuB	Neidinger
Kommentar-Gruppe	„Asphaltstraßen“	Wörner*
Kommentierungs-Gruppe	„Gesteinskörnungen, ungebundene Bauweisen und Präzision“	Westiner*

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

Meyer
Osterminski

DGZfP – Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung

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

FA	ZfP in der Luftfahrt	Große
FA	ZfP im Bauwesen, UA „Qualitätssicherung“	Große
FA	Faserkunststoffverbunde	Große
Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.		Gehlen Heinz
Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. – GfKORR		
AK	„Korrosion im Bauwesen“	Gehlen
AK	„Grundlagen und Simulation“	Keßler
DGEG (Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.)		
2.3	Asphaltwasserbau	Wörner
Carbon Composites e.V.		
AK	NDE in Werkstoff- und Bauteilprüfung	Große
AK	Faserverstärkung im Bauwesen	Große
AK	Materialien und Prozesse	Große
VDI/VDE-GMA		
FA 2.12	Strukturanalyse und -überwachung i. d. Bautechnik	Große
GCTP – German Construction Technology Platform		
	AG Networks	Große
	AG Cultural Heritage	Große
	AG Underground Construction	Große
American Concrete Institute (ACI)		
Committee 215	"Fatigue of concrete"	Gehlen
American Society for Testing and Materials (ASTM international)		
Committee A01	"Steel, Stainless Steel and Related Alloys"	Meyer
Baustoffüberwachungs- und Zertifizierungsverein Bayern – BAYBÜV – e. V., LG		Neidinger*
Bundesverband Windenergie (BWE)		Große
Deutsche Geophysikalische Gesellschaft (DGG)		Große
Deutsche Geologische Gesellschaft – Geologische Vereinigung (DGGV)		Westiner
European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE), Voting Member		Große
German Scholars Organisation (GSO)		Große

TAA Sand und Kiesindustrie / Natursteinindustrie

Wörner/Westiner

DFG Netzwerk: Adaptive Armierung geometrisch komplexer zementgebundener Formkörper

Weger

Gutachtertätigkeit

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

* = Obmann / ** = Chairman

9. Dissertationen

9.1 Laufende Dissertationen

AG Bindemittel und Zusatzstoffe

Betreuung Prof. D. Heinz

Ying Wang, M.Sc. seit 01.07.2011	Hydratations- und Erhärtungsmechanismen der wasserbeständigen Bindemittelmischungen auf Gipsbasis
Kai Fischer, M.Sc. seit 15.05.2012	Alkaliaktivität von Gesteinskörnungen in Beton unter beschleunigenden und praxisgerechten Bedingungen
Linda Irbe, M.Sc. seit 01.10.2013	Die Rolle des Aluminiums in C-A-S-H bei chemischem Angriff auf Beton
Matthias Wagner, M.Sc. seit 15.01.2016	Expansionsspannung beim Sulfatangriff auf Beton – Einfluss von aluminiumhaltigen Zusatzstoffen
Polina Secheyko, M.Sc. seit 01.07.2017	Gefügebildung in klinkerarmen Bindemitteln mit hohem Kalksteinanteil

AG Betontechnologie

Betreuung Prof. C. Gehlen

Jens Skarabis, Dipl.-Ing. seit 01.05.2006	Anwendung der Mikroindentation zur Beurteilung der Gefügeeigenschaften von Straßenbetonen
Charlotte Thiel, Dipl.-Ing. seit 01.04.2008	Einfluss von CO ₂ -Druck und Betonfeuchtegehalt auf das Porengefüge von Beton während der Carbonatisierung
Sandy Illguth, M.Sc. seit 01.05.2009	Faserbewehrter Feinkornbeton für filigrane Betonfertigbauteile
Daniel Weger, M.Sc. seit 01.01.2014	Additive Fertigung im Bauwesen
Nicolai Klein, M.Sc. seit 17.05.2016	Zeitraffende Laboruntersuchungen zur Griffigkeitsprognose von Betonverkehrsflächen

AG Stahl und Korrosion

Betreuung Prof. C. Gehlen

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

AG Chemie

Betreuung Prof. D. Heinz

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



Foto: Astrid Eckert/TUM:
Akademiezentrum Raitenhaslach

„Alle Auftaktseminare der TUM Graduate School finden im TUM Akademiezentrum Raitenhaslach statt. Nach aufwändiger Restaurierung ist der spätbarocke Prälatenbau des Klosters zu einem Ort des internationalen wissenschaftlichen Austauschs geworden. Auf rund 1.000 Quadratmetern bietet das Zentrum den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, den Mitarbeitenden und Studierenden der TUM Seminarräume und Studierzimmer unterschiedlicher Größe.“
www.gs.tum.de

AG Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine

Betreuung Prof. C. Gehlen

Thomas Patzak, Dipl.-Ing.(FH) seit 01.10.2007 Möglichkeiten der Optimierung des Wehner/Schulze-Verfahrens zur Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Asphalten

Johann Eicher, Dipl.-Ing. seit 01.08.2013 Beurteilung der Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel mit dem Dynamischen Scherrheometer

AG Zerstörungsfreie Prüfung

Betreuung Prof. C. Große

Ronald Richter, Dipl.-Ing. seit 01.04.2010 Anwendung der Schallemissionsanalyse bei Tunnelbrandprüfungen an Beton

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

Fabian Malm, M.Sc. seit 01.01.2013 Zerstörungsfreie Prüfung von Beton mit Selbstheilungseigenschaften

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

Philipp Jatzlau, Dipl.-Ing. seit 01.12.2014 Eskalationsmodelle für die numerische Simulation zerstörungsfreier Prüfverfahren auf Basis elastischer Wellen

Max Botz, M.Sc. seit 01.01.2015 Structural-Health-Monitoring der Tragstruktur von Windenergieanlagen

Martin Radlmeier, Dipl.-Phys. seit März 2011 Acoustic emission on CFRP-structures

Peter Föhr, Dipl.-Ing. seit 08.12.2012 Combined mechanical loading and ultrasonic evaluation of articular cartilage

Christian Geiss, M.Sc. seit 01.04.2013 Entwicklung eines integrierten holistischen Instandhaltungssystems für Windenergieanlagen

Jan-Carl Grager, M.Sc. seit 01.05.2014 Bildgebende Ultraschallprüfung von Faserverbundwerkstoffen mit Full-Matrix-Capture-Technik

Bernhard Wondra, Dipl. Ing. seit 22.01.2015 Drahtloses Monitoring der Tragstruktur von Windenergieanlagen

Michael Mosch, Dipl.-Inf. Dipl.-Ing. seit 09.03.2015 Automatisierte Bewertbarkeit zerstörungsfreier Prüfungssituationen mittels eines generischen Modells

Julia Frisch, M.Sc. seit 01.11.2015 Quantitative Methoden zur Auswertung thermografischer Prüfdaten

9.2 Dissertation Fact Sheets

9.2.1 Expansion Stress Due to External Sulfate Attack: Effect of Aluminium-Containing Additives



Name: Matthias Wagner
E-Mail: ma.wagner@tum.de
Supervisor: Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz
Chair of Mineral Engineering
Started: 01/2016
Status: ongoing

Catching up on Testing Procedures

This PhD project aims at the identification of crucial chemical and physical parameters of blended binder samples during laboratory testing procedures of external sulfate attack resistance. To this day, the materials response to the ingress of sulfate ions is monitored using non-standardized testing procedures, e.g. the German SVA testing recipe. Since these experiments are using sulfate ion concentrations that are much higher than found in ground water and waste water, some authors expressed their concerns about these testing conditions not being representative for natural sulfate attack settings. The PhD project is focused on the sulfate attack testing behaviour of binder mixtures containing aluminium-rich additives and how testing procedures can be designed to match the materials response to sulfate ingress in real life scenarios with laboratory observations.

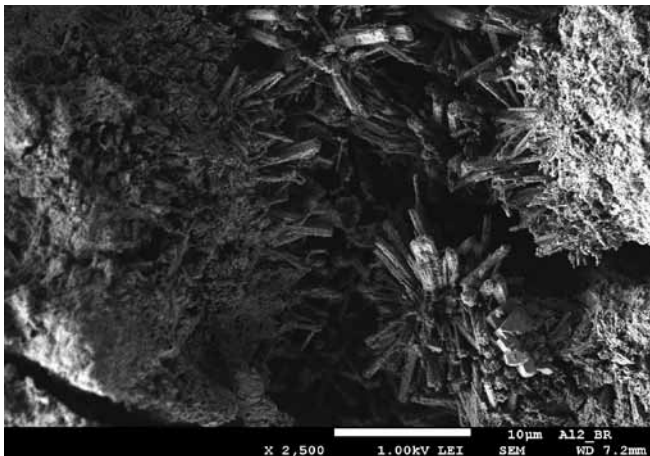


Figure 1:
SEM image of an ettringite/
gypsum horizon in a mortar
sample exposed to sulfate ions

Defining Suitability

After comprehending decisive mechanisms of the binder mixtures response, new testing procedure guidelines – no matter what they look like – have to be assessed regarding their performance on four criteria:

- Thermodynamic suitability: the materials response is not affected by unrealistic phase assemblages.
- Kinetic suitability: the materials response is not affected by unrealistic reaction pathways.
- Mechanical suitability: observed parameters and testing criteria are linked to damage in real building-scale sulfate attack scenarios.
- Economical suitability: no significant increase in testing costs compared to existing procedures.

Versatile Approach

The project features a combined experimental and modelling approach. Laboratory work is based on SVA-like tests using mortar flat prisms and hollow cylinder shaped mortar samples featuring different levels of mechanical restraint. The samples are monitored regarding their change in length and mechanical failure due to expansion stress during external sulfate attack. Material properties at certain stages of the experiments can be observed using X-ray diffraction (XRD, assemblage of crystalline phases), optical emission spectroscopy (ICP-OES,

elemental composition), mercury intrusion porosimetry and laser ablation mass spectroscopy (LA-ICP-MS). Scanning electron microscopy (SEM) and light microscopy are used as an additional method to gain insight into the effects of expansion stress on the samples structure.

Thermodynamic modelling is used for the assessment of thermodynamic parameters during different stages of external sulfate resistance testing procedures as well as the identification of relevant experimental setups and their evaluation of thermodynamic suitability. The impact of expansion stress on the samples structure during the laboratory tests is furthermore analysed by mechanical modelling on different scales. Originating from the processes involved in an open pore, the proceeding of reaction horizons is used as a tool to gain information on the macroscale behaviour for different sample geometries.



Figure 2:
Combined approach for reasonable enhancements of sulfate resistance testing procedures.

What to Expect

The project has to address three main objectives: a precise proposal for suitable modifications of sulfate resistance testing guidelines, a more detailed knowledge of the behaviour of aluminium-containing additives during these tests as well as implications on the long-term modelling of external sulfate attack at the macroscopic scale.

References

Müllauer W., Beddoe R. E., Heinz D., Cement and Concrete Research, 52, 2013, 208 – 215.

9.2.2 Accelerated Laboratory Testing to Predict the Skid-Resistance of Concrete Traffic Surfaces



Name: Nicolai Klein, M. Sc.
E-Mail: nicolai.klein@tum.de
Supervisor: Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Chair of Materials Science and Testing
Started: 11/2017
Status: ongoing

Motivation

The skid-resistance of a traffic surface characterizes the friction between the surface and vehicle tyres. Owing to continuous exposure to traffic, skid-resistance diminishes during the service life of the traffic area. This leads to an increase in braking distances and therefore a higher risk of accidents, especially for wet conditions. Consequently, the long-term skid resistance of traffic areas is a fundamental requirement for road safety.

The skid-resistance depends on the texture of the surface which can be described by different wavelengths (λ). Two wavelength areas are mainly affecting the skid-resistance:

- The macro-texture ($0.5 \text{ mm} < \lambda < 50 \text{ mm}$) ensures the drainage of upcoming water and therefore prevents aquaplaning.
- The micro-texture ($\lambda < 0.5 \text{ mm}$) is responsible for the friction between the tyre and the road-surface.

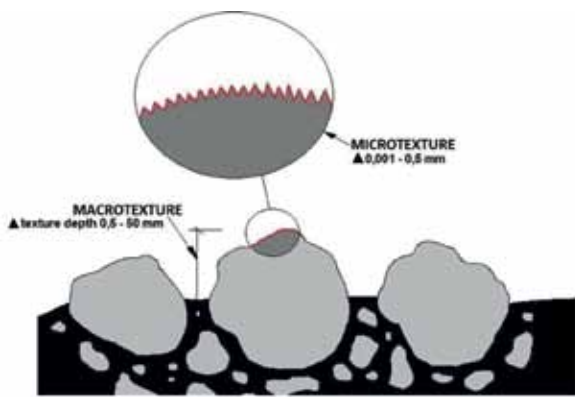


Figure 1:
Scheme of micro and macro-
texture [1]

While the macro-texture of concrete roads does not change significantly by traffic load, the micro-texture is degrading continuously, especially within the first year of exposure. This doctoral thesis investigates a method to forecast the loss of skid-resistance for concrete traffic surfaces by accelerated laboratory testing.

Experimental programme

There are multiple instruments to apply a mechanical abrasion to a concrete surface [2][3][4]. All of them, depending on the kind of surface, lead to diminishing skid-resistance, but the change in micro-texture and the comparability to real traffic exposure is rarely analysed. Therefore the first part of this study analyses the degradation of the micro-texture and possible imprinted textures caused by different traffic simulation in comparison to field cores as well as the meaning of different micro-texture orientations for the skid-resistance.

In the second part, environmental effects (e.g. freeze thaw and acid rain based on weather data) on the micro-texture and the durability of the whole texture are analysed and quantified. Even though both exposures lead to an increase in skid resistance a weakening of the concrete structure and therefore an increased degradation due to mechanical abrasion has to be considered. data) on the micro-texture and the durability of the whole texture are analysed and quantified. Even so both exposures lead to an increase in skid resistance a weakening of the concrete structure and therefore an increased degradation due to mechanical abrasion has to be considered.



Figure 2:
Types of exposure on concrete
traffic surfaces

Finally both types of exposure are going to be combined to a cycle in order to to predict the loss of skid-resistance over time for compact concrete as well as tested on pervious concrete. The possibility to predict the time period for critical states of road safety enables early planning of maintenance, which reduces the amount of necessary field tests and therefore costs as well as the risk of accidents.

References

- [1] Florková, Z.; Komacka, J. (2015): Usage of microscope method for detection of aggregate microtexture. Procedia Engineering, Volume 111, p: 209-214.
- [2] Wacker, B.; Scherkenbach, M., Rabe, R. (2016): Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS30. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe S: Straßenbau, Heft 101.
- [3] DIN EN 12697-49:2014, Asphalt-Prüfverfahren für Heiasphalt – Teil 49: Messung der Griffigkeit nach Polierung
- [4] DIN CEN/TS 12697-50:2016, Asphalt-Prüfverfahren – Teil 50: Widerstand gegen Oberflächenverschleiß

9.2.3. Diffusion potentials



Name: Elke Ziehensack
E-Mail: elke.ziehensack@tum.de
Supervisor: Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Started: 4/2016
Status: ongoing

Motivation

Reinforced concrete is the most used building material worldwide. It is a durable material, but there is the possibility of deterioration due to environmental influences like ingress of chloride or carbonation for example. A consequence of this may be that steel is corroding. In order to investigate the condition of reinforcement in concrete with regard to corrosion, potentiometric measurement can be used. It is non-destructive and applicable at an early point in time.

This method is used for half-cell potential measurement or monitoring cathodic protection for example, in order to determine the steel potential. It is also used for ion selective electrodes measuring concentration of specific ions. In all cases the unknown electrode potential has to be measured versus the known potential of a reference electrode. The reference electrode is located on the concrete surface or embedded in concrete. However, diffusion potentials, which are present in the concrete cover, may interfere with the potential measurements. Therefore, diffusion potentials have to be quantified to be able to correct these measurements. This step is crucial to avoid misinterpretations in the evaluation of potential readings as well as to improve the accuracy of potentiometric sensors, which are used in concrete.

According to [1, 2], especially in cement-based materials diffusion potentials of high magnitude are expected, because transport of ions is influenced by the pore system in addition. There is also literature, in which diffusion potentials are regarded as negligible (see e. g. [3]).

Aim

The aim is to increase the understanding of diffusion potentials arising in concrete in case of chloride and sulphate ingress as well as pH differences due to carbonation or leaching. The approach is based on separating and quantifying the individual parameters contributing to diffusion potentials. These are the concentration profiles of different ions and the influence of perm-selective action of cement hydration products among other things. Non-reactive porous systems with negligible perm-selective behaviour as well as cement-based materials are used. It is planned to vary the water/binder ratio and to use different binders. Specimens are analysed by established methods. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) is used to determine concentration gradients of elements with a high spatial resolution.

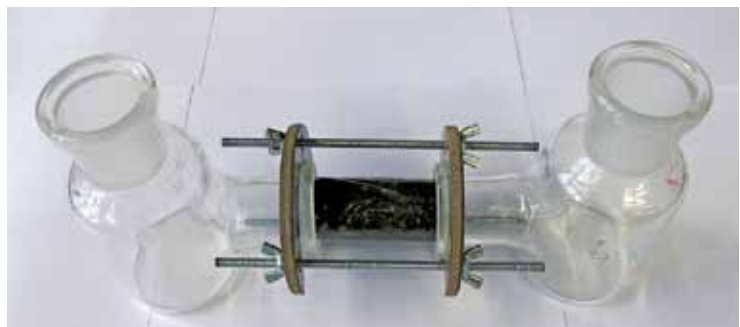


Figure 1:
Experimental setup with diffusion cells.

Furthermore, existing predictive models like the Henderson equation will be validated. Finally, experimental measurements are combined with numerical simulations in order to refine these models.

References

- [1] Angst, U.; Vennesland, Ø.: Detecting critical chloride content in concrete using embedded ion selective electrodes – effect of liquid junction and membrane potentials. In: Materials and Corrosion 60/8, pp. 638 – 643, 2009.
- [2] Angst, U.; Elsener, B.; Myrdal, R. ; Vennesland, Ø.: Diffusion potentials in porous mortar in a moisture state below saturation. In: Electrochimica Acta 55, pp. 8545 – 8555, 2010.
- [3] Elsener, B.; Andrade, C.; Gulikers, J.; Polder, R.; Raupach, M.: Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures. In: Materials and Structures 36, pp. 461 – 471, 2003.

9.2.4 Escalation method for non-destructive testing of carbon fiber reinforced polymers by means of elastic waves



Name: Dipl.-Ing. Philipp Jatzlau
E-Mail: philipp.jatzlau@tum.de
Supervisor: Prof. Dr.-Ing. habil. Christian U. Grosse
Chair of Non-Destructive Testing
Started: 2015
Status: ongoing

Motivation

Methods of non-destructive testing (NDT) are often time-consuming and expensive. Especially for complex composite materials such as carbon fiber reinforced polymers (CFRP) high efforts need to be made to ensure quality and thereby safety in critical sectors like aerospace and automotive. For this, manufacturers and operators of CFRP structures have established NDT methods like ultrasound and thermography for their in-line quality control and inspections in the past decades. Due to the high resolution and 3D imaging of microscale structures many manufacturers currently develop computed tomography (CT) from a mere reference method to an automated robotic system for in-line quality control. However, CT produces large amounts of data and requires high computing power as well as a relatively large operating area due to radiation protection. These aspects make CT only worthwhile for certain parts and only to manufacturers maintaining these resources. As an alternative, a cost-effective escalation approach combining established NDT methods based on elastic waves with numerical simulation is introduced. To ensure the feasibility on an industrial application level, a commercial tool for finite element modeling is used for the latter. The materials and methods to be applied are described in the following sections.

Materials

Modern lightweight constructions in aerospace, automotive and other mechanical engineering sectors generally consist of or contain fiber reinforced polymers to a certain degree. These materials are characterized by their high specific strength and by the adjustability

of their layer structure according to the particular loading condition of the part. Depending on the application carbon, glass or natural fiber materials are used. Figure 1 shows a close-up of a CFRP plate. The advantages of CFRP are accompanied by anisotropy and heterogeneity, which both constitute significant challenges to the propagation of elastic waves. Directional dependent velocities and high attenuation due to absorption and reflection of sound energy at each interface complicate testability of a part and the analysis of the measurement results.

Experimental description

The methods considered for the escalation approach are based on elastic wave propagation. These include conventional ultrasonic testing, air-coupled ultrasound, lamb waves, modal analysis and local acoustic resonance spectroscopy. The variety of state-of-the-art testing equipment available is used for extensive experiments to validate the simulated data. For validation and reliability considerations, it can also be drawn on a large amount of experimental data generated during a round robin test with various cooperation partners [1].

Simulation approach

For the numerical simulation the commercially available software tool Comsol Multiphysics® is used. It has been shown that FEM simulation is able to help overcome limitations of ultrasonic evaluation due to the structure of composite materials [2]. However, highly accurate 3D models investigating time domain problems can be time consuming and require high computational power and large memory. The goal of the approach to be developed in this project is the simulation-based reduction of the overall effort for certain NDT problems. The simulation is optimized by escalating the complexity concerning the material model as well as the NDT method in order to determine the appropriate degree of complexity for the respective problem. Subsequently, the optimized simulation is used to define optimal testing parameters (e. g. sensor positions, testing frequencies). As an example for possible results, Fig. 3 shows the simulated Lamb wave propagation in a CFRP laminate revealing a delamination in the bottom left corner.

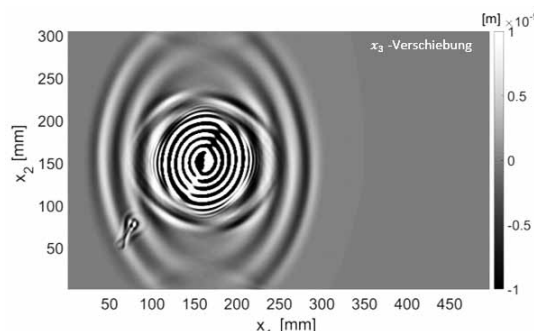


Fig. 1 (left): Close-up of a CFRP plate (thickness: 2 mm).
Fig. 2 (right): FEM model of the structure.

Figure 3:
Simulated Lamb wave propagation in a CFRP laminate reveals a delamination in the bottom left corner [3].

References

- [1] Grosse, C. U.; Goldammer, M.; Grager, J.-C.; Heichler, G.; Jahnke, P.; Jatzlau, P.; Kiefel, D.; Mosch, M.; Oster, R.; Sause, M. G. R.; Stössel, R.; Ulrich, M.: Comparison of NDT Techniques to Evaluate CFRP – Results Obtained in a MAIzfp Round Robin Test. Proceedings of the 19th World Conference of Non-Destructive Testing. Munich 2016.
- [2] Zelenyak, A.-M.; Oster, R.; Mosch, M.; Jahnke, P.; Sause, M. G. R.: Numerical Modeling of Ultrasonic Inspection in Fiber Reinforced Materials with Explicit Microstructure. Proceedings of the 19th World Conference of Non-Destructive Testing. Munich 2016.
- [3] Narr, A.: Merkmalscharakterisierung in CFK-Plattenstrukturen mittels geführter Wellen. Master's thesis. Chair of Non-Destructive Testing. Technical University of Munich 2017.

9.3 Beendete Dissertationen

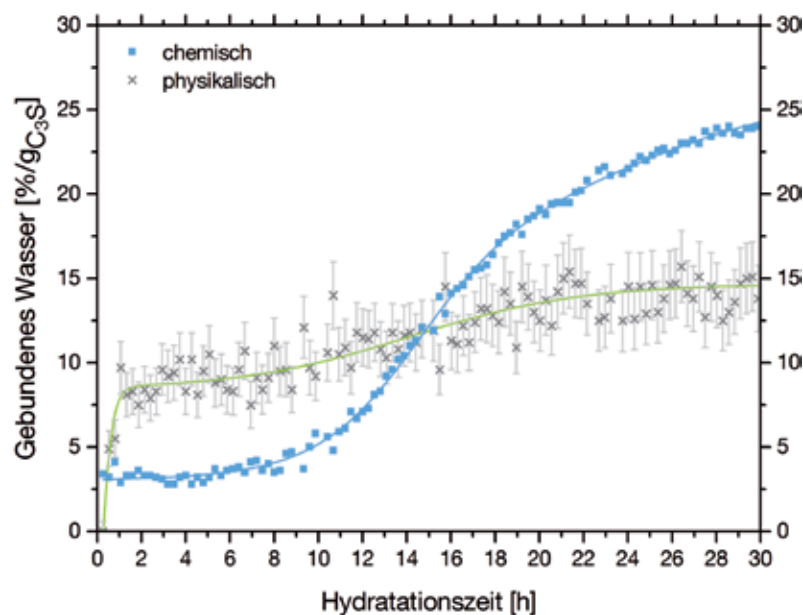
9.3.1 Hydratation von Tricalciumsilikat – Die ersten 30 Stunden



Name: Tobias Gutberlet
E-Mail: gutberlet@poraver.de
Beginn: 2009
Verteidigung: 19.05.2017
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen (TU München)
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz (TU München)
Prof. Dr. rer. nat. Johann P. Plank (TU München)

Die Reaktionsmechanismen während der frühen Hydratation von Tricalciumsilikat (C_3S) sind noch nicht in Gänze verstanden. Vor allem die sogenannte Induktionsphase (siehe Abbildung 2) und das mischungsabhängige Reaktionsverhalten von Tricalciumsilikat sind Gegenstand kontroverser Diskussionen und Modellvorstellungen. Im Laufe dieser Arbeit konnte durch methodisch aufeinander aufbauende Modellzemente und geschickte Kombination von mehreren Messmethoden (u.a. Quasielastische Neutronenstreuung, Röntgenbeugungsanalyse, Silizium-Kernspinresonanz-Spektroskopie und Wärmeflusskalorimetrie) ein tieferer Einblick in die Vorgänge innerhalb der ersten 30 Stunden nach Wasserzugabe gewonnen werden. So wurde mit Quasielastischer Neutronenstreuung (QENS) die Wasserbindung in der Paste untersucht. Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Auswerteverfahren erlaubt diese Methode die Unterscheidung und Quantifizierung von chemisch und physikalisch (beispielsweise in Gelporen) gebundenem Wasser (siehe Abbildung 1). Ein Vergleich mit den Daten der Wärmeflusskalorimetrie (siehe Abbildung 2), zeigt eine deutliche Zunahme an physikalisch gebundenem Wasser während der Induktionsphase.

Abbildung 1:
Anteile an chemisch und physikalisch gebundenem Wasser pro Gramm C_3S aus der Messung des triklinen Tricalciumsilikats mit quasielastischer Neutronenstreuung bei 20 °C und $w/b = 0,48$



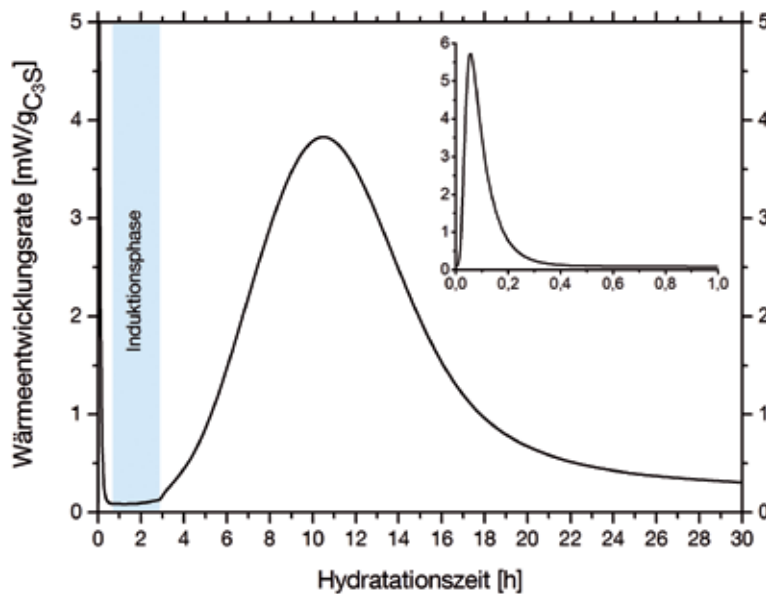


Abbildung 2:
Wärmeflusskalorimetrie des
triklinen Tricalciumsilikats bei
20 °C und $w/b = 0,48$

Auf dessen Messergebnissen aufbauend konnte eine neue Modellvorstellung der Vorgänge während der frühen Hydratation von Tricalciumsilikat entwickelt werden. In unterschiedlichen Mischungen (Modifikation und Zusatzstoffe) zeigte sich mit leichten Abwandlungen stets das gleiche Reaktionsverhalten. Die Ergebnisse konnten mit folgendem Verhalten erklärt werden:

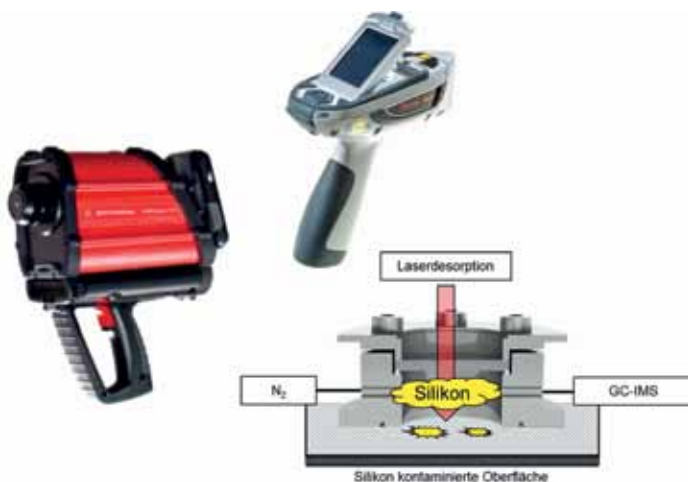
Direkt nach Wasserzugabe geht Tricalciumsilikat kongruent in Lösung. Der Lösungsmechanismus wechselt jedoch noch während der Anfangsreaktion hin zu einem inkongruenten Lösungsprozess in Form von bevorzugtem/selektivem Lösen von Calcium aus der Oberfläche der C_3S -Partikel. Strukturbedingt existieren Positionen im Kristall, an denen nur eine Abfolge von Calcium und Sauerstoff vorliegt. Dort könnte dieser Lösungsmechanismus ansetzen. Die Menge an herausgelöstem Calciumoxid und mit ihr die Schichtdicke der calciumarmen Schicht, ist unter anderem abhängig von der Oberflächenladung und der zur Verfügung stehenden Gesamtoberfläche der Tricalciumsilikat-Partikel. Die Oberflächenschicht wandelt sich im weiteren Verlauf unter Aufnahme von physikalisch gebundenem Wasser in eine Art calciumhaltiges Silikagel um. Der aus der Wasseraufnahme resultierende Spaltdruck erhöht die Innere Energie der Oberflächenschicht und erleichtert/ermöglicht das Lösen der darin enthaltenen Silikate noch während der klassischen Induktionsphase. Das Einsetzen des Lösens der Silikate kennzeichnet eigentlich bereits das Ende der Induktionsphase und nicht erst der Übergang in den Hauptpeak der Wärmeflusskalorimetrie. Die gelösten Silikate lagern sich zusammen mit dem gelösten Calcium in der elektrochemischen Doppelschicht der Tricalciumsilikat-Partikel an. Dort erreicht deren Konzentration eine Sättigung gegenüber der Fällung von C-S-H-Partikeln. Dieses frühe C-S-H weist nur geringe Molekülgrößen auf und hat noch keine Vergleichbarkeit zu dem zu späteren Hydratationszeiten geformten äußeren und inneren C-S-H. An diesem Punkt ist die Wachstumsphase erreicht. Die C-S-H-Partikel beginnen zu agglomerieren und wachsen teilweise über eine Calciumbrücke zusammen. Im weiteren Verlauf setzt eine verstärkte Polymerisation der Silikate agglomerierter/verknüpfter C-S-H-Partikel unter Freisetzung von Calciumoxid ein, welches als Portlandit ausfällt. Aus dieser Umstrukturierung der Hydratphase geht das bekannte äußere C-S-H hervor. Die zunehmende Bedeckung der Oberfläche mit C-S-H-Partikeln und äußerem C-S-H leitet den Übergang in die Phase langsamer Reaktion (Diffusionsphase) ein.

Auf der Grundlage dieses Modells aufbauend, könnte durch weitere systematische Untersuchungen das Reaktionsverhalten und der Mechanismus der Bildung des Calciumaluminatsilikathydrats in einem Zement geklärt werden.

9.3.2. Zerstörungsfreie Prüfmethoden zur Oberflächencharakterisierung von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen

Name: Sebastian Heckner
E-Mail: sebastian.heckner@airbus.com
Beginn: 2013
Verteidigung: 08.08.2017
Vorsitzender: Prof. Dr. Sonja Berensmeier (TU München)
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Große (TU München)
Hon.-Prof. Dr. Sebastian Eibl (UNIBW München)

Die Arbeit von Herrn Heckner ist dem Bereich Aeronautik und dort den Bereichen Leichtbau mit kohlefaserverstärkten Kunststoffen und Zerstörungsfreie Prüfung zuzurechnen. Die zunehmende Komplexität des hybriden Leichtbaus ist verantwortlich für eine Reihe von Herausforderungen für Prüftechniken, von denen aktuell die Prüfung der Güte von Klebeverbindungen eine besonders wichtige Komponente darstellt. Als geklebte Bauteile werden CFK-Lamine typischerweise mit anderen Bauteilen ebenfalls verklebt. Da derzeit allerdings keine zuverlässige zerstörungsfreie Prüfmethode existiert, mit der Klebefehler und insbesondere sogenannte weak bonds detektiert werden können, müssen Bauteile mit Flugzulassung nach wie vor genietet werden. Dies führt nicht nur zu Schädigungen des Faserverbundes, sondern erhöht auch signifikant das Gewicht der Konstruktion (beim A350 um bis zu 7 %). Die Arbeit entstand in enger Kooperation mit der Airbus Group Innovations, weswegen Herr Heckner eine breite Palette modernster Prüftechniken testen und einsetzen konnte.



In der Arbeit wurden Methoden zur mobilen zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) der Oberflächeneigenschaften von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) entwickelt. Dabei lag der Fokus auf der Detektion von thermisch degradiertem CFK, der Feuchtaufnahme in das CFK-Laminat und der Verunreinigung der Oberfläche mit siloxanbasierten Trennmitteln.

Für diese Aufgabe wurden die Techniken FTIR-Spektroskopie, Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und Laserdesorption gekoppelt mit einem Gaschromatograph-Ionenmobilitätsspektrometer (GC-IMS) hinsichtlich ihrer Aussagekraft untersucht.

Herr Heckner stellte Proben mit definierten Oberflächeneigenschaften her und charakterisierte diese anschließend mit etablierten stationären Referenzmethoden. Da die Feuchteverteilung einer Probe aktuell nicht durch Referenzmethoden messbar ist, wurde diese mit Hilfe eines Simulationsmodells berechnet.

Als Ergebnis ließ sich mit Hilfe der FTIR-Spektroskopie die thermische Degradation charakterisieren. Jedoch sind für die Messung die thermische Historie und die Oberflächenmorphologie entscheidend. Deshalb wurde ein Algorithmus entwickelt, der diesen Sachverhalt entsprechend berücksichtigt und eine Quantifizierung der Schädigung ermöglicht.

Bei der Bestimmung der Feuchtekonzentration eines CFK-Bauteils mittels FTIR-Spektroskopie ist es lediglich möglich, die oberflächennahe Feuchtekonzentration zu erfassen. Aus diesem Grund wurde hierfür eine Methodik entwickelt, die es zulässt, von der Feuchtekonzentration der Oberfläche auf die gesamte Feuchteaufnahme des Bauteils zu schließen.

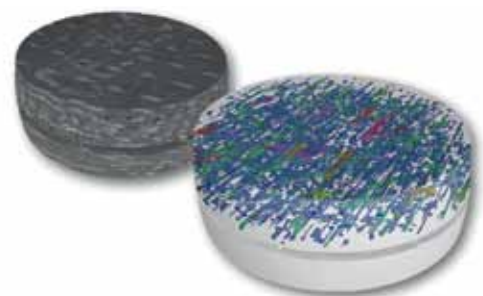
Siloxanhaltige Trennmittelrückstände konnten in Konzentrationen, die während der Produktion in der Luftfahrtindustrie auftreten, mittels der RFA nachgewiesen werden.



v.l.n.r.:
Prof. Große, Prof. Berensmeier,
S. Heckner, Prof. Eibl
(Bild: LS ZfP)

9.3.3. Quantitative Porositätscharakterisierung von CFK-Werkstoffen mit der Mikro-Computertomografie

Name: Denis Kiefel
E-Mail: denis.kiefel@airbus.com
Beginn: 2012
Verteidigung: 03.08.2017
Vorsitzender: Prof. Dr. Klaus Drechsler (TU München)
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Große (TU München)
Prof. Dr. Franz Pfeiffer (TU München)



Porosität hat in Kohlenstoffaserverbundwerkstoffen negative Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften. Primärbauteile der Luftfahrtindustrie werden z. B. bei Airbus in der Fertigung u. a. wegen diesem festigkeitsreduzierenden Qualitätsmerkmal zu 100 % mit vergleichenden zerstörungsfreien Prüfverfahren wie der Ultraschallprüfung untersucht. Diese und weitere bekannte Prüfmethoden liefern entweder nur zweidimensionale oder ungenaue Informationen über die Poren. Diese Arbeit behandelt die dreidimensionale quantitative Porositätscharakterisierung von CFK-Werkstoffen mit der Röntgen-Computertomografie (CT). Sie kann hierauf basierend z. B. als Referenzmethode oder sog. Eskalationsmethode für einzelne Bauteilbereiche oder kleinere Komponenten eingesetzt werden. Es wird die erarbeitete CT-Porositätsprüfmethodik zur Durchführung zuverlässiger Porositätscharakterisierungen, dessen Einflussgrößen, Auswirkungen und Grenzen in Bezug auf die ermittelte Volumenporosität und auf weitere Bewertungskriterien vorgestellt. Die Untersuchungen wurden experimentell durch CT-Messungen an Proben unterschiedlicher Lamine und durch CT-Simulationen an Porenmodellen mit unterschiedlichem Porositätsgehalt, Porengeometrie und -größe durchgeführt. Die jeweils dazu entwickelte Methodik wird vorgestellt. Es wurden außerdem Methoden zur Prüfung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Verfahrens erarbeitet, darauf angewendet und dargelegt. Die Porositätsermittlungsergebnisse wurden in einem Vergleich mit der Ultraschall- und materialografischen Schliffprüfung gegenübergestellt und diskutiert. Eine Empfehlung zur Anwendung der CT-Porositätscharakterisierung, dessen Grenzen und mögliche zukünftige Einsatzmöglichkeiten sind abschließend aufgezeigt.



Erste Reihe von links nach
rechts: R. Oster, Dr. Stoessel,
Prof. F. Pfeiffer, D. Kiefel, Prof.
Große, Prof. Drechsler (Foto:
LS ZfP)

9.3.4. Ein rheologischer Modellansatz zur Prognose des Langzeittragverhaltens von Verbunddübeln

Name:	Thomas Kränkel
E-Mail:	thomas.kraenkel@tum.de
Beginn:	2009
Verteidigung:	10.11.2017
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz (TU München)
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen (TU München)
	Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann (Univ. Stuttgart)
	Prof. Dr. phil. Dr. techn. Dr.-Ing. E.h. Konrad Bergmeister (Universität Wien)

Verbunddübel weisen ein ausgeprägt nichtlinear viskoelastisches Werkstoffverhalten auf. Ihr Tragverhalten ist damit nicht nur von der Dauer, sondern auch von der Höhe der Beanspruchung abhängig. Um eine dauerhafte Anschlusskonstruktion mit Verbunddübeln erstellen zu können, ist daher die Kenntnis deren Langzeittragverhaltens zwingend erforderlich. Das Ziel der Dissertation war es, ein Modell zu entwickeln, welches das Langzeittragverhalten der Verbunddübel in Abhängigkeit der Geometrie des Verbunddübels selbst, der Belastungsdauer und der Belastungshöhe präzise voraussagt. Ferner sollte das Modell in der Lage sein, den Zeitpunkt des Versagens für eine gegebene Lastsituation vorausszusagen, um das Modell anschließend auch im Bereich der Lebensdauerbemessung einsetzen zu können.

Das entwickelte Modell basiert hinsichtlich seiner grundlegenden Zusammensetzung auf dem rheologischen Burgers-Modell zur Veranschaulichung linearer Viskoelastizität. Dieses Modell wurde dahingehend modifiziert, dass es die Beanspruchung als nichtlineare Einflussgröße auf das Deformationsverhalten der Verbunddübel berücksichtigt. Die Eingangsparameter für das modifizierte Burgers-Modell stellen demnach keine Konstanten, sondern nichtlineare Funktionen in Abhängigkeit der Beanspruchung (Höhe, Dauer) bzw. der sich daraus ergebenden Deformation der Verbunddübel dar, Bild 1.

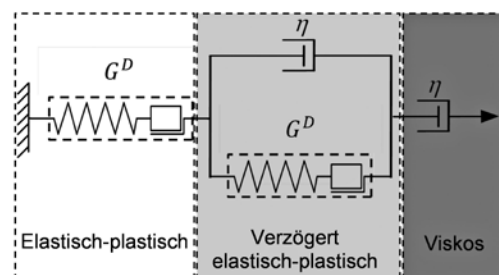


Bild 1:
Modifiziertes Burgers-Modell zur Prognose des nichtlinear viskoelastischen Deformationsverhaltens der Verbunddübel, bestehend aus einem elastisch-plastischen (links, weiß), einem verzögert elastisch-plastischen (mittig, hellgrau) und einem viskosen (rechts, dunkelgrau) Modellabschnitt

Die Eingangsparameter für das modifizierte Burgers-Modell können in drei Versuchsserien, bestehend aus 1) Auszugversuchen, 2) Dauerstandversuchen mit 1.000 h Dauer und 3) Degradationsversuchen am Verbunddübel selbst ermittelt werden. Während 1) und 2) standardisierte Tests darstellen, wie sie auch zur Erwirkung einer bauaufsichtlichen Zulassungen durchgeführt werden, sind die Degradationsversuche spezielle, im Rahmen der Dissertation entwickelte Zugversuche, bei welchen die Verbunddübel zahlreiche Lastwechsel durchlaufen müssen; Bild 2. Auf der Basis dieser Degradationsversuche kann zeitraffend die Materialschädigung unter Dauerlast quantifiziert werden, was wiederum die Grundlage zur Prognose des Versagens der Verbunddübel darstellt.

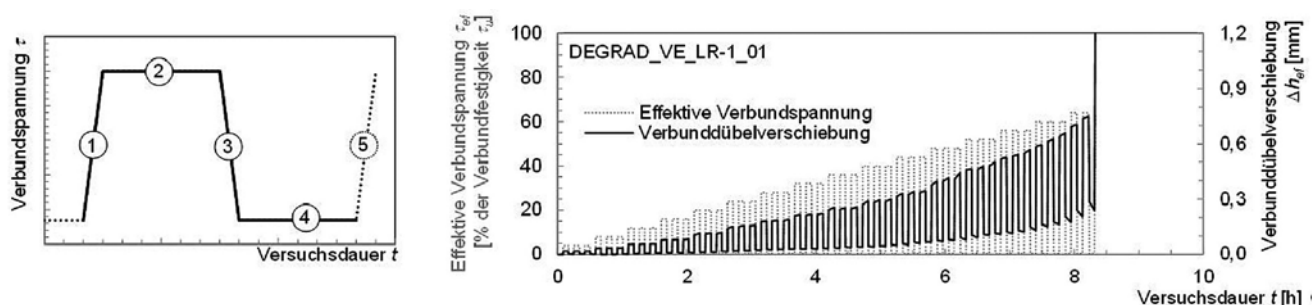


Bild 2:
links: Ablauf eines Lastwechsels des Degradationsversuchs (schematisch);
rechts: Verbundspannungs-/Zeit-Beziehung sowie zugehörige Verschiebungs-/Zeit-Beziehung eines Verbunddübels im Degradationsversuch

Zur Prüfung der Funktionalität des modifizierten Burgers-Modells wurde neben den Modellprognosen vergleichend auch eine Vielzahl an Dauerstandversuchen mit zwei untersuchten Verbunddübelssystemen (VE und EP) und variablen Verbundspannungen durchgeführt. Die Untersuchungen ergaben, dass das modifizierte Burgers-Modell in der Lage ist, das Dauerstandverhalten der Verbunddübel richtig und mit ausreichender Präzision vorauszusagen. Bild 3 (Verbunddübel VE) und Bild 4 (Verbunddübel EP).

Die Eingangsparameter für das modifizierte Burgers-Modell können in drei Versuchsserien, bestehend aus 1) Auszugversuchen, 2) Dauerstandversuchen mit 1.000 h Dauer und 3) Degradationsversuchen am Verbunddübel selbst ermittelt werden. Während 1) und 2) standardisierte Tests darstellen, wie sie auch zur Erwirkung einer bauaufsichtlichen Zulassungen durchgeführt werden, sind die Degradationsversuche spezielle, im Rahmen der Dissertation entwickelte Zugversuche, bei welchen die Verbunddübel zahlreiche Lastwechsel durchlaufen müssen; Bild 2. Auf der Basis dieser Degradationsversuche kann zeitraffend die Materialschädigung unter Dauerlast quantifiziert werden, was wiederum die Grundlage zur Prognose des Versagens der Verbunddübel darstellt.

Zur Prüfung der Funktionalität des modifizierten Burgers-Modells wurde neben den Modellprognosen vergleichend auch eine Vielzahl an Dauerstandversuchen mit zwei untersuchten Verbunddübelssystemen (VE und EP) und variablen Verbundspannungen durchgeführt. Die Untersuchungen ergaben, dass das modifizierte Burgers-Modell in der Lage ist, das Dauerstandverhalten der Verbunddübel richtig und mit ausreichender Präzision vorauszusagen. Bild 3 (Verbunddübel VE) und Bild 4 (Verbunddübel EP).

Bild 3 und 4:
Zeitliche Entwicklung der Verschiebungen Δh der Verbunddübel VE (links) und EP (rechts) im Dauerstandversuch bei einer konstanten Verbundspannung $\tau = 11,6$ MPa; 14,5 MPa bzw. 16,5 MPa (blaue Linien) sowie mit dem modifizierten Burgers-Modell prognostizierte Verschiebungsverläufe für die jeweiligen Verbundspannungen (gestrichelte grüne Linien)

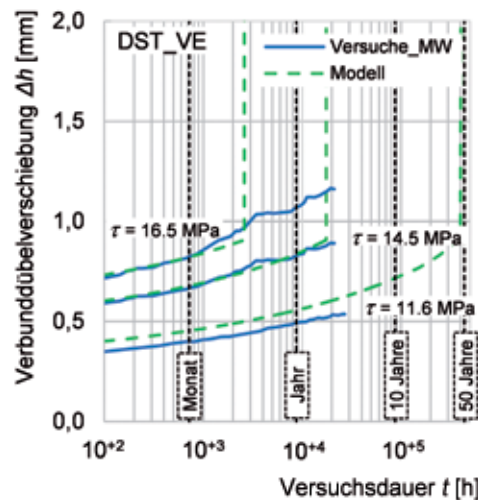


Bild 3: Verbunddübel VE

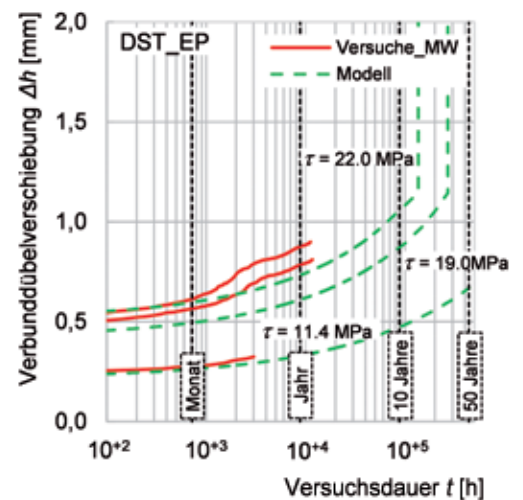


Bild 4: Verbunddübel EP

Neben den Verschiebungsverläufen konnten insbesondere auch die Zeitpunkte des Versagens unter einer vorgegebenen Dauerlast hinreichend genau prognostiziert werden. Bild 5 (Verbunddübel VE) und Bild 6 (Verbunddübel EP) stellen diesen Zusammenhang dar.

Bild 5 und 6:
Mittlere Zeitdauer bis zum Versagen der Verbunddübel VE (links) und EP (rechts) in Abhängigkeit von der mittleren aufgetragenen dauerhaften Verbundspannung; rote raute-förmige Symbole stellen die aus den Dauerstandversuchen ermittelten Versagenszeitpunkte dar, grüne runde Symbole stehen für die mit dem modifizierten Burgers-Modell prognostizierten Versagenszeiten

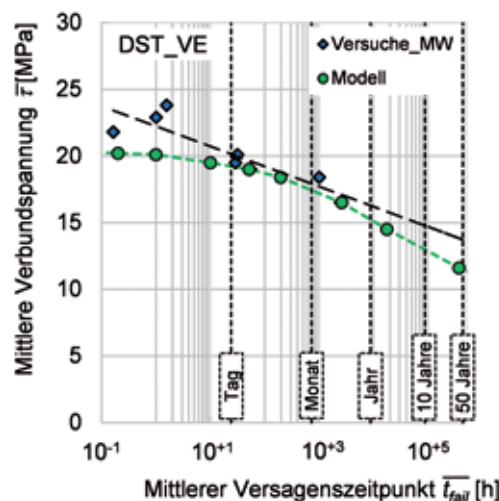


Bild 5: Verbunddübel VE

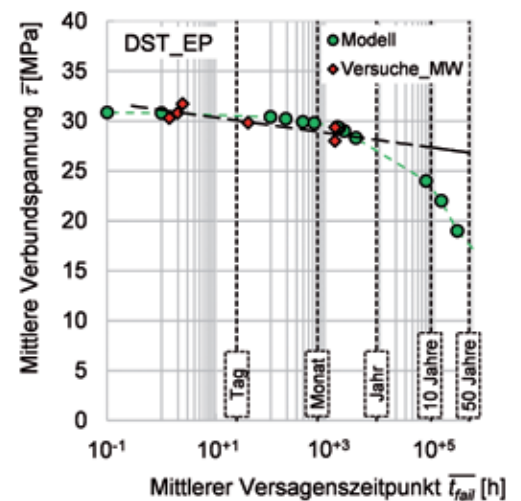


Bild 6: Verbunddübel EP

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass mit der Entwicklung des modifizierten Burgers-Modells im Rahmen dieser Dissertation die Grundlagen für ein neuartiges Konzept zur Lebensdauerprognose der Verbunddübel geschaffen wurde. Die Anwendbarkeit des Modells konnte bestätigt werden. Damit sich jedoch eine breite praktische Anwendung des rheologischen Modellansatzes zur Lebensdauerbemessung der Verbunddübel etablieren lässt, bedarf es weiterer Untersuchungen, insbesondere zu Schaffung einer größeren Datenbasis für die Vielzahl an unterschiedlichen bauaufsichtlich zugelassen Verbunddübelprodukten und -geometrien sowie zum Einfluss weiterer, das Langzeittragverhaltens determinierender Einflussfaktoren.



Thomas Kränkel am Tag des Rigorosums, 10.11.17

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

3D-Drucken mit Beton – Anwendungspotenziale im architektonischen Bereich.

BFT International, 61. BetonTage 14.–16.02.17, Neu-Ulm, Kongressunterlagen S. 46, Bauverlag BV GmbH

Gehlen, C.:

Neue Instrumente für die Instandhaltungsplanung. Vorträge zum Deutschen Bautechnik-Tag am 27. und 28. April 2017 in Stuttgart, DBV-Heft Band 40, S. 149

Gehlen, C.; Kessler, S.:

Condition Control and Assessment of Reinforced Concrete Structures.

9th International Symposium on Cement and Concrete (ISCC 2017), Oct. 31 – Nov. 3, 2017, Wuhan, China, Proceedings A-197

Angst, Ueli M.; Geiker, Mette R.; Michel, Alexander; Gehlen, Christoph; Wong, Hong; Isgor, O. Burkan; Elsener, Bernhard; Hansson, Carolyn M.; François, Raoul; Hornbostel, Karla; Polder, Rob; Alonso, Maria Cruz; Sanchez, Mercedes; Correia, Maria João; Criado, Maria; Sagüés, A.; Buenfeld, Nick:

The steel–concrete interface

In: Materials and Structures Vol. 50 (2), 2017, Springer Nature

Kessler, Sylvia; Gehlen, Christoph:

Reliability Evaluation of Half-Cell Potential Measurement Using POD.

In: Journal of Infrastructure Systems 23 (2), 2017, American Society of Civil Engineers (ASCE)

Kessler, Sylvia; Thiel, Charlotte; Grosse, Christian U.; Gehlen, Christoph:

Effect of freeze–thaw damage on chloride ingress into concrete.

In: Materials and Structures 50 (2), 2017, Springer Nature

Keßler, S.; Hiemer, F.; Gehlen, C.:

Impact of a concrete coating on the reinforcement corrosion in cracked concrete.

EUROCORR 2017, 20th International Corrosion Congress & Process Safety Congress, Sep. 3 – 7, 2017, Prague, Czech Republic

Keßler, Sylvia; Hiemer, Florian; Gehlen, Christoph:

Einfluss einer Betonbeschichtung auf die Mechanismen der Bewehrungskorrosion in gerissenem Stahlbeton.

In: Beton- und Stahlbetonbau 112 (4), 2017, S. 198-206, Wiley-Blackwell

Lowke, Dirk; Gehlen, Christoph:

The zeta potential of cement and additions in cementitious suspensions with high solid fraction.

In: Cement and Concrete Research, Vol. 95, 2017, pp 195-204, Elsevier BV

Thiel, C.; Skora, A.; Gehlen, C.:

Einfluss der Nachbehandlung auf die beschleunigte Carbonatisierung zementgebundener Baustoffe.

5. DAfStb-Jahrestagung mit 58. Forschungskolloquium, 20. – 21.09.2017, TU Kaiserslautern, Konferenzband 2, S. 106-116

Weger, D.; Gehlen, C.:

3D-Drucken mit Beton – Potentiale in der Architektur.

37. Kolloquium Forschung & Entwicklung für Zement und Beton, 13.11.2017, VÖZ, Wien, Österreich

Yao, Yan; Wang, Ling; Wittmann, Folker H.; De Belie, Nele; Schlangen, Erik; Eguéz Alava, Hugo; Wang, Zhendi; Kessler, Sylvia; Gehlen, Christoph; Yunus, Balqis Md.; Li, Juan; Li, Weihong;

Setzer, Max. J.; Xing, Feng; Cao, Yin:

Test methods to determine durability of concrete under combined environmental actions and mechanical load: final report of RILEM TC 246-TDC.

In: Materials and Structures 50 (2), 2017, Springer Nature

Ziehensack, E.; Kessler, S.; Gehlen, C.; Angst, U.:

Estimation of diffusion potentials by experiments with filter.

EUROCORR 2017, 20th International Corrosion Congress & Process Safety Congress, Sep. 3 – 7, 2017, Prague, Czech Republic

Prof. Christian Große**Große, C.:**

Zehnkampf (ohne Ausbildung) – Lehrstuhlinhaber und Lehrstuhlinhaberinnen berichten aus der Praxis.

In: Forschung & Lehre, Band: Lehrstuhlmanagement, 08-2017

Große, C.:

Qualitätssicherung von Faserverbundwerkstoffen in der Fertigung mit Zerstörungsfreien Prüfverfahren.
In: Fachzeitschrift Werkstoffe in der Fertigung (1-2017), S. 16-17, HW-Verlag

Grosse, C. U.; Lieleg, O.; Malm, F.; Wenzler, A.:

Self-healing vs. hydrophobic bio-modified mortar – pros and cons of both materials concerning mechanical properties.

6th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2017), June 25 – 28, 2017, Friedrichshafen

Botz, M.; Raith, M.; Emiroglu, A.; Grosse, C. U.:

Monitoring of Wind Turbine Structures Using Stationary Sensors and Short-term Optical Techniques.
11th International Workshop on Structural Health Monitoring, Sep 12 – 14, 2017, Stanford University, USA

Eggert, S.; Tuebel, J.; Foehr, P.; Kuntz, L. A.;**Obermeier, A.; Marthen, C.; Grosse, C. U.;****Burgkart, R.:**

Image-based histological evaluation of scaffold-free 3D osteoblast cultures.

eCM Meeting Abstracts 2017, Collection 2; TERMIS EU (P120)

Foehr, P.; Eggert, S.; Tübel, J.; Obermeier, A.; Kuntz, L. A.; Marthen, C.; Saldamli, B.; Große, C. U.; Burgkart, R.:

Evaluation of a scaffold-free 3D osteoblast culture using biomechanical loading and histological characterization.

eCM Meeting Abstracts 2017, Collection 2; TERMIS EU (P129)

Foehr, P.; Heinrich, V.; von Deimling, C.; Kuntz, L. A.; Obermeier, A.; Tübel, J.; Grosse, C. U.; Burgkart, R.:

Combined thermal and fluid flow simulation for the optimization of a 3D-culture bioreactor.

eCM Meeting Abstracts 2017, Collection 2; TERMIS EU (P492)

Föhr, P.; Groschup, R.; Eigner, H.; Malm, F.; Raith, M.; von Deimling, C.; Burgkart, R.; Große, C. U.:

Spatial And Temporal Fracture Prediction In The Femur During Compression Using Acoustic Emission Analysis.
Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie (DKOU 2016), 25. – 28.10.2016, Berlin

Geiss, C. T.; Kinscherf, S.; Decker, M.; Romahn, S.; Botz, M.; Raith, M.; Wondra, B.; Grosse, C. U.; Osterminski, K.; Emiroglu, A.; Bletzinger, K.-U.; Obradovic, D.; Wever, U.:

The Mistralwind Project – Towards a remaining useful life-time analysis and holistic asset management approach for more sustainability of wind turbine structures.

11th International Workshop on Structural Health Monitoring, Sep 12 – 14, 2017, Stanford University, USA

Grager, J.-C.; Mooshofer, H.; Eschler, E.; Grosse, C. U.:

Optimierung der Total Focusing Method für die Prüfung von CFK-Werkstoffen.

DGZfP-Jahrestagung, 21. – 24.05.2017, Koblenz

Gruyaert, E.; Debbaut, B.; Kaasgaard, M.; Sorensen, H. E.; Pelto, J.; Branco, V.; Malm, F.; Grosse, C.; Price, E.; Krüger, M.; De Belie, N.:

Evaluation of the performance of self-healing concrete at small and large scale under laboratory conditions.

14th International Conference on Durability of Building Materials and Components, May 29 – 31, 2017, Ghent University, Belgium

Iliopoulos, Sokratis N.; Malm, Fabian; Grosse, Christian U.; Aggelis, Dimitrios G.:

Experimental investigation of wave dispersion in hardened concrete and reference liquid media.

In: Smart Materials and Nondestructive Evaluation for Energy Systems 2017, SPIE.DIGITAL LIBRARY, Apr. 19, 2017

Iliopoulos, Sokratis N.; Malm, Fabian; Grosse, Christian U.; Aggelis, Dimitrios G.; Polyzos, Demosthenes:

Concrete wave dispersion interpretation through Mindlin's strain gradient elastic theory.

In: The Journal of the Acoustical Society of America 142 (1), 2017, EL89-EL94

Kessler, Sylvia; Thiel, Charlotte; Grosse, Christian U.; Gehlen, Christoph:

Effect of freeze-thaw damage on chloride ingress into concrete.

In: Materials and Structures 50 (2), 2017, Springer Nature

Malm, F.; Grosse, C.:

Moderne Ultraschallmesstechnik für die Qualitätssicherung zementgebundener Werkstoffe.

In: Messtechnik im Bauwesen (Special 2017), 2017, S. 34-38, Ernst & Sohn

Mosch, M.; Grosse, C. U.:

ZfP Prüfbarkeit an Faserverbundbauteilen – ein Modell zur automatisierten Bewertung von Prüfsituationen.
DGZfP-Jahrestagung, 21. – 24.05.2017, Koblenz

Prof. Detlef Heinz**Decker, M.; Hilbig, H.; Heinz, D.:**

Laser-Ablation-ICP-MS for the Application on Concrete Structures – Quantitative Approches.
Tagung Bauchemie (GDCh-Monographie) Band 52, 2017, S. 95-98

Fischer, K.; Heinz, D.:

AKR-Performance-Prüfung von Fahrbahndecken-Beton mit Granit: Einflüsse aus der Sandfraktion.
AKR-Fachforum Betonstraßenbau, 28.11.2017, FGSV e. V., Bergisch-Gladbach

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

Expansionsverhalten von Mörtel mit Granit und Granit-Sand-Gemischen unter Zugabe von NaCl bei 60 °C (AKR-Performance-Test-Bedingungen).
Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 39, 10/2017, TUM / Centrum Baustoffe und Materialprüfung

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

ASR in Granitic Aggregates – Microscopic Damage Characteristics and Behaviour in Concrete Performance Test with Exposure to Sodium Chloride.
16th Euroseminar on Microscopy applied to Building Materials (EMABM 2017), May 14 – 17, 2017, École Polytechnique fédérale de Lausanne, Switzerland, Proceedings pp 60 – 63

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

Evaluation of Alkali Silica Reaction in Fly Ash Concrete Using an Accelerated Performance Test Method.
3rd International Congress on Durability of Concrete, Oct. 22 – 25, 2017, Adelaide Australia

Hilbig, H.; Huber, M.; Gmell, A.; Heinz, D.:

Determination of Heavy Metals in a Highly Porous Sorptive Filter Material of Road Runoff Treatment Systems with LA-ICP-MS.
In: Water, Air & Soil Pollution, Vol. 228 (9), 2017, Springer Nature

Huber, M.; Hilbig, H.; Gmell, A.; Heinz, D.;**Drewes, J. E.; Helmreich, B.:**

Bestimmung von Isotopenverteilungen in einem porösen Eisenhydroxid zur Behandlung von Verkehrsflächenabflüssen mittels LA-ICP-MS.
Wasser 2017, 22. – 24.05.2017, Donaueschingen, Konferenzband S. 211-216

AG 1 Bindemittel und Zusatzstoffe**Fischer, K.; Heinz, D.:**

AKR-Performance-Prüfung von Fahrbahndecken-Beton mit Granit: Einflüsse aus der Sandfraktion.
AKR-Fachforum Betonstraßenbau, 28.11.2017, FGSV e. V., Bergisch-Gladbach

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

Expansionsverhalten von Mörtel mit Granit und Granit-Sand-Gemischen unter Zugabe von NaCl bei 60 °C (AKR-Performance-Test-Bedingungen).
Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 39, 10/2017, TUM / Centrum Baustoffe und Materialprüfung

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

ASR in Granitic Aggregates – Microscopic Damage Characteristics and Behaviour in Concrete Performance Test with Exposure to Sodium Chloride.
16th Euroseminar on Microscopy applied to Building Materials (EMABM 2017), May 14 – 17, 2017, École Polytechnique fédérale de Lausanne, Switzerland, Proceedings pp 60-63

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

Evaluation of Alkali Silica Reaction in Fly Ash Concrete Using an Accelerated Performance Test Method.
3rd International Congress on Durability of Concrete, Oct. 22 – 25, 2017, Adelaide Australia

Stankevičiūtė, Monika; Urbonas, Liudvikas;**Heisig, Anne:**

Synthesis of belite calcium sulfoaluminate cement using hard coal fly ash.
International Conference Chemistry and Chemical Technology, Apr. 28, 2017, Kaunas, Lithuania, Proceedings pp 69

AG 2 Betontechnologie

Kessler, Sylvia; Thiel, Charlotte; Grosse, Christian U.; Gehlen, Christoph:

Effect of freeze-thaw damage on chloride ingress into concrete.

In: Materials and Structures 50 (2), 2017, Springer Nature

Lowke, Dirk; Gehlen, Christoph:

The zeta potential of cement and additions in cementitious suspensions with high solid fraction.

In: Cement and Concrete Research, Vol. 95, 2017, pp 195-204, Elsevier BV

Thiel, C.; Skora, A.; Gehlen, C.:

Einfluss der Nachbehandlung auf die beschleunigte Carbonatisierung zementgebundener Baustoffe. 5. DAfStb-Jahrestagung mit 58. Forschungskolloquium, 20. – 21.09.2017, TU Kaiserslautern, Konferenzband 2, S. 106-116

Weger, D.; Gehlen, C.:

3D-Drucken mit Beton – Potentiale in der Architektur.

37. Kolloquium Forschung & Entwicklung für Zement und Beton, 13.11.2017, VÖZ, Wien, Österreich

AG 3 Stahl und Korrosion

Gehlen, C.; Kessler, S.:

Condition Control and Assessment of Reinforced Concrete Structures.

9th International Symposium on Cement and Concrete (ISCC 2017), Oct. 31 – Nov. 3, 2017, Wuhan, China, Proceedings A-197

Geiss, C. T.; Kinscherf, S.; Decker, M.; Romahn, S.; Botz, M.; Raith, M.; Wondra, B.; Grosse, C. U.; Osterminski, K.; Emiroglu, A.; Bletzinger, K.-U.; Obradovic, D.; Wever, U.:

The Mistralwind Project – Towards a remaining useful life-time analysis and holistic asset management approach for more sustainability of wind turbine structures.

11th International Workshop on Structural Health Monitoring, Sep 12 – 14, 2017, Stanford University, USA

Kessler, S.:

Die Zuverlässigkeit der Potentialfeldmessung – Konsequenzen für die Praxis.

5. Kolloquium "Erhaltung von Bauwerken" der Technischen Akademie Esslingen (TAE), 24. – 25.01.2017

Kessler, S.; Sagüés, A.; Lau, K.:

Extent of Cathodic Reaction on Epoxy Coated Rebar with Partially Disbonded Coating.

CORROSION 2017, Mar. 26 – 30, 2017, New Orleans, USA, Document ID NACE-2017-9469, NACE international

Kessler, Sylvia; Gehlen, Christoph:

Reliability Evaluation of Half-Cell Potential Measurement Using POD.

In: Journal of Infrastructure Systems 23 (2), 2017, American Society of Civil Engineers (ASCE)

Kessler, Sylvia; Thiel, Charlotte; Grosse, Christian U.; Gehlen, Christoph:

Effect of freeze-thaw damage on chloride ingress into concrete.

In: Materials and Structures 50 (2), 2017, Springer Nature

Keßler, S.:

Concrete test specimen for NDE reliability demonstration. 7th European-American Workshop on Reliability of NDE 2017, Sep 4 – 7, 2017, Potsdam

Keßler, S.; Hiemer, F.; Gehlen, C.:

Impact of a concrete coating on the reinforcement corrosion in cracked concrete.

EUROCORR 2017, 20th International Corrosion Congress & Process Safety Congress, Sep. 3 – 7, 2017, Prague, Czech Republic

Keßler, Sylvia; Hiemer, Florian; Gehlen, Christoph:

Einfluss einer Betonbeschichtung auf die Mechanismen der Bewehrungskorrosion in gerissenem Stahlbeton.

In: Beton- und Stahlbetonbau 112 (4), 2017, S. 198-206, Wiley-Blackwell

Van Tittelboom, K.; Kessler, S.; De Maesschalck, C.; Van Belleghem, B.; Van Den Heede, P.; De Belie, N.:

Self-healing of concrete cracks by the release of embedded water repellent agents and corrosion inhibitors to reduce the risk for reinforcement corrosion.

14th International Conference on Durability of Building Materials and Components (2017XIV DBMC), May 29 – 31, 2017, Universiteit Gent, Belgium

Yao, Yan; Wang, Ling; Wittmann, Folker H.; De Belie, Nele; Schlangen, Erik; Eguéz Alava, Hugo; Wang, Zhendi; Kessler, Sylvia; Gehlen, Christoph; Yunus, Balqis Md.; Li, Juan; Li, Weihong; Setzer, Max. J.; Xing, Feng; Cao, Yin:

Test methods to determine durability of concrete under combined environmental actions and mechanical load: final report of RILEM TC 246-TDC.

In: Materials and Structures 50 (2), 2017, Springer Nature

Ziehensack, E.; Kessler, S.; Gehlen, C.; Angst, U.:

Estimation of diffusion potentials by experiments with filter.

EUROCORR 2017, 20th International Corrosion Congress & Process Safety Congress, Sep 3 – 7, 2017, Prague, Czech Republic

AG 4 Chemie

Decker, M.; Hilbig, H.; Heinz, D.:

Laser-Ablation-ICP-MS for the Application on Concrete Structures – Quantitative Approaches.

Tagung Bauchemie (GDCh-Monographie) Band 52, 2017, S. 95-98

Hilbig, H.; Huber, M.; Gmell, A.; Heinz, D.:

Determination of Heavy Metals in a Highly Porous Sorptive Filter Material of Road Runoff Treatment Systems with LA-ICP-MS.

In: Water, Air & Soil Pollution, Vol. 228 (9), 2017, Springer Nature

Huber, Bettina; Hilbig, Harald; Drewes, Jörg E.;

Müller, Elisabeth:

Evaluation of concrete corrosion after short- and long-term exposure to chemically and microbially generated sulfuric acid.

In: Cement and Concrete Research, Vol. 94, 2017, S. 36-48, Elsevier BV

Huber, M.; Hilbig, H.; Gmell, A.; Heinz, D.;

Drewes, J. E.; Helmreich, B.:

Bestimmung von Isotopenverteilungen in einem porösen Eisenhydroxid zur Behandlung von Verkehrsflächenabflüssen mittels LA-ICP-MS.

Wasser 2017, 22. – 24.05.2017, Donaueschingen, Konferenzband S. 211-216

Huber, M.; Welker, A.; Hilbig, H.; Wulff, M.;

Helmreich, B.:

Vergleich zweier Filtermaterialien zur Entfernung von Phosphat und Schwermetallen aus Verkehrsflächenabflüssen. In: Hella Runge (Hrsg.): Herausforderung Regenwasser (1. Auflage 2017), DIV Deutscher Industrieverlag, Essen

Huber, M.; Welker, A.; Hilbig, H.; Wulff, M.;

Helmreich, B.:

Vergleich zweier Filtermaterialien zur Entfernung von Phosphat und Schwermetallen aus Verkehrsflächenabflüssen. gwf – Wasser|Abwasser, vol. 158 (no. 3), 2017, S. 99-112, DIV Deutscher Industrieverlag, Essen

AG 5 Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine

Hutschenreuther, J.; Wörner, T.:

Asphalt im Straßenbau.

495 Seiten, 3. Auflage 2017, Kirschbaum Verlag

Wörner, Th.:

Különböző aszfalttulajdonságok első elemzése Németországban 21 útszakaszon nyert és tanulmányozott adatok alapján. – The first analysis of different asphalt properties – Data studied in Germany on 21 roads

In: Az Aszfalt 1/2017, HAPA Conference, 21. – 22.02.2017, Siófok, Hungary

AG 6 Zerstörungsfreie Prüfung

Botz, M.; Raith, M.; Emiroglu, A.; Grosse, C. U.:

Monitoring of Wind Turbine Structures Using Stationary Sensors and Short-term Optical Techniques. 11th International Workshop on Structural Health Monitoring, Sep 12 – 14, 2017, Stanford University, USA

Botz, M.; Zhang, Y.; Raith, M.; Pinkert, K.:

Operational Modal Analysis of a Wind Turbine during Installation of Rotor and Generator. 7th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC), May 10 – 12, 2017, Ingolstadt

**Geiss, C. T.; Kinscherf, S.; Decker, M.; Romahn, S.;
Botz, M.; Raith, M.; Wondra, B.; Grosse, C. U.;
Osterminski, K.; Emiroglu, A.; Bletzinger, K.-U.;
Obradovic, D.; Wever, U.:**

The Mistralwind Project – Towards a remaining useful life-time analysis and holistic asset management approach for more sustainability of wind turbine structures.

11th International Workshop on Structural Health Monitoring, Sep 12 – 14, 2017, Stanford University, USA

Grosse, C. U.; Lieleg, O.; Malm, F.; Wenzler, A.:

Self-healing vs. hydrophobic bio-modified mortar – pros and cons of both materials concerning mechanical properties.

6th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2017), June 25 – 28, 2017, Friedrichshafen

**Gruyaert, E.; Debbaut, B.; Kaasgaard, M.;
Sorensen, H. E.; Pelto, J.; Branco, V.; Malm, F.;
Grosse, C. U.; Price, E.; Krüger, M.; De Belie, N.:**

Evaluation of the performance of self-healing concrete at small and large scale under laboratory conditions.

14th International Conference on Durability of Building Materials and Components, May 29 – 31, 2017, Ghent University, Belgium

**Iliopoulos, Sokratis N.; Malm, Fabian;
Grosse, Christian U.; Aggelis, Dimitrios G.:**

Experimental investigation of wave dispersion in hardened concrete and reference liquid media.

In: Smart Materials and Nondestructive Evaluation for Energy Systems 2017, SPIE.DIGITAL LIBRARY, Apr 19, 2017

**Iliopoulos, Sokratis N.; Malm, Fabian;
Grosse, Christian U.; Aggelis, Dimitrios G.;
Polyzos, Demosthenes:**

Concrete wave dispersion interpretation through Mindlin's strain gradient elastic theory.

In: The Journal of the Acoustical Society of America 142 (1), 2017, EL89-EL94

Malm, F.; Grosse, C. U.:

Moderne Ultraschallmesstechnik für die Qualitätssicherung zementgebundener Werkstoffe.

In: Messtechnik im Bauwesen (Special 2017), 2017, S. 34–38, Ernst & Sohn

¹ Centre for Building Materials
(Technical University of Munich), Germany

16th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials (EMABM 2017)
14/05/2017 – 17/05/2017, Les Diablerets near Lausanne, Switzerland

11.1. ASR in Granitic Aggregates – Microscopic Damage Characteristics and Behaviour in Concrete Performance Test with Exposure to Sodium Chloride

K. Fischer¹, L. Urbonas¹, D. Heinz¹

11.1.1. Introduction

Since the late 1990s, concrete motorway pavement in Germany has often been damaged by an alkali silica reaction (ASR). Besides an increase in dynamic load by traffic and exposure to de-icing salts, the use of slowly reacting aggregates is considered to be to a major factor for this damage. Most of the aggregates were assessed according to the requirements of the Alkali Guideline published by the German Committee for Reinforced Concrete [1]. Nevertheless, a significant number of motorway sections were damaged by ASR. As a consequence, ASR performance tests regarding the specific exposure of concrete pavement have been developed to assess aggregates or concrete compositions [2, 3]. According to the general circular for road construction No. 04/2013 „Avoiding damage in concrete pavement due to ASR“, these tests should be applied to avoid ASR damage in future concrete pavement structures [4]. In this context, the approved 60 °C *performance test with external alkalis* according to MÜLLER et al. [2] provides reliable results for the common alkali reactive rock types in Germany such as greywacke, rhyolite or crushed gravel from the upper Rhine valley. However, the application of this performance test on concrete with granitic aggregate could lead to quite different results and assessments depending on the natural sand used in the fine grading fraction (0-2 mm) of the concrete [5]. Despite this, significant ASR damage in concrete structures caused by granite or the fine sand fraction has not been observed up to now. As a consequence, there is only little experience in the behaviour of German granites. Documented cases, e.g. in Portugal and Norway, show that granitic aggregates can indeed cause ASR [6, 7]. A reliable assessment of concrete with granitic aggregates for application in motorway pavements cannot be guaranteed at present. Therefore the present investigation programme focussed on the characterization of the typical damage features of ASR in concrete with granitic aggregates. Additionally, the effect of different natural quartzitic sands in concretes with granite was investigated with the performance test.

11.1.2. Materials and Methods

The first part of the investigation programme was to provoke ASR in the granitic aggregates in order to characterize the microscopic damage features and compare them to those of well-known alkali reactive rock types. Aggregates were crushed to a grading fraction of 0.125 – 4 mm. Mortar bars (160mm×40mm×40mm) were made with the crushed material and stored in a 1 M NaOH solution at 80 °C up to 180 days in sealed containers following the German Alkali Guideline [1] but with an extended storage time.

After 28 and 180 days thin sections of the bars were prepared and analysed with polarization microscopy. Three undeformed granites (G1, G2 and G3) from the Bavarian Forest, known not to cause ASR damages in field structures, were used in the tests. A greywacke (GW) and a limestone (LS) were used as reactive and non-reactive references, respectively. The same aggregates were also used in the second part of the investigation programme –

Concrete	c	w/c	air void content	G1	G2	G3	GW	LS	S1	S2
				2-8 mm			0-2 mm			
	[kg/m³]	-	[vol.%]	vol.% of the aggregate						
G1 S1	430	0.45	5.5 - 6.5	70						
G2 S1					70					
G3 S1						70				30
GW S1							70			
LS S1								70		
G1 S2				70						
G2 S2					70					
G3 S2						70				30
GW S2							70			
LS S2								70		

Storage	Duration	Condition
Initial Storage: 28 d	1 d	in mould, 20 °C / 100 % RH
	7 d	20 °C and 100 % RH
	14 d	20 °C / 65 % RH
	6 d	60 °C and 100 % RH
	1 d	20 °C / ~ 100 % RH, measurement
Cyclic storage: 14 d (10 cycles / 140 d)	5 d	60 °C (dry)
	2 d	20 °C storage in NaCl solution ^{b)}
	6 d	60 °C / 100 % RH
	1 d	20 °C / 100 % RH measurement

^{b)} 10 wt.% NaCl

Table 1:
Concrete compositions for the 60 °C ASR performance test with external alkalis

Table 2:
Testing procedure for the 60 °C ASR performance test with external alkalis [2]

the behaviour of these materials in the 60 °C ASR concrete performance test with external alkalis. The exposed-aggregate concrete pavement compositions used in the investigations are in Table 1. An ordinary CEM I 42.5 N with an alkali content of 0.85 wt.% was used. Two natural sands were used; an almost pure quartzitic sand (S1) and a sand (S2) with quartz, carbonates, siliceous carbonates and different chert variations. The mineralogical and chemical compositions of the cement, the sands S1 and S2 as well as the granite G1 are published in Fischer et al. [5]. For the concrete performance test, six prisms (280mm×75 mm×75 mm) were made for each composition and exposed to the conditions shown in Table 2. The storage solutions contained 10 wt.% NaCl. According to MÜLLER et al. [2], a maximum expansion of 0.5 mm/m should not be exceeded.

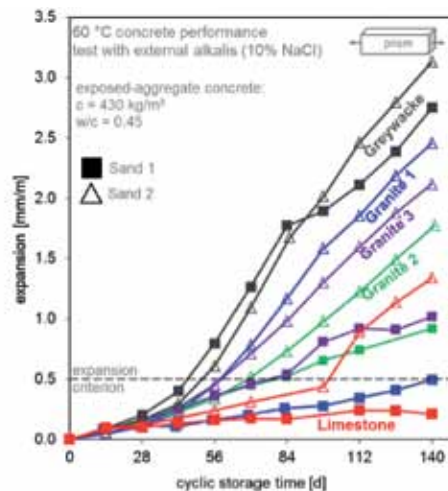
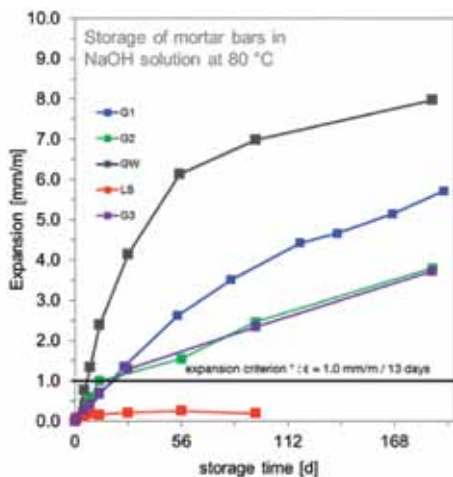


Figure 1:
Expansion of the mortar bars after 180 d in 1 M NaOH solution at 80 °C (left). Expansion of concrete prisms with sand 1 and sand 2 after 140 d in the 60 °C ASR performance test with external alkalis (right). Data for G1 from [5].

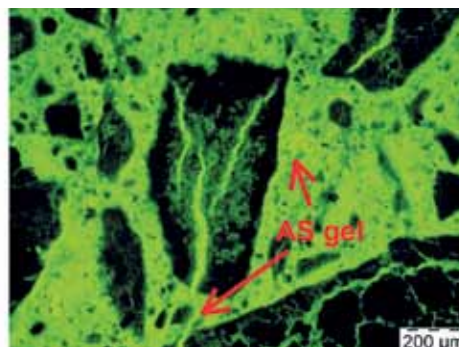
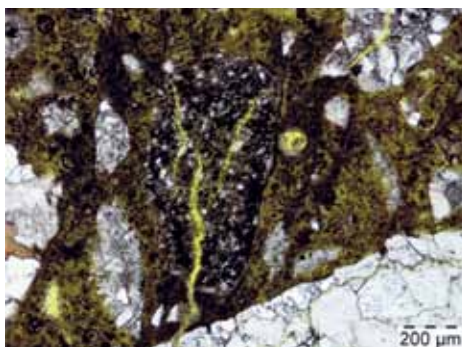


Figure 2:
Micrograph of mortar with greywacke after 28 days in NaOH solution at 80 °C; PPL (left); UV light illumination (right)

11.1.3. Results and Discussion

The expansion of the mortar prisms exposed to a 1 M NaOH solution at 80 °C are shown in Figure 1 (left). The results confirm that limestone (LS) is indeed non-reactive and the greywacke exhibits, as expected, the largest expansion which increased rapidly up to 56 days. In contrast, the granites showed moderate expansions and even fell below the 1.0 mm/m limit (after 13 d) which separates susceptible from non-susceptible aggregates according to the Alkali Guideline [1]. Characteristic damage features of ASR for fine grained slow-reactive rocks were observed during the microscopic analysis of the mortar made with greywacke. For example, Figure 2 shows some branched cracks originating from a grain and propagating into the surrounded hardened cement paste matrix. Alkali silica gel (AS gel) is found in air voids as well as inside cracks, especially in the transition area between grains and matrix. As opposed to the greywacke, quite different microstructural features were observed after 28 d of exposure for the mortars granite. Like mortar with G1 (see [5]), the samples with G2 and G3 exhibited systematic crack formation in the granite grains along the boundaries of quartz crystals (Figure 3).

In contrast to the mortar made with greywacke, these cracks are limited to the granite grains and do not propagate into the hardened cement paste matrix. AS gel was not observed in the cracks but in a few air voids. After 180 days' exposure intensive signs of quartz dissolution are apparent in granite grains as well as AS gel formation in cracks which propagate in the matrix (Figure 4). A contribution of alkali bearing silicates like feldspar or mica, as proposed in some publications (e.g.[8]), was not observed for these specific exposure conditions (1 M NaOH solution / 80 °C).

Figure 3:
Micrograph of mortar with granite (G2) after 28 days in NaOH solution at 80 °C with a crack formation along crystal boundaries; PPL (left); UV light illumination (right); Qtz – quartz; Fsp – feldspar; Chl - chlorite

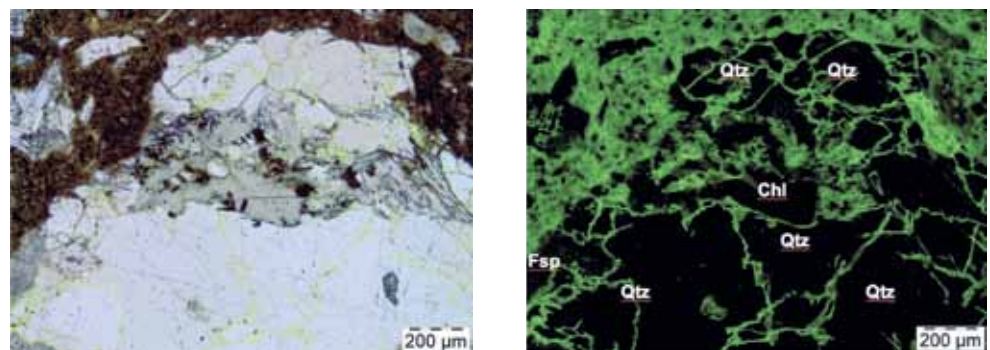


Figure 4:
Micrograph of mortar with granite (G2) after 180 days in NaOH solution at 80 °C with a AS gel formation in crack (left) and dissolution of quartz crystals (right); PPL; Qtz – quartz; Fsp - feldspar

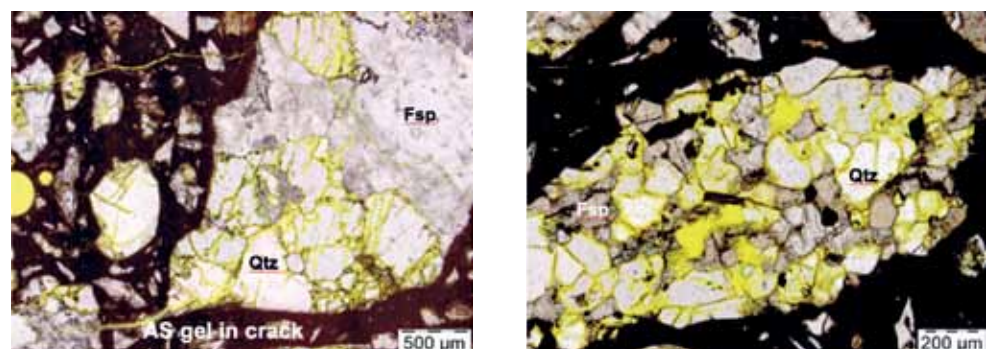


Figure 1 (right) shows the expansion results of the concrete compositions after 140 d of exposure in the 60 °C ASR performance test with external alkalis (10% NaCl). The concrete with the alkali reactive greywacke shows no significant differences in expansion behaviour depending on the sand (S1 or S2). In contrast, in the case of the mixtures with granite the expansion with sand 2 is systematically higher than with sand 1. A similar tendency is also observed for concrete with the non-reactive limestone which exhibits only slight expansions with sand 1, but a clear increase in length after a storage period of 98 days. Polarization microscopy of the concretes after 10 cycles of exposure (140 d) revealed that some of the reactive components of sand 2 (Figure 5) were damaged by ASR and obviously caused some of the expansion (results for G1 described in [5]). Regarding the microscopic damage features of the mortar prism tests, similar crack formation was observed at the boundaries of quartz crystals in the granite grains. Additionally, some of the grains even contained large cracks continuing into reactive sand grains. As opposed to the fine cracks in the granite, these cracks probably originate from ASR in the reactive sand grains. However, a contribution by ASR of the granitic grains to this form of cracking cannot be excluded by this microscopic analysis.

11.1.4. Conclusion

The microstructural development of ASR in granite was investigated based on long time exposure of mortar bars (NaOH solution at 80 °C). The microstructure at early damage conditions showed a systematic formation of micro cracks along grain boundaries within the granite grains, but no significant formation of AS gel and crack propagation in the hardened cement paste matrix. This differs clearly from equally exposed mortar containing greywacke which exhibit well-known ASR characteristics, i.e. crack penetration from the grain into the matrix and formation of ASR products within these cracks. After 180 d of exposure ASR damage features were observed such as dissolution along grain boundaries of quartz in the granite and the formation of AS gel within cracks and air voids. The 60 °C ASR performance test with external alkalis of concrete with granite exhibited quite different behaviour that depended on ASR caused by the reactive components of used sand and a related contribution to the expansion of the concrete prisms. However, why this occurs especially in concrete with granite (also with limestone) and different sands in particular, but not with the slow reactive fine crystalline greywacke is not yet known. Regarding a reliable assessment of concrete compositions and aggregates, an unequivocal transfer of the results from the 60 °C ASR performance test with external alkalis for application in real service motorway pavement concrete cannot be guaranteed.

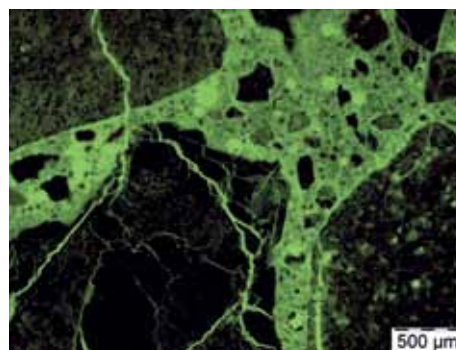
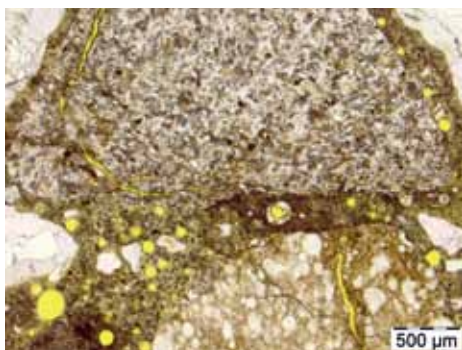


Figure 5:
Concrete G3 S2 with ASR in
reactive chert grain of the sand
2 (left) and cracked granite
grain (right); Qtz – quartz; Fsp
– feldspar

References

- [1] DAfStb-Richtlinie - Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Beuth Verlag, Berlin. 2013. p. 41
- [2] Müller, C., Borchers, I., Eickschen, E. (2007): AKR-Prüfverfahren: Auf dem Weg zur Performance-Prüfung. Beton- und Stahlbetonbau, 102(8): p. 528-538.
- [3] Stark, J., Seyfarth, K. (2008): Assessment of specific pavement concrete mixtures by using an asr performance-test. Proceedings of the 13th ICAAR: p. 320-329.
- [4] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2013: Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 2013. p. 10
- [5] Fischer, K., Urbonas, L., Heinz, D. (2016): Alkali Silica Reaction in Concrete with Granite - Laboratory Tests and real Service Conditions. in 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Sao Paulo, Brazil. p. 8
- [6] Fernandes, I. (2015): Role of granitic aggregates in the deterioration of a concrete dam. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74(1): p. 195-206.
- [7] Hagelia, P., Fernandes, I. (2012): On the AAR Susceptibility of Granitic and Quartzitic Aggregates in View of Petrographic Characteristics and accelerated Testing. in 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions Austin, Texas (USA). p. 10
- [8] Menendez, E., Garcia-Roves, R., Ruiz, S. (2016): Alkali release from aggregates: contribution to ASR. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, 169(4): p. 8.

11.2. Einfluss der Nachbehandlung auf die Carbonatisierung zementgebundener Baustoffe, die unter beschleunigenden Bedingungen geprüft werden

Charlotte Thiel^{1*}, Andrea Skora², Christoph Gehlen¹

Kurzfassung

Die Carbonatisierung ist insbesondere durch den Einsatz neuer Zemente und Betonzusammensetzungen als auch durch die stetig steigende CO₂-Konzentration der Luft ein bedeutendes Thema in Forschung und Praxis. Um die Dauerhaftigkeit einer Stahlbetonkonstruktion abschätzen zu können, muss der Carbonatisierungswiderstand eines Betons mit einer effizienten Prüfmethode schnell und zuverlässig bestimmbar sein. Mit bis zu 28 Tagen nimmt die Nachbehandlungsdauer nicht nur ein großes Zeitfenster der Gesamtprüfdauer in Anspruch, sondern hat auch einen erheblichen Einfluss auf die Ausbildung der Betonrandzone und das Carbonatisierungsverhalten des Betons.

Unter Berücksichtigung der Anforderungen an ein Schnellprüfverfahren, wurde durch Variation verschiedener Nachbehandlungs- und Prüfvarianten eine Empfehlung für die optimale Nachbehandlungsdauer entwickelt. Hierzu wurden Betone mit einem Portlandzement und einem Hochofenzement vor der CO₂-Beaufschlagung zwischen 1 und 28 Tagen nachbehandelt und zwischen 14 und 35 Tagen bei 20° C und 57 % rel. Luftfeuchte vorgetrocknet. In regelmäßigen Abständen wurde die Carbonatisierungstiefe mit einem Farbindikatortest, der Wassergehalt durch Wägung und tiefengestaffelt durch ¹H-NMR-Relaxometrie bestimmt. Die Versuche zeigten, dass sich die unterschiedliche Nachbehandlung vor allem auf den Zustand der Randzone der ersten 8 mm auswirkt. Der Beton mit Hochofenzement wies, unabhängig von der gewählten Nachbehandlung, eine um den Faktor 1,3 bis 2,8 höhere Carbonatisierungstiefe auf, was Verhältniswerten entspricht, die auch unter natürlichen Carbonatisierungsbedingungen beobachtet wurden. Insofern ist es nicht zwingend notwendig seine Nachbehandlungsempfindlichkeit durch eine stark verlängerte Nachbehandlung zu kompensieren. Da hier das Verhältnis zwischen benötigter Verlängerung der Nachbehandlungsdauer und dem erzielten Nutzen in einem starken Ungleichgewicht steht, wird empfohlen, die 7-tägige Nachbehandlung beizubehalten. Auch in Hinblick auf die Übertragbarkeit in die Praxis ist diese Nachbehandlungsdauer empfehlenswert.

11.2.1 Hintergrund

Um, insbesondere auch vor dem Hintergrund steigender Zementabsatzmengen [1], die potentiellen Umweltwirkungen im Bausektor zu senken, werden verstärkt Zemente mit verringertem Gehalt an Portlandklinker eingesetzt. Diese Zemente haben neben ökologischen auch ökonomische Vorteile, vermindern das Risiko einer schädigenden AKR [2] und erhöhen die Dauerhaftigkeit gegenüber chloridinduzierter Bewehrungskorrosion [3]. Durch den geringeren Klinkergehalt wird im Zementstein allerdings auch weniger Ca(OH)₂ gebildet, welches bei einem chemischen Angriff eine wichtige Rolle spielt. Auch die Carbonatisierung stellt einen solchen Säureangriff dar. Das CO₂ aus der Umgebungsluft diffundiert über das Porengefüge in den Beton, wo es in Lösung geht und mit den Bestandteilen der Zementsteinmatrix reagiert, vgl. [4-6]. Sowohl Ca(OH)₂ (Portlandit) als auch Calcium aus den C-S-H-Phasen gehen in Lösung und CaCO₃ fällt im freien Porenraum solange aus, bis alles Ca(OH)₂ verbraucht ist. Ettringit und Monosulfate (AFt/AFm) sind im uncarbonatisier-

ten Beton im Gleichgewicht und durch den hohen pH-Wert der Porenlösung stabilisiert. Monosulfate (AFm) carbonatisieren bei einem pH-Wert von ca. 11,6 und Ettringit (Aft) bei einem pH-Wert von etwa 10,6. Bei einem pH < 9,2 (wenn das Phenolphthalein die Farbe ändert) hat sich also die gesamte Phasenzusammensetzung des Betons geändert. Nach [5] beginnt sich deckungsgleich zur Portlandit-Carbonatisierung Calcium aus den C-S-H-Phasen zu lösen, wobei ein Rest an Calcium selbst bei vollständiger Carbonatisierung im gebildeten Silikagel verbleibt. Der entstehende Calcit besitzt im Vergleich zu Portlandit ein um 11 % höheres Volumen, so dass die Carbonatisierung des Portlandits mit einer Verdichtung des Porengefüges verbunden ist, vgl. z.B. [7]. Zemente mit Zusatzstoffen, wie beispielsweise der Zement des Typs CEM III/A, verfügen durch den deutlich geringeren Gehalt an Portlandit auch über eine geringere Bindekapazität. Als Folge daraus werden die festigkeitsbildenden C-S-H-Phasen stärker angegriffen, was zur Bildung von Calcit und der metastabilen Calcitmodifikation Vaterit führt. Die Porosität erhöht sich [7, 8].

Während die Carbonatisierung unter natürlichen Bedingungen sehr langsam abläuft, kann sie beispielsweise durch die Erhöhung der CO_2 -Konzentration beschleunigt werden [9]. Allerdings weicht die tatsächliche Beschleunigung mit zunehmender CO_2 -Konzentration von der theoretischen ab [10, 11]. Um dem entgegen zu wirken, wurde von Gehlen [3] und Hunkeler et al. [11] für 1 und 2 sowie 4 Vol.-% CO_2 ein Korrekturfaktor eingeführt. Nachteilig an diesem Vorgehen ist, dass dichte Betone mit einem hohen Klinkergehalt im Zement deutlich stärker von der theoretischen Beschleunigung abweichen, als weniger dichte Betone mit geringerem Klinkergehalt im Betongefüge [8]. Gerade für solche Betone gilt es, ein faires Prüfverfahren zu entwickeln, dass das Praxisverhalten realitätsnah widerspiegelt. Daher wird in dieser Arbeit auch auf die Möglichkeit zur Beschleunigung der Carbonatisierung durch die Beaufschlagung der Probekörper bei erhöhten CO_2 Konzentrationen und Überdruck eingegangen. Hierbei wird der im Vergleich zur Diffusion deutlich effektivere Transportmechanismus der Permeation ausgenutzt. Es kommt zu einer Umverteilung des Porenwassers durch das einströmende Gas.

Erste Untersuchungen [12] zeigten bereits, dass die Feuchte bei der Carbonatisierung unter Druck eine entscheidende Rolle spielt. Young et al. [13] zeigten beispielsweise, dass die Carbonatisierungsgeschwindigkeit von Beton mit reinem CO_2 -Gas durch eine Erhöhung des Drucks von 1 bis auf 2 bar beschleunigt wurde, aber durch eine weitere Erhöhung auf 4 bar nicht mehr signifikant erhöht werden konnte. Durch eine Erhöhung des Luftdrucks ändert sich die Diffusion von CO_2 nicht, aber durch Permeation wird der CO_2 -Transport nach [14] für einen Beton mit einem Permeabilitätskoeffizienten von 10^{-16} m^2 und einem Druck von 10 bar sogar um einen Faktor 8000 erhöht. Wenn ein Betonkörper in einem geschlossenen Behälter einem erhöhten Luftdruck ausgesetzt wird, dringt das einströmende Gas immer tiefer in den Körper hinein, bis sich der Druckausgleich einstellt. Bei einem Betonkörper mit einer Größe von ca. 100 mm und einer Permeabilität von 10^{-16} m^2 tritt dies erst nach rund 10 h ein.

Neben der Bindekapazität und den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, CO_2 -Druck), hängt die Carbonatisierungsgeschwindigkeit wesentlich vom Porensystem der Betonrandzone ab. Letzteres wird auch durch die durchgeführte Nachbehandlung beeinflusst. Nach gängiger Laborpraxis werden betonierte Probekörper derzeit für sieben Tage im Wasserbad und anschließend für 21 Tage in der Klimakammer gelagert, bevor die eigentliche Prüfung beginnt. Im Zuge eines neuen Normentwurfs [9], soll diese Nachbehandlungsdauer sogar auf eine 28 tägige Wasserlagerung und eine anschließend 14 tägige Lagerung in der Klimakammer verlängert werden.

Hunkeler und Lammar [11] führten sowohl Versuche bei natürlichen CO_2 Konzentrationen, als auch Versuche bei verschiedenen erhöhten Konzentrationen, beispielsweise bei 1 und 4

Vol.-% CO₂ durch. Zudem variierten sie nicht nur verschiedene Betonsorten, sondern auch die Nachbehandlung (1, 7 und 28 tägige Wasserbadlagerung). Bei Versuchen mit 4 Vol.-% CO₂ zeigte sich beim Beton mit CEM I zwischen 1 und 7 Tagen Nachbehandlung eine Reduzierung der Carbonatisierungstiefen um etwa die Hälfte, eine weitere Verlängerung der Nachbehandlung von 7 auf 28 Tage ergab dagegen keine weitere nennenswerte Verbesserung. Die Ergebnisse von Beton mit einem nachbehandlungsempfindlicheren CEM III wiesen insgesamt höhere Carbonatisierungstiefen auf, aber auch bei diesen war nur zwischen der 1 und 7 tägigen Wasserbadlagerung eine relevante Reduzierung der Tiefen zu beobachten. Hainer et al. [15] stellten im Gegensatz dazu bei Betonen mit verschiedenen klinkerarmen Zementen auch zwischen 7 und 28 Tagen noch eine Reduzierung der Carbonatisierungstiefen um 40 bis 50 Prozent fest. Dagegen fand Storch [16] in seinen Untersuchungen nach dreijähriger Außenlagerung, dass eine Verlängerung der Nachbehandlungsdauer auf 7 Tage Wasserbadlagerung die Carbonatisierungsgeschwindigkeit signifikant reduziert. Eine noch längere Nachbehandlungsdauer senkte die Carbonatisierungsgeschwindigkeit bei allen Betonsorten (w/z von 0,35 bis 0,7) nur noch unwesentlich. Um sowohl bei der Vorlagerung nach Herstellung und der anschließenden Carbonatisierungsdauer die effizienteste Methode zu finden, wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Nachbehandlungs- und Prüfvarianten an einer nachbehandlungsempfindlichen (CEM III) und einer nachbehandlungsunempfindlichen (CEM I) Betonsorte getestet.

11.2.2 Materialien und Untersuchungen

11.2.2.1 Übersicht

Für die Untersuchungen wurden zwei Betone, die sich in der Art des verwendeten Zements unterschieden, hergestellt und fünf unterschiedlichen Nachbehandlungen („N“) und Vorlagerungen unterzogen. Hierbei beschreibt der Begriff Nachbehandlung die Zeit, in der der Beton direkt nach der Herstellung vor Austrocknung geschützt gelagert wurde, während die Vorlagerung die Lagerung bei 20±2°C und 65±1 % relative Luftfeuchte in CO₂-freier als auch in der Münchener Stadtluft („L“) beschreibt. Nach der Vorlagerung begann unmittelbar die Schadgasbeaufschlagung bei Atmosphärendruck (P0) bzw. bei einem Überdruck von 1 bar (P1) bei 3,2 Vol.-% CO₂. Zusätzlich wurde eine Serie bei 0,05 Vol.-% CO₂ carbonatisiert.

Vor Beginn der Schadgasbeaufschlagung wurde an separat hergestellten Prismen (160 x 40 x 40 mm³) die Biegezug- und Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1:2005-05 [17] bestimmt. Zu verschiedenen Prüfzeitpunkten wurde vor, während und nach der Schadgasbeaufschlagung die Masse durch Wägung (Genauigkeit 0,1 g), die Carbonatisierungstiefe durch den Farbindikatortest nach [18], das kapillare Saugverhalten in Anlehnung an DIN EN 13057:2002 [19] und die Feuchteverteilung in der Betonrandzone mittels ¹H-NMR-Relaxometrie bestimmt. Hierzu wurde die NMR MOUSE PM25 der Firma Magritek verwendet. Es wurden CPMG-Messungen mit 128 Scans, 256 Echos, einem Tiefeninkrement von 200 µm und einer maximalen Messtiefe von 9,6 mm durchgeführt.

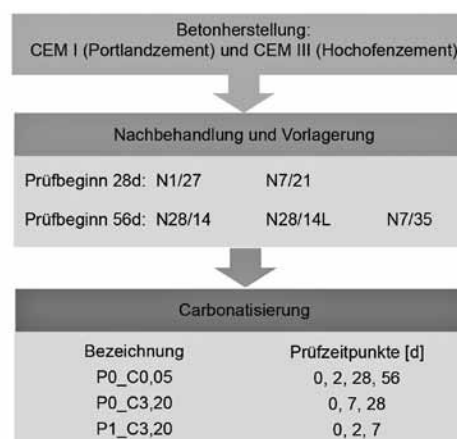


Abbildung 1:
Übersicht des Untersuchungs-
programms

Die Bezeichnung der Probekörper setzt sich aus den drei Komponenten zusammen: Zementart, Prüfvariante und Nachbehandlungsart. Die Beschriftung erfolgt dabei nach dem folgenden Schema:

- Zementsorte **CEM I** (Portlandzement) **CEM III** (Hochofenzement)
- Prüfvariante: Überdruck **P** (0 und 1 bar) und CO₂ Konzentration **C** (0,05; 3,20 Vol.-%)
- Nachbehandlung und Vorlagerung **Nx/y**

11.2.2.2 Materialien

Um sowohl nachbehandlungsempfindliche als auch nachbehandlungsunempfindliche Betone zu untersuchen, wurden zwei Betone mit einem CEM I und einem CEM III (76 % Hütensand) bei einem konstanten w/z-Wert von 0,50 hergestellt, Tab. 1

Tabelle 1:
Gewählte Betonzusammensetzungen

	Beton mit CEM I	Beton mit CEM III
Zement	CEM I 32,5 R	CEM III/B 42,5 N
Zementgehalt [kg/m ³]	350	350
w/z-Wert	0,50	0,50
Fließmittel [M.-% bez. Z]	1,3	1,3
Sand 0/2 [kg/m ³]	698	689
Rheinkies 2/4 [kg/m ³]	651	646
Rheinkies 4/8 [kg/m ³]	638	633

Es wurde eine quarzitisches Gesteinskörnung (Sieblinie A/B 8) aus Rheinsand und -kies verwendet. Die Zugabe von Fließmittel war nötig, um eine gute Verarbeitbarkeit zu erzielen.

11.2.2.3 Herstellung, Nachbehandlung und Vorlagerung

Die trockene Gesteinskörnung wurde mit einem Drittel des Anmachwassers 90 Sekunden gemischt, danach verblieb sie für 3 Minuten im Mischer, ehe unmittelbar der Zement zugegeben wurde. Danach startete der Mischvorgang von 120 Sekunden Dauer. Innerhalb der ersten 30 Sekunden wurde das restliche Anmachwasser zugegeben, innerhalb der zweiten 30 Sekunden das PCE-Fließmittel. Anschließend wurden die Probekörper (Zylinder Ø= 10 cm, h = 20 cm für die Carbonatisierungsversuche und Prismen h = 4 cm, b = 4 cm, l = 16 cm für die Festigkeitsversuche) hergestellt und auf einem Rütteltisch verdichtet und die Oberflächen geglättet. Anschließend wurden die Probekörper für 24 +/- 2 h in Schalung belassen und zum Schutz gegen Austrocknung mit einem feuchten Jutetuch abgedeckt. Nach dem Ausschalen wurden die Körper gemäß ihrer vorgesehenen Nachbehandlungs- und Prüfvariante beschriftet und in die entsprechende Lagerung gegeben. Die CO₂-freie Lagerung wurde durch luftdicht geschlossene Kunststoffboxen realisiert. Auf einer Höhe von 15 cm befand sich ein Siebboden, auf dem die Proben gelagert wurden. Unterhalb wurde zuvor eine wässrige Glycerinlösung zur Einstellung der relativen Luftfeuchte von 65±2 % bis zu einer Höhe von 10 cm eingebracht. Abschließend wurden die Kisten nach jedem Öffnen mit Argon geflutet, um das restliche enthaltene CO₂ zu verdrängen. Um für eine ausreichende Zirkulation zu sorgen, wurde zusätzlich noch ein kleiner Ventilator mit in die Kisten verbaut.

Um zu gewährleisten, dass – analog zu den meisten Praxisbauwerken – nur eindimensional CO₂ auf den Prüfkörper einwirkt, wurde jeder Zylinder während der Dauer der Vorlagerung seinem Lagerungsort für etwa zwei Tage entnommen, um die Mantelflächen sowie die untere Stirnseite der Zylinder mit Epoxidharz abzudichten.

11.2.2.4 Schadgasbeaufschlagung (Carbonatisierung)

Die Proben, die einer definierten CO_2 -Konzentration aber keiner Prüfung unter Druck ausgesetzt wurden, wurden in Klimaschränken gelagert, bei welchen die automatische Einstellung von Temperatur, relativer Luftfeuchte und CO_2 -Gehalt möglich ist. Durch die automatische Regulierung des Klimaschranks unterlagen die gewählten Klimabedingungen nahezu keinen Schwankungen.

Die Prüfvariante, die eine beschleunigte Carbonatisierung mit Hilfe von Druck zum Ziel hatte, wurde in einem Druckbehälter carbonatisiert, Abb. 2.

Die Proben wurden auf Abstandshaltern in einen druckdichten Behälter eingebaut. Das mit eingebaute Silikagel sorgt für eine Absenkung der relativen Luftfeuchte, muss aber in regelmäßigen Abständen ausgetauscht werden. Über zwei extern angeschlossene Gasflaschen mit Gas-mischungen aus N_2 und CO_2 können die Gaskonzentration sowie der Gasdruck eingestellt werden. Im Druckbehälter befindet sich ein Messsensor, über welchen Temperatur und relative Luftfeuchte abgelesen werden. Da die relative Luftfeuchte aufgrund der beschleunigten Carbonatisierung sehr schnell steigt, kann das gesamte System über den Auslass gespült und so die Luftfeuchte wieder gesenkt werden. Über einen am Auslass installierten CO_2 Messsensor wird zudem der CO_2 Gehalt bestimmt. Die Parameter relative Luftfeuchte, Temperatur, Druck und CO_2 Konzentration müssen manuell eingestellt und aufgrund der stattfindenden Carbonatisierungsreaktion häufig nachjustiert werden. Während Druck und Temperatur recht einfach konstant gehalten werden konnten, war die Einstellung von Luftfeuchte und CO_2 -Konzentration gerade in den ersten Stunden nach dem Einbau sehr häufig notwendig.

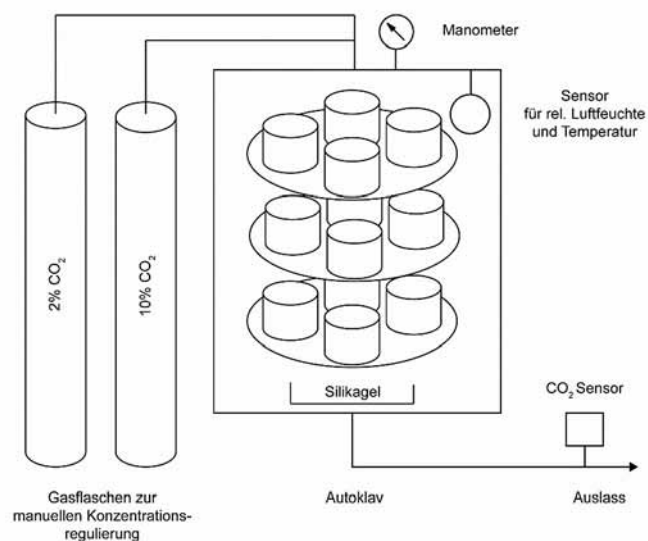


Abbildung 2:
Systemskizze der beschleunigten
Schadgasbeaufschlagung
mit Überdruck

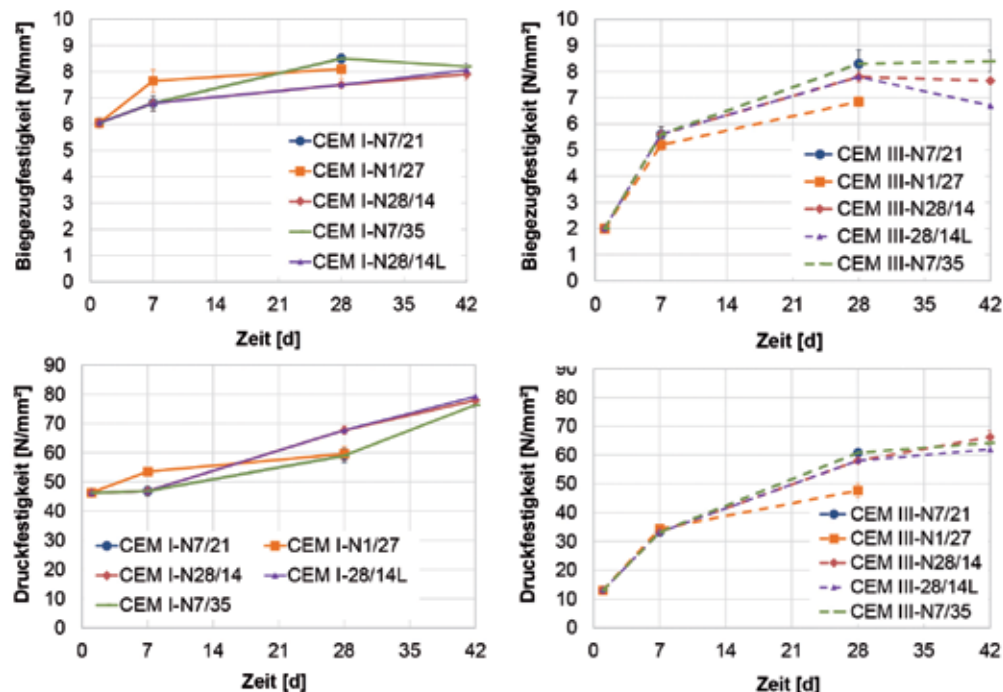
11.2.3 Ergebnisse und Diskussion

11.2.3.1 Einfluss der Nachbehandlung und Vorlagerung auf den Feuchtegehalt der Randzone und die Festigkeit

Der Einfluss der Nachbehandlung auf die Festigkeit war weniger ausgeprägt als erwartet, Abb. 3. So wies die Variation „N1/27“ beim CEM III-Beton nach 28 d die geringsten Biegezug- und Druckfestigkeiten auf. Eine lange Wasserbadlagerung von 28 Tagen führte allerdings nicht, wie erwartet (vgl. auch [15]), zu nennenswert höheren Festigkeitswerten. Beim CEM III-Beton zeigte diese Variante nach 42 d sogar die niedrigsten Festigkeiten. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten sind insgesamt jedoch gering.

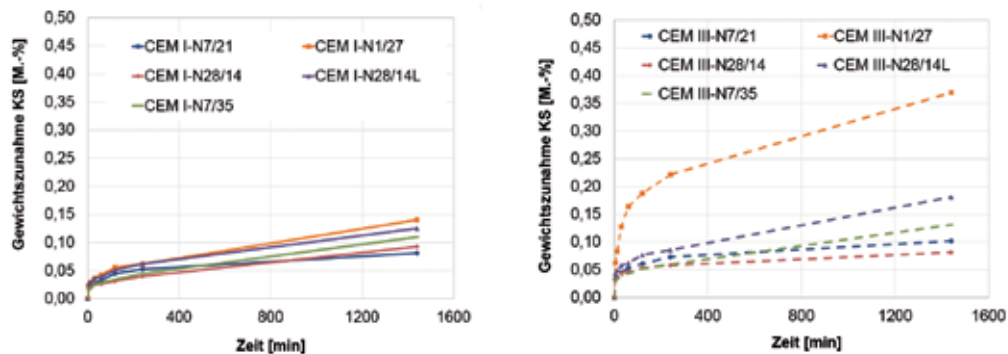
Da die Nachbehandlung vor allem Auswirkungen auf den Randbereich der Betonprobekörper hat, und bei der Biegezugfestigkeit die größten Biegezugspannung in der Randzone auftreten ist, wäre hier ein deutlich stärkerer Unterschied in den einzelnen Varianten zu erwarten gewesen. Eine mögliche Erklärung wäre, dass sich bei den kleinen offenen Pro-

Abbildung 3:
Zeitliche Entwicklung der Biegezug- (oben) und Druckfestigkeit (unten) der verschieden nach- und vorgelagerten Prismen: Links: Beton mit Portlandzement (CEM I), Rechts: Beton mit Hochofenzement (CEM III)



bekörpergeometrien zum einen ein anderes Austrocknungsverhalten einstellt, zum anderen aber auch herstellungsbedingte Verdichtungseffekte überwiegen. Da bei der Prüfung der Druckfestigkeit der gesamte Probekörper analysiert wird, scheint der Versuch nicht dafür geeignet zu sein, die Auswirkungen der Nachbehandlung zu beurteilen. Anders dagegen sieht es mit den Messungen des kapillaren Saugens aus. Bei den Ergebnissen (vgl. Abb. 4) sind beim nachbehandlungsunempfindlichen CEM I-Beton nur geringe Unterschiede erkennbar, während beim CEM III-Beton die Nachbehandlungsvariante N1/27 die höchste kapillare Wasseraufnahme und somit eine hohe Kapillarporosität aufweist. Die Vorlagerung N28/14 weist die geringste Wasseraufnahme auf. Allerdings liegen, abgesehen von der Nachbehandlungsvariante N1/27, alle anderen Vorlagerungen mit einer Massezunahme zwischen 0,05 und 0,15 Masseprozent sehr nah beieinander. So kann anhand dieser Versuche bereits die Nachbehandlungsvariante N1/27 mit etwa dreimal so hohen Werten (Massezunahme von über 0,35 % nach 24 h) als ungeeignet identifiziert werden.

Abbildung 4:
Kapillares Saugen der CEM I-Proben (links) und der CEM III-Proben (rechts) nach der Nach- und Vorbehandlung



Während sich bei allen Lagerungsarten beim CEM I-Beton zudem ein ähnlicher Feuchtegehalt in der Randzone vor Carbonatisierungsbeginn einstellt, zeigt hier die eintägige Nachbehandlung den geringsten Feuchtegehalt im Randbereich (bis 8 mm), vgl. Abb. 5. So wirken sich die unterschiedlichen Nachbehandlungsvarianten hauptsächlich auf die ersten 8 mm aus, während der Feuchtegehalt dahinter bei allen Varianten ähnlich ist. Der Einfluss der Nachbehandlung beim Beton mit Hochofenzement ist deutlich stärker ausgeprägt. Die Auswirkung unterschiedlicher Nachbehandlung ist auch in einer Tiefe von 9,5 mm noch deutlich zu erkennen. Ein Feuchtegradient wurde nicht beobachtet. Die kürzeste Nachbehandlung ist deutlich trockener als die anderen Varianten.

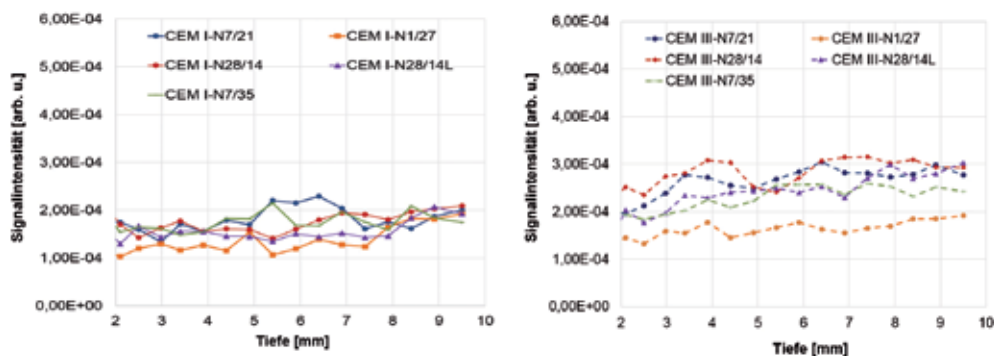


Abbildung 5:
Ergebnisse der NMR-Messungen (die Signalintensität ist direkt proportional zum Gehalt an freiem und physikalisch gebundenem Wasser)

11.2.3.2 Einfluss der Nach- und Vorbehandlung auf das Carbonatisierungsverhalten

Abb. 6 zeigt die mittels Farbindikatortest ermittelten Carbonatisierungstiefen der verschiedenen Betone für die jeweiligen Beaufschlagungsarten.

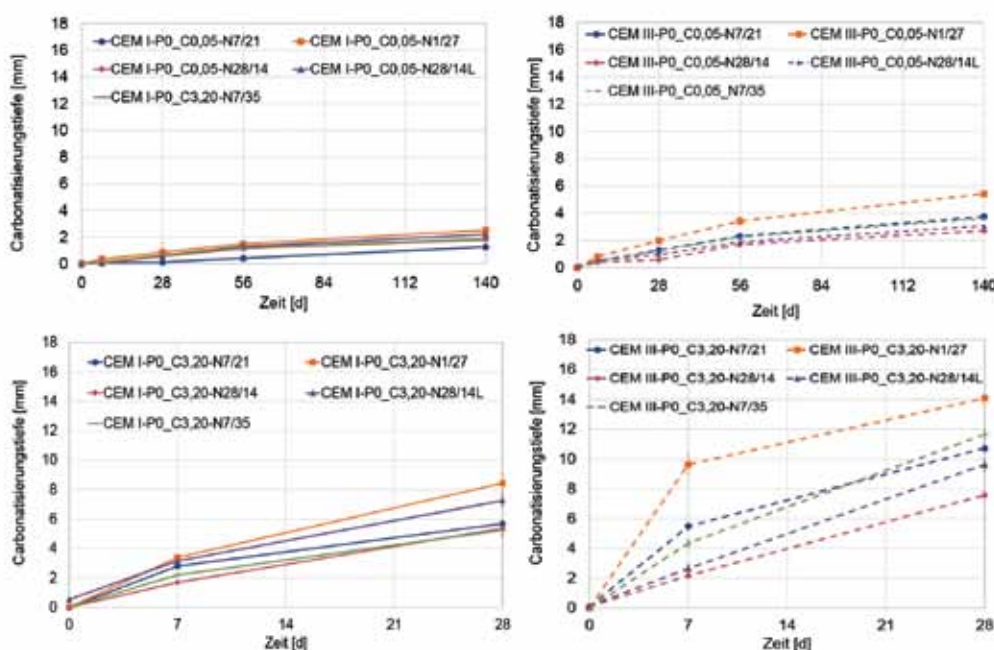
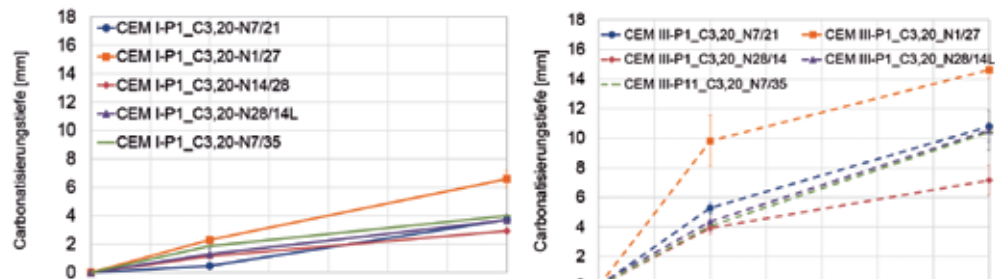


Abbildung 6: Carbonatisierungsverläufe der Betonproben nach verschiedenen Schadgasbeaufschlagungen über verschiedene Zeiträume; links: CEM I-Beton, rechts: CEM III-Beton; oben: natürliche Carbonatisierung über 14, Mitte: beschleunigte Carbonatisierung über einen Zeitraum von 28d; unten (siehe S. 14): beschleunigte Carbonatisierung bei 1 bar Überdruck über einen Zeitraum von 7 d



Bei allen Ergebnissen zeigte die Variante „N1/27“ die höchsten Carbonatisierungstiefen, während der CEM III-Beton bei der natürlichen Carbonatisierung die erwartete Rangfolge der Carbonatisierungsgeschwindigkeiten zeigt ($N1/27 > N7/21 > N7/35 > N28/14L > N28/14$), unterschieden sich hier die Ergebnisse der anderen Varianten. Beim natürlich beaufschlagten CEM I-Beton können die Unterschiede in den verschiedenen Carbonatisierungsgeschwindigkeiten vermutlich auf die geringe gesamte Tiefe und die damit verbundenen Unsicherheiten beim Ablesen zurückzuführen sein. So empfiehlt Greve-Dierfeld [20] die Carbonatisierungsbeaufschlagung mindestens so lange fortzuführen, bis eine Carbonatisierungstiefe von 3 mm erreicht ist, um überhaupt aussagefähige Ergebnisse zu erzielen. Dies wurde unabhängig von der gewählten Nachbehandlungsvariante nach 140 d nicht erreicht.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit der erhöhten CO_2 Konzentration von 3,2 Vol.-% wesentlich höhere Carbonatisierungswerte erreicht werden können, als bei den Versuchen mit natürlichen Konzentrationen. Bei der natürlichen Carbonatisierung wurden bei der Nachbehandlung N1/27 nach 28 Tagen nur Werte von ca. 0,8 mm erreicht. Bei erhöhter Konzentration ist der Wert mit 8 mm um das 10-fache gestiegen. Bei der Nachbehandlung N7/21 betrug der Wert nach 28 Tagen bei der natürlichen Carbonatisierung etwa 0,5 mm bei der beschleunigten Prüfung sind es ca. 5 mm. Auch hier findet sich wieder eine Steigerung um das 10-fache. Die starke Beschleunigung der Carbonatisierungsgeschwindigkeit durch erhöhte Konzentrationen scheint also unabhängig von der gewählten Nachbehandlungsdauer zu sein. Vergleicht man die gewonnenen Ergebnisse mit Werten aus der Literatur zeigen sich bei den erreichten Carbonatisierungstiefen sehr ähnliche Werte wie bei Hunkeler et al. [11]. Auffallend bei der beschleunigten Carbonatisierung des CEM I-Betons ist allerdings die Nachbehandlung N28/14L, die nach Ende der Wasserlagerung bei natürlichen Carbonatisierungsbedingungen von rund 0,05 Vol.-% vorcarbonatisiert wurde. Bei der Vorcarbonatisierung wurde ein Wert von ca. 0,4 mm erreicht. Gemäß der Literatur [7, 11] führt diese Vorcarbonatisierung eigentlich zu einer Reduktion der beschleunigten Carbonatisierung, da sich in der Vorlagerung durch die Carbonatisierung bereits das Porengefüge verdichtet und so später weniger CO_2 eindringen kann. Somit sollte die Nachbehandlung N28/14L also unter der Nachbehandlungsvariante N28/14 liegen. Dies ist beim CEM I-Beton eindeutig nicht der Fall. Nach 28 Tagen liegt diese Nachbehandlung mit ca. 7 mm etwas unter der kürzesten Nachbehandlung N1/27, aber noch über allen anderen Nachbehandlungsvarianten. Gründe für dieses ungewöhnliche Carbonatisierungsverhalten sind schwer zu finden, insbesondere da die Ergebnisse der anderen Prüfungen den Erwartungen entsprechen und nicht zu den erzielten Carbonatisierungstiefen passen. Die Erhöhung der Gaskonzentration ist damit zwar grundsätzlich sehr gut geeignet, um in möglichst kurzer Zeit unabhängig von der gewählten Betonsorte große Carbonatisierungstiefen hervorzurufen und so die Prüfdauer erheblich zu verkürzen. Durch die beschleunigte Diffusion kommt es allerdings auch zu einer beschleunigten Calcitbildung und somit zu einem beschleunigten Zuwachsen der Kapillarporenräume. Als Folge kann die Calcitbildung auch an anderen Stellen auftreten, als

unter natürlichen Bedingungen, vgl. [4]. Auch die Berichtigung der Ergebnisse mit Hilfe von einem Korrekturfaktor würde alle Betonsorten gleich behandeln, und somit die Auswirkung verschiedener Bindekapazitäten nicht berücksichtigen.

Bei der Carbonatisierung unter Druck wurden bereits bei 1 bar Überdruck nach 7 d beim CEM I-Beton Carbonatisierungstiefen von 3,0 – 6,6 mm erzielt. Mit Ausnahme der Variante N7/21, die unter natürlichen Bedingungen sehr niedrige Ergebnisse aufweist, wird auch das Verhalten unter natürlicher Carbonatisierung gut widerspiegelt. Auch die Nachbehandlungsempfindlichkeit des CEM III-Betons ist gut zu erkennen. Aufgrund der im Druckbehälter manuellen und damit nicht konstanten Einstellung von Temperatur, Luftfeuchte und Gaskonzentration, kam es möglicherweise zu den vergleichsweise hohen Streuungen in den Carbonatisierungstiefen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass eine Wasserbadlagerung von nur einem Tag zu kurz ist, um die Leistungsfähigkeiten von Betonen bzgl. ihres Carbonatisierungsverhaltens abzuschätzen. Eine 28-tägige Wasserlagerung führte in der Regel zwar zu einer Minderung der Carbonatisierungstiefen im Vergleich zu einer 7-tägigen Wasserlagerung, diese Minderung war aber z.T. nur sehr gering und bei den verschiedenen Varianten auch unterschiedlich stark ausgebildet. Bei der beschleunigten Beaufschlagung P0_C3,20 findet sich beim CEM I-Beton z.B. nur eine Verbesserung um 10 %, beim CEM III-Beton zeigt sich hingegen eine Verbesserung um etwa 30 %. Interessant bei den Ergebnissen ist auch die Tatsache, dass sich die Vorcarbonatisierung bei der Vorlagerung N28/14L nicht positiv auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit auswirkt. Die erreichten Tiefen sind hier höher als bei der Nachbehandlungsvariante N28/14. Es stellt sich also die Frage, inwieweit eine Vervierfachung der Nachbehandlungsdauer gerechtfertigt ist, um eine nur maximal 30 %ige Optimierung zu erzielen, die den Carbonatisierungswiderstand nachbehandlungsempfindlicher Betone möglicherweise überschätzt (siehe hierzu auch [8]). Auch bei realen Bauwerken ist der Carbonatisierungswiderstand bei der Verwendung nachbehandlungsempfindlicherer Betone geringer. Möglicherweise findet sich das ideale Verhältnis zwischen Nachbehandlungsdauer und erzielter Reduzierung der Carbonatisierungsgeschwindigkeit auch genau zwischen 7 und 28 Tagen.

11.2.4 Fazit und Ausblick

Erwartungsgemäß steigerte eine kurze Nachbehandlung von einem Tag den Carbonatisierungsfortschritt. Dieses Verhalten war bei der natürlichen und der beschleunigten Carbonatisierung unter Druck geringfügig stärker ausgeprägt als bei der Variante P0-3,20. Wider Erwarten zeigte eine verlängerte Nachbehandlung von 7 auf 28 d nur dann einen nennenswert geringeren Carbonatisierungsfortschritt, wenn die Lagerung bis zum Carbonatisierungsbeginn in CO₂-freier Atmosphäre erfolgte. Zudem besteht die Gefahr, dass der nachbehandlungsempfindliche Beton mit CEM III durch eine lange Nachbehandlung bei der beschleunigten Carbonatisierung besser bewertet wird, als dies die natürliche Carbonatisierung zeigt. Aufgrund dieser Ergebnisse scheint eine Verlängerung der Nachbehandlungsdauer von 7 auf 28 d nicht sinnvoll.

Grundsätzlich ist nicht auszuschließen, dass diese Empfehlung durch die Durchführung weiterer Versuche noch weiter optimiert werden kann. Beispielsweise durch Vorlagerungsversuche mit einer 14 tägigen Wasserbadlagerung.

Außerdem könnte durch Beaufschlagung mit zusätzlichem Druck die Prüfdauer nach Carbonatisierungsbeginn erheblich reduziert werden. Ein effizientes und praxisnahes Laborverfahren könnte somit das Schnellprüfverfahren sein, welches mit erhöhten CO₂ Konzentrationen und Überdruck die natürliche Carbonatisierung simuliert.

Literatur

- [1] <https://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/b-produktionsdaten/>, aufgerufen am 30.05.2017.
- [2] Dressler A.: Einfluss von Tausalz und puzzolanischen, aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton, Dissertation, Technische Universität München, 2013
- [3] Gehlen, C.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken, Dissertation, RWTH Aachen, 2000
- [4] Lagerblad, B.: Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art. Swedish Cement and Concrete Institute, CBI Report 2:2005
- [5] Bier, T.: Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton. Dissertation, Karlsruhe: Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, 1988
- [6] Glasser, F.P.; Matschei, T.: Interactions between portland cement and carbon dioxide, in: 12th International Congress on the Chemistry of Cement, Montreal, 2007
- [7] Stark, J., & Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton. Berlin: Springer-Verlag, 2013
- [8] Hainer S.: Karbonatisierungsverhalten von Betonen unter Einbeziehung klinkerreduzierter Zusammensetzungen, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2015
- [9] prCEN/TS 12390-XX:2017(E): Testing Hardened concrete - Part XX: Determination of the carbonation of concrete: Accelerated carbonation method (Draft 4, May 2016). TG5 Members, 2017
- [10] Gehlen, C.; Thiel, C.: Schnellprüfverfahren zur Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes. 59. Betontage, 2015
- [11] Hunkeler, F., Lammar, L.: Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen. 2012, Wildeg: TFB AG - Technik und Forschung im Betonbau
- [12] 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, 217-222
- [13] Young, J.F.; Berger, R.L.; Breese, J.: Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂ J. Am. Ceram. Soc., 5, 1974 394-397
- [14] Gräf, H.; Grube, H.: Einfluß der Zusammensetzung und der Nachbehandlung des Betons auf seine Gasdurchlässigkeit, Beton, 36, 1986, 426-429 und 473-476
- [15] Hainer, S., Proske, T., & Graubner, C.-A.: Einfluss der Nachbehandlung auf das Karbonatisierungsverhalten von Betonen aus klinkerarmen Zementen, Beton- und Stahlbetonbau 110, 2015, 41-49
- [16] Storch, T.: Dauerhaftigkeit als Wechselbeziehung zwischen Betondeckung, Wasser-Zement-Wert und Nachbehandlungsdauer. In: Spannweite der Gedanken – Festschrift zum 60. Geburtstag von Professor Dr.-Ing. Manfred Specht, Berlin: Springer-Verlag 1998.
- [17] DIN EN 196-1:2005-05: Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Berlin, Beuth Verlag, 2005
- [18] DIN EN 14630:2007-01: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Bestimmung der Karbonatisierungstiefe im Festbeton mit der Phenolphthalein-Prüfung. Berlin: Beuth Verlag., Berlin, Beuth Verlag, 2007
- [19] DIN EN 13057:2002-09: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme, Berlin, Beuth Verlag, 2002
- [20] Greve-Dierfeld v., S.: Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonbauteile, Dissertation, Technische Universität München, 2015

11.3. Monitoring von Bewehrungskorrosion in Rissbereichen von Stahlbetonbauwerken

F. Hiemer¹, F. Wich², C. Gehlen^{1,2}, S. Keßler¹, T. Mayer²

Befahrene Betonoberflächen von Parkbauten unterliegen infolge des Tausalzeintrages einer besonderen Gefährdung hinsichtlich Bewehrungskorrosion. Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit besteht nach [1] die Möglichkeit, die Betonoberfläche nach Rissbildung zeitnah mit einem rissüberbrückenden Oberflächenschutzsystem zu verschließen, auch wenn die Risse bereits einer kurzzeitigen Chloridexposition unterlagen. Zur Überprüfung, ob mit dieser Regelung womöglich ein Korrosionsrisiko für die risskreuzende Bewehrung besteht, und falls ja, ob einmal ausgelöste Korrosion nach der Oberflächenbeschichtung u. U. fortläuft, wurden zwei Bauwerke mit einem Korrosionsmonitoring ausgestattet, dessen Aufbau die Erfassung wesentlicher Korrosionskenngrößen ermöglicht und damit der Korrosionszustand vor und nach der Beschichtung beurteilt werden kann [2].

11.3.1 Motivation

Reichen z. B. lastinduzierte Risse im Beton bis zur Bewehrungslage, können Schadstoffe, wie z. B. Chloride, nahezu ungehindert bis zum Stahl vordringen [3, 4, 5]. Bei ausreichend hoher Chloridkonzentration auf Höhe des Bewehrungsstahls wird dessen schützende Passivschicht zerstört, wodurch dieser nicht mehr vor Korrosion geschützt ist.

Um der Korrosionsgefahr bei besonders gefährdeten Stahlbetonbauten entgegenzuwirken, werden in dem 2010 vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein e.V. herausgegebenen Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ [1] verschiedene Entwurfsgrundsätze zur Erstellung dauerhafter Parkbauten dargestellt. In [1] wird als ein mögliches Konzept empfohlen, die Oberfläche erst nach jahreszeitlichen Temperaturwechseln und abgeschlossener Rissbildung mit einem rissüberbrückenden Oberflächenschutzsystem (OS) zu beschichten bzw. später auftretende Risse zeitnah zu verschließen, um weiteren Chlorid- und Feuchteeintrag zu verhindern und den elektrischen Widerstand des Betons zu erhöhen. Dieser Vorgehensweise liegt die Annahme zugrunde, dass bei kurzen Chlorideindringzeiten von maximal einer Wintersaison nicht mit standsicherheitsrelevanten Korrosionsschäden an der Bewehrung zu rechnen ist.

Um nähere Erkenntnisse darüber zu erlangen, ob der Eintrag von Tausalzen in nur einer Winterperiode als tolerierbar angesehen werden kann und ob ein dadurch bereits begonnener Korrosionsprozess durch eine nachträglich aufgebrachte Beschichtung zum Erliegen kommen kann, wurde am Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München (cbm) das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Forschungsvorhaben „Korrosionsverhalten von Stahl in Beton bei Anwendung des Instandsetzungsprinzips W-CI bei gerissenem chloridbelasteten Beton“ bearbeitet, [6]. Dabei wurde festgestellt, dass bei Anwendung der Regelung aus [1] an Laborprobekörpern mit Biegerissen die risskreuzende Bewehrung zwar kurzzeitig depassiviert werden konnte, die nachfolgende Beschichtung jedoch eine wirksame Maßnahme darstellte, um eine einmal durch Chloride initiierte Korrosion an der risskreuzenden Bewehrung wieder zu deaktivieren [6].

In einem vom DAfStb geförderten Forschungsvorhaben wurde durch Untersuchungen an realen Bauwerken mit gerissener Betonoberfläche die Grundlagenuntersuchungen aus dem Labor durch Messungen unter praxisnahen und vergleichbaren Bedingungen ergänzt.

Dafür wurde ein nachträglich installierbares Monitoringsystem für Bewehrungskorrosion entwickelt, mit dem dieselben elektrochemischen Korrosionsparameter erfasst werden konnten wie im Labor. Nachfolgend werden die Grundlagen des Korrosionsmonitoringsystems sowie erste Ergebnisse aus den Bauwerksuntersuchungen dargestellt, [7].

11.3.2 Chloridinduzierte Korrosion in Rissbereichen beschichteter Betonbauteile

Kommt es infolge des beschleunigten Chloridtransports im Riss zur Depassivierung des im Rissbereich liegenden Teil des Betonstahls, führt dies zur Entstehung eines Makrokorrosionselements [8]. An den depassivierten Stahloberflächen im Rissbereich und zum Teil in den Rissflanken geht das Eisen infolge der anodischen Reaktion in Lösung und Elektronen werden freigesetzt. Diese gelangen über den Stahl zu den umliegenden kathodisch wirksamen Bereichen, in denen durch Sauerstoffreduktion Hydroxidionen gebildet werden. Durch die elektrolytische Leitfähigkeit des Betons gelangen die Ionen zur Anode und der Korrosionskreislauf wird geschlossen.

Zur Beschreibung des Korrosionsprozesses kann das folgende Korrosionsmodell als elektrisches Ersatzsystem herangezogen werden [9, 10]:

$$I_{\text{korr}} = I_{\text{makro}} + I_{\text{mikro}} = \frac{\Delta E}{R_{p,A} + R_{p,K} + R_e} + I_{\text{mikro}}$$

I_{korr} :	gesamter Korrosionsstrom	[A]
I_{makro} :	Makroelementstrom	[A]
I_{mikro} :	Mikroelementstrom	[A]
ΔE :	Treibspannung	[V]
$R_{p,A}$:	anodischer Polarisationswiderstand	[Ω]
$R_{p,K}$:	kathodische Polarisationswiderstand	[Ω]
R_e :	elektr. Widerstand des Betons	[Ω]

Der Gesamtkorrosionsstrom setzt sich aus einem Anteil aus Makro- und Mikroelementkorrosion zusammen. Letzterer ist elektrochemisch nicht messbar, da hier anodische und kathodische Teilprozesse örtlich nicht trennbar voneinander ablaufen und der resultierende Strom nicht erfasst werden kann. Die Treibspannung des Makroelementstroms ergibt sich aus der Differenz der freien Korrosionspotentiale von Makrozellanode und –kathode. Die Polarisationswiderstände resultieren aus der Hemmung der elektrochemischen Prozesse an Anode und Kathode, z.B. infolge des Durchtrittswiderstands an der Phasengrenze Stahl/Elektrolyt. Im Beton tritt zudem ein Spannungsabfall auf, der auf dessen elektrischen Widerstand zurückzuführen ist.

In Laboruntersuchungen können diese genannten elektrochemischen Parameter der Makroelementkorrosion gemessen und damit zur Bewertung der zeitlichen Veränderung eines Korrosionsprozesses herangezogen werden, wenn sichergestellt wird, dass der anodische und kathodische Teilprozess örtlich getrennt voneinander stattfinden. Dies wurde genutzt, um das Korrosionsverhalten der Bewehrung in gerissenem, chloridbelasteten Beton nach Aufbringen einer Betonbeschichtung zu untersuchen [6]. Die Korrosionsparameter wurden an balkenförmigen Stahlbetonprobekörpern gemessen, die mit Biegerissen versehen, für 12 Wochen (ca. eine Wintersaison) mit Chloriden beaufschlagt und anschließend beschichtet wurden. In der Risszone wurde als Anode ein Betonstabstahl eingebaut, zwei Kathodenkörbe wurden außerhalb des Rissbereichs installiert, um deren Depassivierung auszuschließen.

Nach Abschluss der Messungen wurden aus dem Rissbereich tiefengestaffelte Chloridprofile entnommen und die Anodenbereiche visuell untersucht.

Dabei wurde festgestellt, dass bei Biegerissen an Laborprobekörpern, die für eine Winterperiode für Chlorid offen zugänglich waren, die in [1] empfohlene Beschichtungsmaßnahme eine wirksame Maßnahme darstellt, um eine einmal initiierte Korrosion an der risskreuzenden Bewehrung wieder zu deaktivieren. Vereinzelt wurden Lochfraßnarben mit einer maximalen Tiefe von 2 mm festgestellt, im Mittel waren die Korrosionsabträge jedoch deutlich geringer, sodass die Querschnittsverluste als nicht standsicherheitsrelevant einzuschätzen waren. Es wurde jedoch gezeigt, dass unter den korrosionstechnisch äußerst ungünstigen Laborbedingungen hinsichtlich Temperatur und Luftfeuchte (20 °C / 85% r. F.), die Zunahme des Elektrolytwiderstands nicht für die Deaktivierung des Korrosionsprozesses verantwortlich war. Bei den Laborproben erwies sich der anodische Polarisationswiderstand stets als dominierender Systemwiderstand, der durch den mangelnden Nachschub an Chloriden, deren nachträgliche Umverteilung im Beton und/oder durch die bei aktiver Korrosion entstandene Deckschicht für das Erliegen der Korrosionsaktivität verantwortlich war [6].

11.3.3 Korrosionsmonitoring

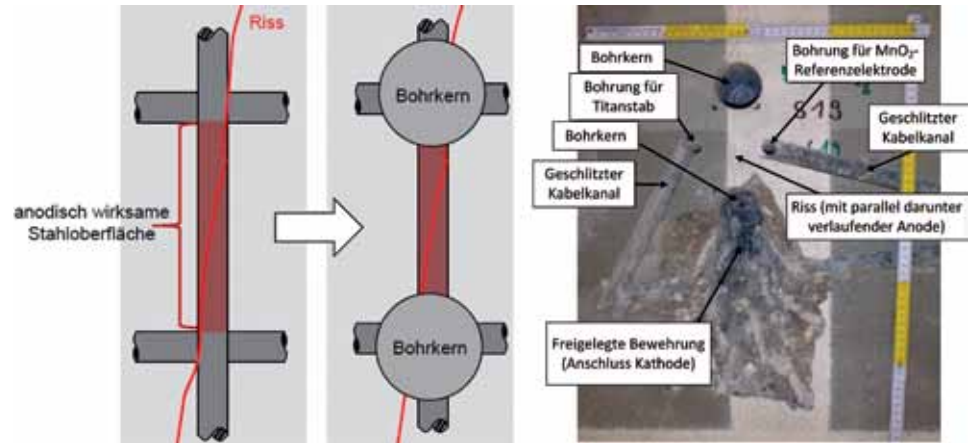
Anhand von Messungen an realen Bauwerken mit gerissener Stahlbetonoberfläche wurden die Grundlagenuntersuchungen aus dem Labor ergänzt und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit überprüft. Zu diesem Zweck wurde an zwei Parkbauwerken im Münchener Raum mit vergleichbarer Sensorik, die auch in den Laboruntersuchungen verwendet wurde, die Beeinflussung des Makroelementkorrosionsvorgangs im Rissbereich infolge der Aufbringung des OS bestimmt. Dafür wurde der Korrosionszustand der Bewehrung zunächst ohne Beschichtung und anschließend über einen längeren Zeitraum nach Applikation eines rissüberbrückenden OS erfasst.

11.3.3.1 Aufbau und Installation des Monitoringsystems

Für das Korrosionsmonitoring in Rissbereichen von Bestandsbauwerken bieten sich Messungen an der vorhandenen Bewehrung in den Rissbereichen des Bauwerks an [2]. Damit wird sichergestellt, dass sich das Anodenmaterial und die Einbettung der Monitoringsensoren nicht vom übrigen Bauwerk unterscheiden. Weiterhin entspricht die Exposition des Monitorings somit der tatsächlichen Bauwerksexposition. Allerdings besteht hierbei die Herausforderung, anodische Bewehrungsbereiche im Riss von den kathodischen Bereichen außerhalb des Risses zu trennen, ohne das Korrosionssystem zu stark zu beeinflussen.

In einem ersten Schritt wurden geeignete Monitoringpositionen anhand von Potentialfeldmessungen, Betondeckungsmessungen, Chloridgehaltsbestimmungen und Sondierungsöffnungen identifiziert. Ausschlaggebend ist dabei auch der Rissverlauf, der durch eine detaillierte augenscheinliche Untersuchung der Betonoberfläche festgestellt werden muss. Dabei wurden sowohl Bereiche mit hoher Korrosionsgefährdung als auch unauffällige Referenzbereiche ausgewählt. Nach Auswahl der Monitoringpositionen wurde der Bewehrungsverlauf im Rissbereich zerstörungsfrei bestimmt und der rissberührende, korrodierende Bereich der Bewehrung durch kleinformatige Kernbohrungen in den Kreuzungspunkten von der übrigen Bewehrung getrennt, um eine elektrische Isolation des anodischen Bereichs zu erzielen (vgl. Bild 1 links). Das isolierte Bewehrungselement wurde mit einem Kabelanschluss versehen und diente im Weiteren als Anode im Korrosionselement. Die übrige Bewehrung wurde weiterhin als Kathode verwendet und ebenfalls mit

Bild 1:
Schematischer Aufbau und
Installation eines Korrosions-
sensors im Rissbereich [7]



einem Kabelanschluss ausgestattet. In unmittelbarer Nähe zur Anode wurde außerdem eine Mangandioxid-Referenzelektrode (MnO_2) sowie ein Titanstab als Gegenelektrode eingebracht (vgl. Bild 1, rechts).

Durch die Verwendung der bauwerkseigenen Bewehrung als Sensorsystem kommt es herstellungsbedingt zu Variationen im Aufbau der Messzellen (z.B. Anodenlänge). Dadurch ist ein Vergleich der absoluten Werte z.B. der Systemwiderstände zwischen den einzelnen Sensorstellen nicht möglich.

11.3.3.2 Messdurchführung

Um die Korrosionsbedingungen an der Bewehrung möglichst realitätsnah abzubilden, wurden Anode und Bewehrungskorb jeweils zwischen den Messungen kurzgeschlossen. An den installierten Korrosionssensoren wurden in regelmäßigen Zeitabständen die nachfolgenden elektrochemischen Korrosionskenngrößen in einem gleichbleibenden Messprogramm erfasst. Dieses bestand aus fünf verschiedenen Messungen, die in nachfolgend beschriebener Reihenfolge durchgeführt wurden, um eine gegenseitige Beeinflussung zu verhindern:

Der Makroelementstrom (I_{makro}) wurde am kurzgeschlossenen System gemessen. Er stellt den wichtigsten Parameter zur Beurteilung des Korrosionszustands dar, da er nach dem Faraday'schen Gesetz direkt mit dem Massenabtrag am Stahl korreliert. Dabei muss berücksichtigt werden, dass aus dem Makroelementstrom alleine, ohne Kenntnis der tatsächlichen Anodenfläche, eine Aussage zur Korrosionsrate bzw. des Querschnittsverlusts nicht möglich ist. Jedoch kann die Entwicklung der Korrosionsaktivität anhand des Verlaufs des Makroelementstroms qualitativ beurteilt werden. Im Anschluss an die Elementstrommessung wurde das Korrosionspotential des Makroelements gegen die MnO_2 -Bezugselektrode bestimmt.

Nachdem der Kurzschluss anschließend aufgehoben wurde, nähern sich die Potentiale der Elektroden sehr langsam ihren freien Korrosionspotentialen (Anode: OCP_A ; Kathode: OCP_K). Da die endgültigen freien Korrosionspotentiale jedoch erst nach mehreren Stunden oder Tagen erreicht werden, wurde festgelegt, stets eine Wartedauer von einer Stunde nach Aufheben des Kurzschlusses einzuhalten. Vergleichsmessungen bestätigten, dass sich das Potential unter den hier vorherrschenden Randbedingungen bei längerer Wartedauer nicht mehr signifikant ($< 5 \text{ mV}$) im Vergleich zum Potentialwert nach einer Stunde verändert. Aus der Differenz zwischen OCP_K und OCP_A ergibt sich die Treibspannung des Korrosionssystems.

Für die Messung der anodischen und kathodischen Polarisationswiderstände ($R_{p,A}$ und $R_{p,K}$) wurde ein Drei-Elektroden-Aufbau verwendet, für die der Titanstab als Gegenelektrode diente. Die Messung wurde potentiodynamisch mit einer Scanrate von 0,125 mV/s durchgeführt. Ausgehend von einem Potential um 20 mV unter dem OCP der Arbeitselektrode bis zu 20 mV über dem OCP wurde alle 2 Sekunden ein Datenpunkt erfasst. Zur Auswertung wurde der lineare Polarisationswiderstand im Bereich des OCP berechnet. Beide Widerstände können sich maßgeblich auf die Korrosionsaktivität auswirken und müssen daher zur Beurteilung der Wirkungsweise einer Oberflächenbeschichtung herangezogen werden [11].

Abschließend wurde der Elektrolytwiderstand zwischen Anode und Kathode (R_e) mittels Wechselstrom in einer Zwei-Elektroden-Messung gemessen [12]. Gegenüber einer Gleichstromwiderstandsmessung können dabei Einflüsse aus der Kapazität der Grenzschicht Stahl/Beton vernachlässigt werden. Die Amplitude der Messbrücke wurde mit 50 mV so niedrig wie möglich angesetzt, um eine Polarisation des Systems weitgehend zu minimieren.

An jedem Messtermin wurde ebenfalls die Lufttemperatur erfasst. Da die Systemwiderstände einer ausgeprägten Temperaturbeeinflussung unterliegen, war es nötig, die Widerstände mit dem Arrheniusansatz zu kompensieren. Durch einen Vergleich von gemessenen und kompensierten Systemwiderständen konnten einerseits die Gründe für Veränderungen der Widerstände näher eingegrenzt werden und andererseits deren tatsächliche Entwicklung, unabhängig von der aktuellen Temperatur, abgebildet werden. $R_{p,a}$ und $R_{e,l}$ wiesen eine starke, $R_{p,k}$ nur eine geringere Temperaturabhängigkeit auf, was mit Erkenntnissen der Literatur übereinstimmt [13].

11.3.4 Bauwerksuntersuchungen

11.3.4.1 Bauwerk 1 (BW 1)

Bei BW 1 handelt es sich um ein mehrstöckiges Parkhaus mit rd. 10.000 Parkplätzen, von denen nur ein kleiner Teil ständig genutzt wird. Die Zwischendecken sind als Durchlaufsystem mit teilweiser Vorspannung ausgeführt und hauptsächlich punktförmig auf Stützen gelagert. Lastbedingt ergibt sich daraus oberseitig eine planmäßige Rissbildung in den Stützbereichen.

Die Oberflächenbereiche, in denen eine lastbedingte Rissbildung erwartet wurde, wurden mit einem rissüberbrückenden OS vor Chlorideintrag geschützt, in den übrigen Bereichen wurde auf ein OS verzichtet. Zur Sicherstellung der Lebensdauer in den ungeschützten Bereichen wurde eine Betonrezeptur mit erhöhtem Chlorideindringwiderstand verwendet und die Dauerhaftigkeit gegenüber chloridinduzierter Korrosion im Rahmen einer vollprobabilistischen Lebensdauerbemessung nachgewiesen, vgl. hierzu auch [7].

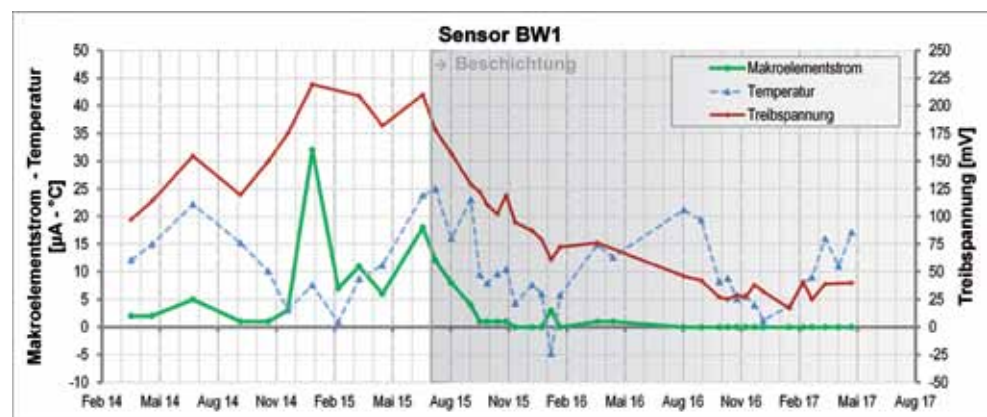
Bei Routineuntersuchungen wurden Risse mit 0,05 mm bis 0,3 mm Breite an den Oberseiten der Zwischendecken im Bereich der Momentenumlagerung der Stützen festgestellt, die über die erwarteten Risse und damit den beschichteten Bereich hinausgehen. Die nachfolgende Beprobung der Risse ergab Chloridkonzentrationen, bei denen eine chloridinduzierte Bewehrungskorrosion nicht mehr ausgeschlossen werden kann ($> 1 \text{ M.-%/z}$).

Zur Reduzierung des Eingriffes in die Bausubstanz wurde von einer herkömmlichen Instandsetzung mit Entfernen des chloridhaltigen Betons abgesehen. Stattdessen wur-

den an 22 Stellen Korrosionssensoren installiert und anschließend die Parkdeckoberseite vollflächig mit einem rissüberbrückenden OS versehen. Die Messung erfolgte bisher über einen Zeitraum von rund 39 Monaten. Mit den Untersuchungen wurde bereits vor den Beschichtungsarbeiten begonnen, um den Zustand vor Beschichtung erfassen zu können. Die Messungen zeigten bisher an den meisten Sensoren einen deutlichen Rückgang der Korrosionsaktivität. Nachfolgend werden deshalb die Ergebnisse eines dafür repräsentativen Sensors aus BW 1 dargestellt.

Sensor BW 1 zeigte zu Beginn der Aufzeichnung einen geringen Korrosionsstrom, vgl. Bild 2. Die Werte pendelten zu Beginn der Untersuchungen zwischen 1 und 5 μA . Die Treibspannung lag im betrachteten Zeitraum bei Werten um 125 mV.

Bild 2:
Makroelementstrom, Treibspannung und Temperatur des Sensors BW 1



Im Winter 2014/15 zeigte sich anschließend ein starker Anstieg des Makroelementstroms auf 32 μA in Verbindung mit einem Anstieg der Treibspannung auf rd. 225 mV. Dieser starke Zuwachs deutete auf eine rasche Korrosionsinitiation infolge eines Tausalzeintrags zur Anode hin. Schon einen Messtermin später war der Korrosionsstrom wieder abgesunken, was durch eine Hemmung des Korrosionsprozesses durch die entstehende Eisenoxidschicht entstanden sein könnte. Dies wird durch den in Bild 3 gleichzeitig angestiegenen anodischen Polarisationswiderstand bestätigt. Anschließend pendelte sich das System bei Strömen von 6 bis 11 μA ein und unterlag somit einer noch aktiven Korrosion. Kurz vor der Beschichtungsmaßnahme stieg der Korrosionsstrom auf 18 μA an. Da dies im Sommermonat Juli geschah, ist nicht von einer Tausalzbelastung auszugehen, sondern vielmehr waren die steigenden Temperaturen dafür verantwortlich.

Nach der Beschichtungsmaßnahme war ein deutlicher Rückgang des Elementstroms, verbunden mit einem Abfall der Treibspannung festzustellen. Der Elementstrom fällt auf 0 μA ab. Im Januar 2016 zeichnete sich kurzzeitig ein leichter Korrosionsstrom von 3 μA ab, welcher einer erneuten Chloridumverteilung zuzuordnen sein könnte. Der fortwährende Anstieg beider Systemwiderstände $R_{p,A}$ und R_e führte dennoch langfristig betrachtet zum Erliegen der Makroelementaktivität im betrachteten Zeitraum (vgl. Bild 3).

Aus Bild 3 ist zudem erkenntlich, dass $R_{p,A}$ und R_e einen maßgeblichen Einfluss auf die Korrosionsinitiation hatten. Zum Zeitpunkt des vermeintlichen Tausalzeintrags sanken beide Widerstände stark ab. Beide Widerstände, vornehmlich jedoch $R_{p,A}$ zeigten bis zum Beschichtungseinbau Schwankungen, welche größtenteils temperaturbedingt waren. Im Anschluss stiegen beide Widerstände an, während die Temperatur sank. Bereinigt man

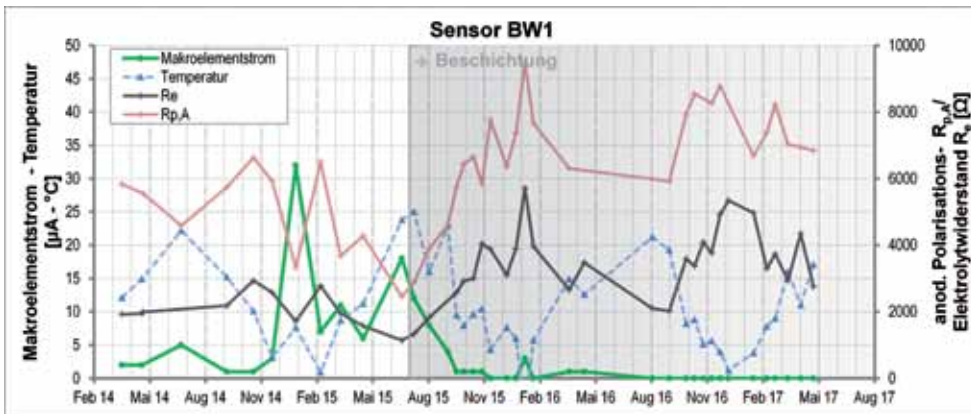


Bild 3:
Überlagerung von $R_{p,A}$ mit R_e ,
der Temperatur und I_{makro} des
Sensors BW 1

die Widerstandsdaten hinsichtlich der Temperatur (vgl. Bild 4), zeigt sich ein klarer Anstieg von $R_{p,A}$, wohingegen R_e nur sehr langsam anstieg. Wie bereits erwähnt, sank in dieser Zeit auch die Treibspannung, was maßgeblich durch die Erhöhung des freien Korrosionspotentials der Anode bewirkt wurde. Daher kann von einer Korrosion unter anodischer Kontrolle ausgegangen werden.

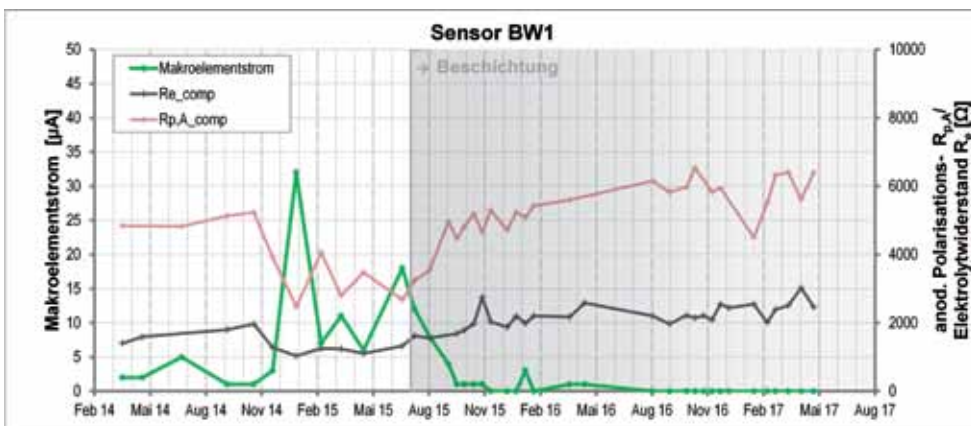


Bild 4:
Temperaturbereinigter $R_{p,A}$
und R_e überlagert mit I_{makro} des
Sensors BW 1

11.3.4.2 Bauwerk 2 (BW 2)

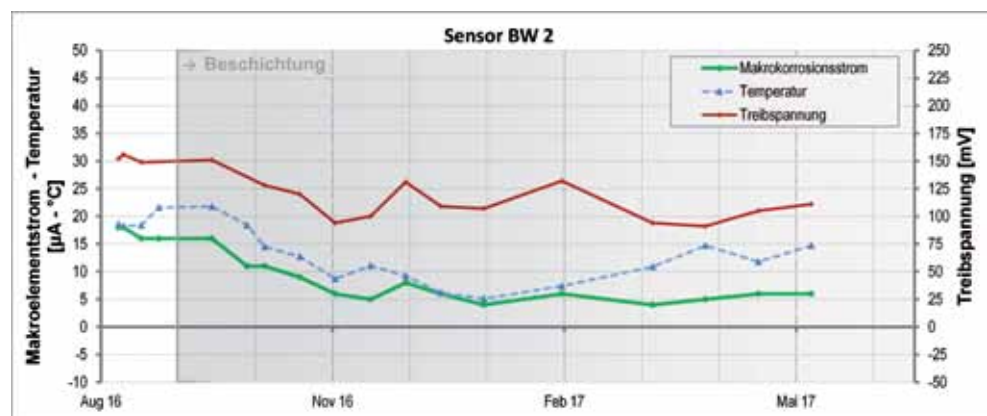
BW 2 ist eine eingeschossige Tiefgarage, die in zwei Bauabschnitten in den Jahren 1998 und 2000 errichtet wurde. Die Bodenplatte selbst ist nichttragend, da es im Hochwasserfall jedoch zu anstehendem Grundwasser kommen kann, wurde die Bodenplatte als Bestandteil der WU-Konstruktion ausgeführt. Zum Schutz vor Chlorideintrag wurde die Oberseite der Bodenplatte damals lediglich mit einer starren Versiegelung versehen.

Nach einer Nutzung von rd. 15 Jahren wurde bei Bauwerksuntersuchungen festgestellt, dass die Bodenplatte in der gesamten Fläche eine ausgeprägte Rissbildung aufwies. Eine Beprobung der Risse ergab teilweise sehr stark erhöhte Chloridgehalte. Auf Bewehrungshöhe wurden Chloridkonzentrationen von bis zu 0,90 M.-%/z festgestellt. Die Versiegelung war bereichsweise abgefahren, sodass auch in den ungerissenen Bereichen Chloride eindringen konnten. Hier wurden jedoch auf Höhe der Bewehrungslage in der Regel Chloridkonzentrationen festgestellt, die als unkritisch betrachtet werden können.

Verschiedene Instandsetzungsvarianten wurden zunächst in Betracht gezogen. Aufgrund der sehr hohen Kosten und der langfristigen Nutzungseinschränkung sollte eine konventionelle Instandsetzung mit Austausch des chloridbelasteten Betons und OS vermieden werden. Da die Bewehrung der Bodenplatte eine statisch untergeordnete Rolle einnimmt und bisher kaum relevante Querschnittsverluste aufwies, wurde entschieden, die Instandsetzungsmaßnahme auf eine Erneuerung des OS zu beschränken. Zur Überwachung des Korrosionsverhaltens nach dem Aufbringen der Beschichtung wurde im Zuge der Instandsetzungsmaßnahme ein umfangreiches Korrosionsmonitoringsystem mit insgesamt 40 Monitoringstellen installiert. Die Messungen an BW2 werden seit rund 12 Monaten durchgeführt und wurden bereits vor der Instandsetzungsmaßnahme begonnen. Erste Messungen zeigten an den meisten Stellen bereits einen Rückgang des Makroelementstroms, ein signifikanter Anstieg der Systemwiderstände wurde jedoch noch nicht festgestellt. Nachfolgend werden die Ergebnisse eines repräsentativen Sensors aus BW 2 dargestellt.

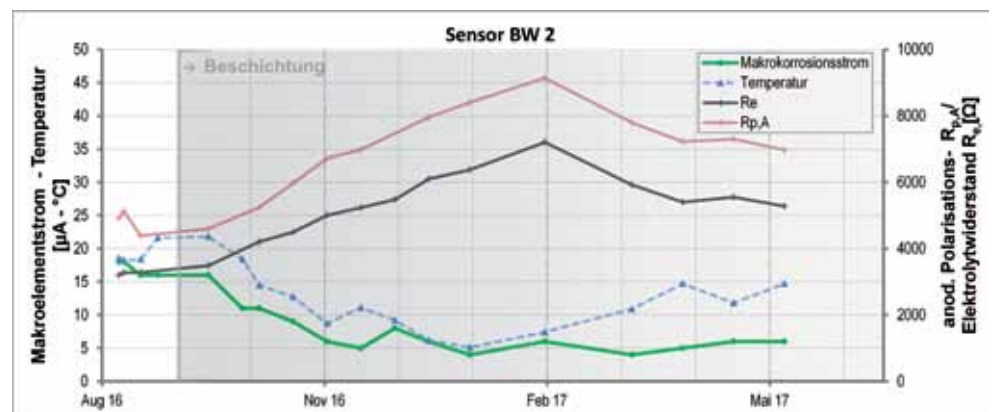
An der umliegenden Bewehrung von Sensor BW 2 wurden im Zuge der Installation bereits oberflächlich ausgedehnte Korrosionserscheinungen festgestellt. Die Korrosionsparameter dieses Sensors sind in Bild 5 und Bild 6 dargestellt.

Bild 5:
Makroelementstrom, Treibspannung und Temperatur des Sensors BW 2



Aus Makroelementstrom und Treibspannung kann die bei der Installation festgestellte aktive Korrosion bestätigt werden. Anschließend deutet die zeitabhängige Veränderung beider Korrosionsparameter darauf hin, dass infolge der Beschichtung ein Rückgang der Korrosionsaktivität stattfand. Dies wird durch die Systemwiderstände ($R_{p,A}$ mit R_e , vgl. Bild 6) be-

Bild 6:
Überlagerung von $R_{p,A}$ mit R_e , der Temperatur und I_{makro} des Sensors BW 2



stätigt, die sich – unter Vernachlässigung des Temperatureinflusses – im gleichen Zeitraum gegenüber ihrem Ausgangswert verdoppeln.

Bezieht man jedoch die Entwicklung der Temperatur in die Auswertung mit ein, wird deutlich, wodurch es zum Anstieg der Widerstände kam.

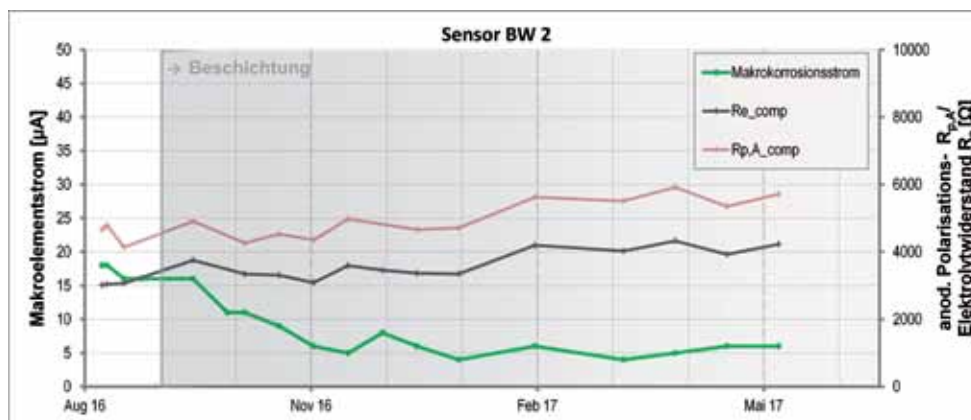


Bild 7:
Temperaturbereinigter $R_{p,A}$
und R_e überlagert mit I_{makro} des
Sensors BW 1

Auf Basis der temperaturbereinigten Widerstände zeigt sich deutlich, dass eine Austrocknung des Betons und damit ein Anstieg von R_e an diesem Sensor im aktuellen Zeitraum nur in geringen Umfang stattgefunden hat. Gleichermaßen verhält es sich mit $R_{p,A}$, dessen Veränderung hauptsächlich auf Schwankungen der Umgebungstemperatur zurückzuführen ist. Im betrachteten Zeitraum kam es daher nur zu einer Reduktion des Korrosionsstroms, jedoch noch nicht zum vollständigen Erliegen. Die Temperaturabhängigkeit dieses Sensors könnte im Sommer sogar zu einem weiteren Anstieg der Korrosionsaktivität führen. Weitere Messungen sind daher unbedingt notwendig.

11.3.5 Diskussion der eingesetzten Messroutine

Aus den dargestellten Daten wird ersichtlich, dass der beschriebene Messaufbau mittels Trennung des anodisch wirkenden Bereichs von der übrigen Bewehrung als zielführend angesehen werden kann.

Bei der Auswertung der Daten muss allerdings beachtet werden, dass mit dem zerstörenden Eingriff bei der Trennung der Anode, verbunden mit dem nachfolgenden Einbringen eines Vergussmörtels zur Schließung der Bohrlöcher eine erhebliche Menge an Wasser in das System eingebracht wurde. Dies führte bei einigen Sensoren (nicht dargestellt) zur Beeinflussung des Korrosionssystems, zum anderen spiegelte sich dessen Austrocknung in den ersten Monaten der Messung wider. Zudem muss davon ausgegangen werden, dass der gegenüber dem Altbeton wesentlich jüngere Mörtel einen kleineren Elektrolytwiderstand besaß. Der Stromfluss zwischen Anode und Kathode könnte somit anfangs vermehrt über den Mörtel erfolgen. Diese Gefahr könnte, z.B. durch Beschichten der Bohrlochwandung mit Epoxidharz verringert werden.

Zur Untersuchung wurde ein breites Spektrum elektrochemischer Messverfahren eingesetzt, die sich für die Beurteilung des Korrosionszustands als zielführend erwiesen haben. Es war möglich das Korrosionssystem mit einer vergleichbaren Messtechnik, wie sie in Laboruntersuchungen [6] eingesetzt wurde, umfassend zu bewerten.

Mit der punktuellen Erfassung der Korrosionsströme wurden zusammen mit der aus den freien Korrosionspotentialen berechneten Treibspannung des Systems die grundlegenden Parameter zur Korrosionsaktivität aufgezeichnet. Diese Messungen sind zur Erfassung des Verlaufs der Korrosionsaktivität bei einem Monitoring unabdingbar. Die Größenordnung der erfassten Ströme und Potentiale deckte sich zudem mit den Messwerten der Laboruntersuchungen aus [6].

Ebenso wurden mindestens an jedem Messtermin die klimatischen Randbedingungen (Lufttemperatur, relative Luftfeuchte) aufgezeichnet. Dies ist im Hinblick auf die starke Temperaturabhängigkeit des Korrosionssystems ein wesentlicher Baustein, um bei der Auswertung den Verlauf der erfassten Parameter richtig einordnen zu können. Von Vorteil wäre eine kontinuierliche automatisierte Aufzeichnung der Bauteiltemperatur, um Temperaturschwankungen auch im Vorlauf zu den Messterminen zu erkennen und somit die Korrosionsentwicklung besser nachvollziehen zu können.

Zur Bewertung der Gründe für Veränderungen im Korrosionssystem wurden alle relevanten Widerstände im Korrosionskreislauf gemessen.

Anhand des kathodischen Polarisationswiderstands kann die Beeinflussung des Korrosionssystems durch elektrochemische Vorgänge und Transportprozesse an der Kathode abgeschätzt werden. In den vorliegenden Bauwerken zeigte sich über den gesamten Zeitraum ein nahezu konstanter, sehr niedriger Verlauf des kathodischen Polarisationswiderstands, sodass von einer umfangreichen Betrachtung dieses Systemparameters abgesehen wurde, da sein Einfluss in den vorliegenden Bauwerkssituationen aufgrund der nachfolgenden zwei Gründe als vernachlässigbar eingeschätzt wurde. Zum einen besteht für die Anoden ein großflächiges Angebot an Kathodenfläche in den umliegenden Bereichen, zum anderen kann von einer ausreichenden Sauerstoffversorgung dieser kathodischen Bereiche ausgegangen werden, da keine ständige Wassersättigung des Betons, auch bei zeitweisem Grundwasserkontakt der Bodenplatten, zu erwarten ist.

Mit dem anodischen Polarisationswiderstand wurde ein wesentlicher Systemwiderstand gemessen, der Rückschlüsse auf die elektrochemischen Entwicklungen an der Anode ermöglichte. In den durchgeführten Untersuchungen konnte dieser Parameter an einigen Sensoren in BW 1 sowie an allen Sensoren des BW 2 als maßgebender korrosionsbeeinflussender Widerstand identifiziert werden. Dies deckt sich mit den in [6] festgestellten Ergebnissen an beschichteten Laborprobekörpern, bei denen der anodische Polarisationswiderstand als dominierender Systemwiderstand identifiziert wurde, der zum Erliegen der Makroelementkorrosion führte.

Bei der Bestimmung des Elektrolytwiderstands des Betons wurde in den vorliegenden Untersuchungen auf Wechselstromwiderstandsmessung zurückgegriffen, die zwar verlässliche Widerstandswerte liefert, jedoch zur Polarisierung des sensiblen Korrosionssystems führen kann. Für diese Messung wurde daher ein Messgerät mit kontrollierbarer, niedriger Amplitudenamplitude eingesetzt und erst nach Abschluss aller weiteren Messungen gemessen, um unmittelbare Effekte zu minimieren. Die Erfassung des Elektrolytwiderstands des Betons stellte einen wesentlichen Baustein des Korrosionsmonitorings dar, der Aufschluss über evtl. Feuchteveränderungen im Beton geben kann.

11.3.6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Aufbau des Monitoringsystems war grundlegend zielführend und ermöglichte eine umfassende Betrachtung der wesentlichen Korrosionsparameter.

Mit dem System konnte jedoch der Korrosionszustand der Bewehrung nur qualitativ beurteilt werden. Eine Berechnung von Korrosionsraten ist aufgrund fehlender Informationen zur wirksamen Anodenfläche nicht möglich. Ebenso können infolge der nicht konstanten Makroelementstrommessung sowie des nicht messbaren Mikroelementstroms keine Aussagen zum Querschnittsverlust am Stahl getroffen werden.

Prinzipiell sollte die Frequenz der Datenerfassung am Bauwerk individuell an die vorherrschenden Randbedingungen (Korrosionszustand der Bewehrung, allgemeiner Bauwerkszustand,...) angepasst werden. Es wird empfohlen, mind. 2 Messzyklen pro Jahr, je im Sommer und Winter, durchzuführen. Durch häufigere Messungen kann die Dateninterpretation jedoch detaillierter erfolgen und somit die Beurteilungsgrundlage weiter verbessert werden.

Beim Korrosionsmonitoring in Rissbereichen von Bestandsbauwerken handelt es sich um eine punktuelle Zustandsüberwachung. Die Wahl der Anzahl und Lage repräsentativer Messstellen ist daher von elementarer Bedeutung und erfordert ein hohes Maß an Sachkunde. Nur dann ist es möglich, eine Aussage zum gesamten Bauwerkszustand abzuleiten. Eine Bewertung der erfassten Korrosionsparameter sowie deren Verknüpfung zur Absicherung des Korrosionszustandes erfordert eine vertiefte Kenntnis der elektrochemischen Vorgänge bei der Korrosion von Stahl in gerissenem, chloridbelastetem Beton. Zusätzlich müssen die Randbedingungen (Feuchtezustand, Chloridgehalte, Rissart, usw.) zur Beurteilung berücksichtigt und mit den Korrosionsparametern verknüpft werden. Eine Bewertung sollte daher nur durch einen sachkundigen Planer vorgenommen werden.

In den vorliegenden Fällen ist eine abschließende Aussage zur Wirksamkeit der Maßnahme noch nicht möglich, da sich das Korrosionssystem im kurzen Untersuchungszeitraum noch nicht stabilisiert hat. Bei Bauwerk 1 ist bis dato jedoch ein rückläufiger Makroelementstrom an allen untersuchten Sensoren feststellbar, bei Bauwerk 2 zumindest an der Mehrzahl der Sensoren. Trotz dieser positiven Entwicklungen muss davon ausgegangen werden, dass ein Monitoring über mehrere Jahre durchgeführt werden muss.

Danksagung

Wir danken dem DAfStb für die Förderung des Forschungsvorhabens, das diese Untersuchungen ermöglichte.

Literatur

- [1] Deutscher Beton- und Bautechnik Verein e.V.: DBV-Merkblatt - „Parkhäuser und Tiefgaragen“. Berlin, 2010
- [2] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung DGZfP: Merkblatt „Korrosionsmonitoring von Stahl- und Spannbetonbauwerken“, Berlin, voraus. 2018
- [3] Schießl, P.: Zur Frage der zulässigen Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Carbonatisierung des Betons, DAfStb Heft 255, Berlin, Beuth Verlag, 1976
- [4] Schießl, P.: Einfluß von Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen, DAfStb Heft 370, Berlin, Beuth Verlag, 1986
- [5] Pease, B. J.: Influence of concrete cracking on ingress and reinforcement corrosion, Dissertation, Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby, 2010

- [6] Keßler, S., Hiemer, F., Gehlen, C.: Einfluss einer Betonbeschichtung auf die Mechanismen der Bewehrungskorrosion in gerissenem Stahlbeton, Beton- und Stahlbetonbau, Berlin, Ernst & Sohn Verlag, 2017
- [7] Gehlen, C., Mayer, T. F., Schießl-Pecka, A.: Monitoring und Instandhaltung instandgesetzter Bauwerke, Bauwerkserhaltung – Instandsetzung im Beton- und Stahlbetonbau, 12. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016
- [8] Tian, W.: Experimentelle und numerische Studie zur Bewehrungskorrosion in gerissenem Beton. Dissertation, Technische Universität München, München, 2013.
- [9] Schwenk, W.: Korrosionsgefährdung und Schutzmaßnahmen bei Elementbildung zwischen erdverlegten Rohren und Behältern aus unterschiedlichen Metallen. Gwf-gas/erdgas, Essen, Vulkan Verlag, 1972.
- [10] Beck, M., Burkert, A., Harnisch, J., Isecke, B., Osterminski, K., Raupach, M., Schießl, P., Tian, W., Warkus, J.: Deterioration model and input parameters for reinforcement corrosion. Structural Concrete 13 (3), Wiley VCH Verlag, 2013.
- [11] Raupach, M.: Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton. DAfStb-Heft 433, Berlin, Beuth Verlag, 1992
- [12] Weydert, R.; Gehlen, C.: Electrolytic Resistivity of Cover Concrete: Relevance, Measurement and Interpretation. Durability of Building Materials and Components, Ottawa; NRC Research Press, 1999.
- [13] Osterminski, K.: Zur voll-probabilistischen Modellierung der Korrosion von Stahl in Beton- Ein Beitrag zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen. Dissertation, Technische Universität München, München, 2013

Weitere Informationen

¹TU München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung
 Florian Hiemer M.Sc., Baumbachstraße 7, 81245 München
 Tel. (089) 289-27196, (089) 289-27069
florian.hiemer@tum.de
<http://www.cbm.bgu.tum.de>

²Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH
 Franziska Wich M.Sc., Landsberger Str. 370, 80687 München
 Tel. (089) 5463729 – 19, (089) 5463729 - 10
wich@ib-schiessl.de
<http://www.ib-schiessl.de>

11.4. Laser-Ablation-ICP-MS for the application on concrete structures – Quantitative approaches

Marco Decker, Harald Hilbig, Detlef Heinz

11.4.1 Introduction

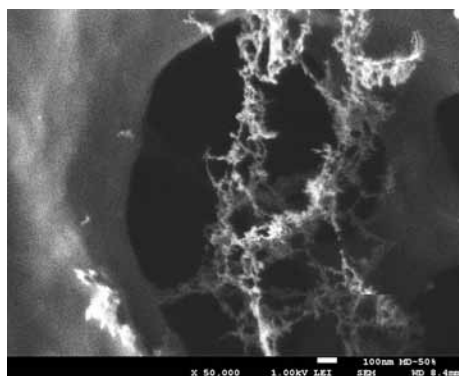
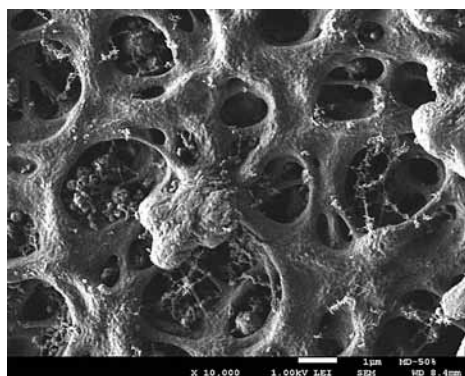
Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) as a method for element- and isotope-selective trace analysis of solid materials has become a versatile technique for numerous applications in geology, biology and material science. The ablation of material starts with a high energy laser pulse hitting the investigated sample forming a fine particle aerosol, which is transported to the inductively coupled plasma where it is ionized to finally be registered with the mass detector.

As a quasi-nondestructive multi element analysis technique with low sample preparation requirements and high spatial resolution it has numerous advantages over for example wet chemical techniques [1]. Nevertheless, a lack of reference materials and different ablation behaviors of varying phases or elemental compositions (elemental fractionation) hinders a broader use of this technique [2].

11.4.2 Laser-Material Interaction

It is known that some laser parameters or wavelengths lead to incomplete vaporization or ionization of materials. As a consequence a calibration is not possible due unrepresentative aerosol compositions before and after the ICP torch. This phenome is called Elemental Fractionation and to exclude it, the aerosol needs to be characterized.

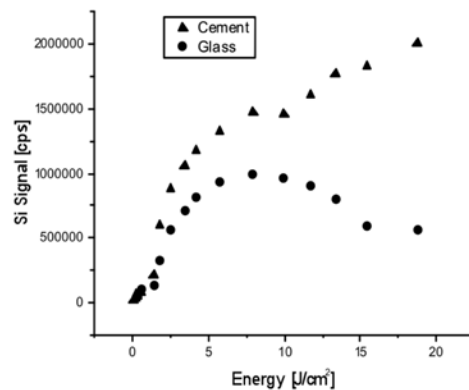
REM pictures of the aerosol stream from a cement stone ablation caught in a usual Lab filter are shown in scheme 1. The cement stone aerosol is grown to micrometer scale however not as a single particle but more like a strings made up of condensed particles smaller than 50 nm. This matches literature results for other semi crystalline silicate materials like glass [3]. From the small size of the particles it is expected that they can be fully processed in ICP as the threshold for processing is 150 nm for glass.



Scheme 1:
REM pictures of cement stone particles (CEM 42.5, w/c 0.4, 3 years old) ablated at ~25 J/cm² with 213 nm pulsed laser) collected from He aerosol stream on PTFE 0.45 µm PTFE filters at different magnifications.

An important parameter for the ablation is the used laser energy. It is also one of the most common sources of fractionation especially during ns-LA as in this case [4]. O'Conner describes this phenomenon by introducing a roll over point at which increasing energy

Scheme 2: Laser-Energy to MS-signal diagram of Glass and Cement Stone



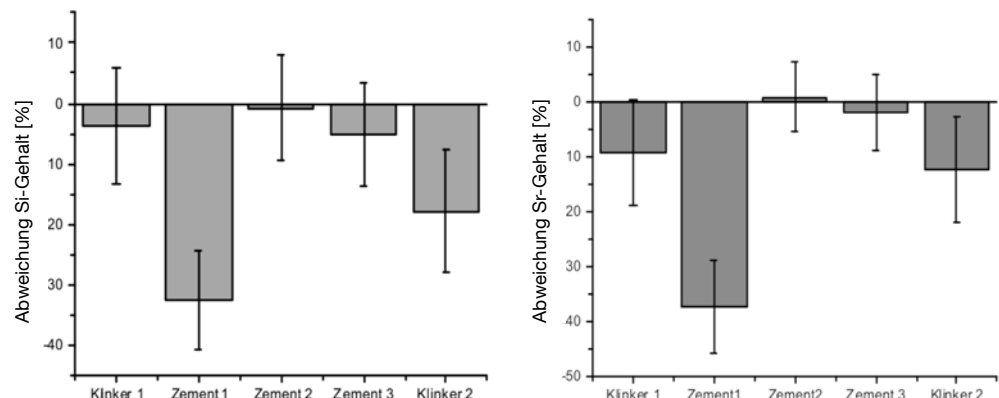
aren't increasing the signal anymore due to fractionation effects. In scheme 2 glass and cement stone are compared in there signal devolution with increasing energy from < 0.5 J/cm² to approximately 18 J/cm², while a usual working energy is between 5 and 10 J/cm² for glass and not yet determined for cement stone. It is visible that the roll over effect isn't that pronounced for cement stone while it is clearly visible for glass as

the intensity start to decrease from energies higher 7 J/cm². According to the intense signal yield even with energies about 2 J/cm² this was used for further investigations.

11.4.3 Measurement and calibration of pressed cement stone and clinker disks

With the established parameters, line measurements on pressed cement stone disks were carried out. Lines were chosen to ablat larger areas yielding better average values than local spot ablation. Calibration of the method was done by a correlation between the element intensities and values of a bulk analysis after fusion. This calibration was then used to correlate the measured intensities of unknown pressed cementious materials with a concentration value.

Scheme 3: Deviations of cements and klinkers to real concentrations of Silicon (light grey) and Strontium (dark grey)

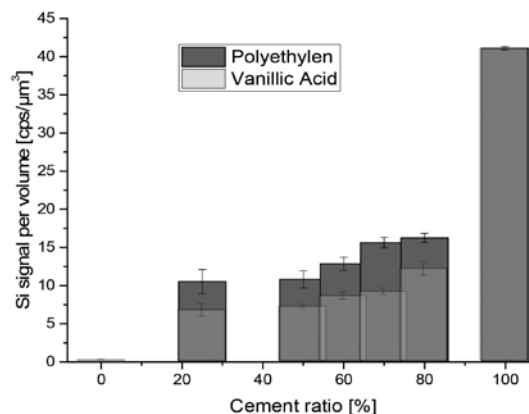


According to this, three various pressed hydrated Portland Cement stones and two unhydrated ones were analyzed. In scheme 3 the deviation in comparison to the real concentration is shown for silicon as a major ingredient and strontium as a minor one. Huge differences are due varying absorption parameters although the elemental composition is not very different. However, LA-ICP-MS isn't specialized on bulk elements, thus a divergence of $\pm 10\%$ is ok. For future investigations more specific parameters as w/c ratio need to be analyzed and explain huge divergences as for cement stone 1.

11.4.4 Measurements using strong absorbent binders

According to literature the use of strong absorbing binders increases the signal yield due to a more efficient ablation process. The binder should absorb the 213 nm wavelength energy and spread it in a small amount of volume, which leads to small particles in the aerosol gas stream and thus to a good signal per volume ratio. Nevertheless the use of

polyethylene and vanillic acid binders decreases the signal per volume ratio drastically as seen in scheme 4. Thus, the use of these agents isn't necessary as cement stone seems to have a very high signal/volume ratio. Reasons for this behavior are a high absorbance of light at 213 nm.



Scheme 4:
Silicon signal per volume of pressed binder disks (10 tons pressure) with various binder/cement stone ratios.

11.4.4 Application & Outlook

The LA-ICP-MS is used currently for Interfacial Transition Zone (ITZ) Analysis. Elemental ratios as well as a high spatial resolution make it possible to analyze this weak point in concrete. An optimized setup should later be used to investigate transport processes in concrete with a focus on degradation reactions as chloride attack or carbonation, which happen mainly in the ITZ.

Literature

- [1] R. E. Russo, X. Mao, H. Liu, J. Gonzalez, S. S. Mao: "Laser ablation in analytical chemistry - A review" *Talanta* (2002) 57, 425-451
- [2] J. Koch, D. Günther: "Review of the state-of-the-art of laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry" *Appl. Spectroscopy* (2011) 65, 155-162
- [3] H.-R. Kuhn, D. Günther, K. Niemax: "Evaluation of different techniques for particle size distribution measurements on laser-generated aerosols" *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* (2005) 20, 894-901
- [4] C. O'Connor: "Development of Novel Calibration Strategies for Laser Ablation ICP Mass Spectrometry" Dissertation Loughborough University (2007)

12. Impressum

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Große
Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz

cbm - Centrum Baustoffe und Materialprüfung

Baumbachstraße 7
81245 München
Tel +49.89.289.27060
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

Bildnachweis Umschlag

© Heike Geigl
© Astrid Eckert

