

Institut für Werkstoffe im Bauwesen

**IWVB**

# MITTEILUNGEN

Jahresbericht

2008/10

Activities

2011/1



Universität  
Stuttgart



**Jahresbericht**

**2008/10**

**Activities**

**Mitteilungen des Institut für Werkstoffe im Bauwesen; Band 2011/1**

JAHRESBERICHT 2008/10 ACTIVITIES

Herausgeber: Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart  
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt  
Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann

Anschrift: Institut für Werkstoffe im Bauwesen  
Pfaffenwaldring 4  
70569 Stuttgart  
oder:  
Universität Stuttgart  
Institut für Werkstoffe im Bauwesen  
70550 Stuttgart  
Telefon: (0711) 685 63324  
Telefax: (0711) 685 68086

Redaktion: Dr.-Ing. Joachim Schwarte  
Dipl.-Bibl. Monika Werner

© IWB; Stuttgart 2011

Alle Rechte vorbehalten

ISSN 0932-5921

## EINFÜHRUNG

Das Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart veröffentlicht im Rahmen der Schriftenreihe „IWB-Mitteilungen“ Berichtsbände, in denen die wesentlichen Aktivitäten des Instituts und seiner Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter geschildert werden. Der Berichtszeitraum des vorliegenden Berichts erstreckt sich über die Jahre 2008, 2009 und 2010.

Entsprechend der Aufgabenteilung eines jeden Hochschulinstituts in Forschung und Lehre besitzt auch dieser Bericht zwei Schwerpunkte.

In der Lehre haben wir uns auf die Umstellung der Studiengänge von Diplom auf Bachelor/Master vorbereitet. Eine gründliche Überarbeitung des Lehrangebotes hat stattgefunden und Modulbeschreibungen wurden geschrieben, die nun in so genannten Modulhandbüchern zusammengefasst sind. Seit Wintersemester 2008/2009 werden Bachelorkurse gelehrt, ab Wintersemester 2011/2012 fangen die Masterkurse an.

Über die aktuellen Forschungsarbeiten berichten die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit kurzen Ausarbeitungen. Darüber hinaus finden sich in diesem Bericht Aufzählungen aller in den Berichtszeitraum fallenden Dissertationen, Diplomarbeiten, Veröffentlichungen und öffentlichen Veranstaltungen sowie Informationen statistischer Natur.

Im Berichtszeitraum fanden einige Ereignisse statt, die die personelle Situation am IWB stark veränderten. Der bisherige Geschäftsführende Direktor, Herr Prof. Dr.-Ing. Ch. Gehlen, folgte einem Ruf an die TU München und verließ das Institut zum 1. Oktober 2008. An seiner Stelle übernahm Herr Prof. Dr.-Ing. R. Eligehausen die kommissarische

## INTRODUCTION

The Department of Construction Materials at the University of Stuttgart publishes the volume „Activities“ every few years within its series „IWB-Mitteilungen“. This is done to report about the main activities of the department and its members. The present report covers the years 2008, 2009 and 2010.

Due to the fact that every department, that is part of a university, is involved in both, research and teaching, this report has two major topics.

With respect to teaching, we have prepared the rearrangement of the courses of studies from Diploma to Bachelor / Master. A reworking of the offered courses has taken place and module descriptions were written, which were summarised in so-called module manuals. The Bachelor courses are being taught since WS 2008/2009 and the Master courses will start with the beginning of WS 2011/2012.

The scientific staff of IWB reports on the ongoing research activities with short reports. Furthermore, this report contains lists of all doctoral and diploma theses and publications that were finished during the past three years and of conferences organized by IWB. Some information of statistical interest are also given.

The period of the last three years was marked by several events which changed the personnel situation substantially. The previous Managing Director Prof. Dr.-Ing. Ch. Gehlen followed an appointment at the TU Munich and left the department by October 1st, 2008. Prof. Dr.-Ing. R. Eligehausen took the position as temporary Managing Director until September 30, 2009. At this date, he terminated his very successful and long-standing activities in the division of

Leitung des IWB bis zum 30. September 2009. Herr Eligehausen beendete an diesem Datum auch seine sehr erfolgreiche langjährige Tätigkeit in der Abteilung „Befestigungstechnik“ im IWB. Nachfolger in der neu benannten Abteilung „Befestigungs- und Verstärkungsmethoden“ wurde Herr Prof. Dr.-Ing. J. Hofmann, der sich auf Seite 198 ausführlicher vorstellt. Ab 1. Oktober 2009 übernahm Herr Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. H.-W. Reinhardt wieder die Leitung des IWB als Geschäftsführender Direktor i.V.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass aktuelle Informationen über das IWB und seine Aktivitäten auch über das Internet (WWW) abrufbar sind. Die Adresse lautet:

<http://www.iwb.uni-stuttgart.de>

Der Berichtsband gibt die Gelegenheit, allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für die geleistete Arbeit zu danken und alle zu ermuntern, sich trotz verschlechternder Randbedingungen weiterhin für die Belange des Instituts tatkräftig einzusetzen. In diesen Dank werden alle Lehrbeauftragte und Lehrstuhlangehörige, die sich für die reibungslose Durchführung aller Lehrveranstaltungen eingesetzt haben, besonders eingeschlossen.

Allen Institutionen, Firmen und Personen außerhalb der Universität sei an dieser Stelle für die stetige Kooperation und Unterstützung herzlich gedankt.

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h.  
H.-W. Reinhardt  
Geschäftsführender Direktor des IWB i.V.  
Juli 2010

“Anchoring techniques” in IWB. The successor in the renamed division “Anchoring and strengthening techniques” became Prof. Dr.-Ing J. Hofmann who will present himself on page 198 in more detail. Since October 1st, 2009 Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. H.-W. Reinhardt is again head of IWB as Deputy Managing Director.

It should be mentioned, that more information about IWB and its activities is also offered via Internet within the World-Wide-Web. The address reads:

<http://www.iwb.uni-stuttgart.de>

This report offers also a welcome opportunity to thank all the members of the department for their successful work and to encourage them, despite growing constraints, to serve the interests of the department.

A special thank goes to all visiting lectures and the staff of IWB who have contributed actively to the smooth realization of the lectures. The steady cooperation and support of organizations, companies and persons outside the university is gratefully acknowledged.

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h.  
H.-W. Reinhardt  
Deputy Managing Director of IWB  
July 2010

**INHALT / CONTENT****Lehrveranstaltungen**

Werkstoffe im Bauwesen I.....	7
Werkstoffe im Bauwesen II.....	11
Bauschäden und Instandhaltung.....	12
Befestigungstechnik.....	13
Betontechnologie.....	13
Korrosionsschutz im Bauwesen.....	17
Maßstabseffekt in Beton- und Stahlbetonkonstruktionen.....	18
Numerische Modellierung von Stahlbeton.....	19
Ingenieurwerkstoffe I [COMMAS – C7].....	20
Ingenieurwerkstoffe Beton [COMMAS – E7].....	21
Baustoffe.....	23
Einführung in die Informatik.....	24
Werkstoffkunde.....	25

**Forschung**

Grundlagen der Anwendung von Superabsorbierenden Polymeren in normal- und hochfestem Beton.....	27
Zur Verschiebung der Kopfbolzen unter Zugbelastung Funktion der Kopfpressung.....	35
Verformungsverhalten von korrodierter Bewehrung in Beton.....	42
Akustische Verfahren zur Schadensdetektion in Rotorblättern von Windenergieanlagen - Ergebnisse des Projektes RIWEA.....	52
Korrosionsverhalten von geschweißtem nichtrostendem Stahl der Werkstoff Nr. 1.4571 bei atmosphärischer Beanspruchung – Ergebnisse baupraktischer Untersuchungen.....	60
Eine alternative Methode der DMS-Applikation für die kontinuierliche Dehnungsmessung entlang eines Bewehrungsstabes.....	69
Untersuchung des Tragverhaltens von rotationssteifen Ankergruppen mithilfe mehrachs geregelter Servohydraulik.....	77
Numerische Modellierung der Korrosion des Stahles in Beton.....	85
Numerische Simulation des Betonverhaltens bei erhöhten Temperaturen – Schädigung und explosive Abplatzungen.....	95
Modellierung des Versagens von Beton bei hohen Belastungsraten und Impact.....	103
Verhalten von Befestigungen unter Zuglast und Brandbeanspruchung.....	111
Nachhaltig bauen mit Beton - das Online- Informationssystem NBB-Info.....	121
Der instrumentierte Ausbreittisch zur Bestimmung der Selbstverdichtung.....	128
Phonolit unterdrückt Alkali-Kieselsäure-Reaktion.....	135
Entwurf von Betonmischungen mit variablem Luftporengehalt mit dem Ziel einer maximalen Porosierung.....	143
Carbonatisierung des Betons und Funktionsfähigkeit von Dübeln in carbonisiertem Beton.....	150
Möglichkeiten zur Beurteilung der Restoberflächenzugfestigkeit von verwitterten Natursteinen.....	156
Ermüdungsverhalten von Betonstahl unter Korrosionsbeanspruchung.....	164

---

<b>Vortragsveranstaltungen, Symposien, Workshops, Konferenzen.....</b>	<b>174</b>
<b>Publikationen .....</b>	<b>177</b>
<b>Diplomarbeiten .....</b>	<b>192</b>
<b>Dissertationen.....</b>	<b>194</b>
<b>Personal .....</b>	<b>196</b>

## VORLESUNGSREIHE “WERKSTOFFE IM BAUWESEN I“ (UNTERSTUFE) LECTURE COURSE “WERKSTOFFE IM BAUWESEN I” (BASIC LEVEL)

von/by: Prof. Dr.-Ing. Hofmann  
Dr.-Ing. Hariri

Im Diplom- und Bachelorstudiengang Bauingenieurwesen wird im 2. und 3. Semester der Unterstufe die Vorlesungsreihe „Werkstoffe im Bauwesen I“ als Pflichtveranstaltung mit einem Umfang von insgesamt 6 SWh angeboten.

Für das gesamte Spektrum der im Bauwesen verwendeten Werkstoffe werden die Grundlagen hinsichtlich der charakteristischen Eigenschaften unter Berücksichtigung ihrer praktischen Bedeutung behandelt. Als Voraussetzung für eine angemessene Wahl der Werkstoffe, im Hinblick auf das Gebrauchs- und Versagensverhalten sowie die Dauerhaftigkeit der damit erstellten Konstruktionen, nimmt diese Vorlesungsreihe im Rahmen des Bauingenieurstudiums einen besonderen Stellenwert ein.

Vorträge zu einzelnen Themengebieten werden von verschiedenen Referenten aus Forschung und Industrie gehalten.<sup>1</sup>

Die Vorlesungsreihe beginnt mit dem Themengebiet „Allgemeine Grundlagen“, welches eine Einführung in Bautechnische Bestimmungen, Bauchemie, Materialparameter, Baurecht, Materialprüfung sowie Messtechnik und statistische Auswertungsmethoden beinhaltet.

Danach folgt die Vorstellung des Werkstoffes Stahl, in all seinen für das Bauwesen relevanten Ausführungen. Ausgehend von der Herstellung über Aufbau, Eigenschaften und Fügeverfahren werden Stahl und Gusseisen ausführlich erläutert. Ergänzend dazu werden auch die Nichteisenmetalle mit Ihren Eigenschaften behandelt. Die Themen Korrosion und Korrosionsschutz beinhalten

The basic level lecture course in „Construction Materials I“ is obligatory for all students studying civil engineering. The lectures are offered for students in the second and third semester with a total of 6 lecture hours per week.

For the whole spectrum of the materials used in civil engineering the basics will be taught. As the knowledge of material properties is an important prerequisite for the proper use of materials in construction this course has got a large significance.

The lectures are given by speakers from the fields of industry and research.<sup>1</sup>

The lecture course starts with the topic of general basics which gives an introduction into technical construction regulations, parameter of materials as well as testing of materials, building law, measuring technology and statistical methods.

The presentation of steel at all its for the construction industry relevant details follows next. Based on the fabrication over composition, techniques of joining and properties steel and cast iron are explained in detail. Additional to that the nonferrous metals and their properties are taught. The topics corrosion and corrosion protection contain for the covered materials, e. g. concrete, steel and nonferrous metals the corrosive hazards as well as the safety measures which convey the principle of durability.

The focus of the organic materials is situated at the topic of wood. Furthermore plastic materials and bitumen are taught with attention on their features, fabrication processes and application areas.

---

<sup>1</sup> Referenten/speakers: Dr.-Ing. Reiner Hårdtl (HeidelbergCement); Dr.-Ing. Michael Reick (Kreisbrandmeister Göppingen), Dr.-Ing. Christian Öttl, Dr.-Ing. Michael Stegmaier, Dr.-Ing Simon Aicher (MPA Universität Stuttgart); Prof. Jan Hofmann, Dr.-Ing Karim Hariri, Prof. Ulf Nürnberger, Dr.-Ing. Joachim Schwarte, Dipl.-Ing. Christian Fischer (IWB).

werkstoffübergreifend, von Beton über Stahl und Nichteisenmetalle, die korrosiven Gefährdungen sowie Schutzmaßnahmen, die wiederum den Grundsatz der Dauerhaftigkeit vermitteln.

Bei den organischen Werkstoffen liegt der Schwerpunkt auf dem Themengebiet Holz. Jedoch werden auch die Materialien Kunststoff und Bitumen in ihren Wesensmerkmalen, Herstellungsverfahren und Anwendungen behandelt.

Der Komplex der mineralischen Werkstoffe beginnt mit den Themen Mauerwerk und Mörtel. Vorbereitend auf den Themenkomplex Beton werden zuerst die mineralischen Bindemittel, im Wesentlichen Gips, Kalk, und Zement, sowie die Gesteinskörnungen behandelt. Mit diesen Grundlagen ausgestattet, werden die Studenten in das Schwerpunktthema Beton eingeführt. Bei der Behandlung der Frisch- und Festbetoneigenschaften wird bereits Wert auf eine Sensibilisierung für Dauerhaftigkeitsaspekte gelegt. Weiterhin werden Herstellung und Eigenschaften von Leichtbeton und diversen Sonderbetonen behandelt. Das Brandverhalten von Baustoffen und die Möglichkeiten des Brandschutzes der behandelten Werkstoffe werden werkstoffübergreifend präsentiert.

The complex of the mineral binder materials begins with the topics of masonry and mortar. Preliminary to the topic of concrete the mineral binder, especially gypsum, lime and cement as well as aggregates are discussed. Equipped with those premises the students are taught in the major topic of concrete. During dealing the topics of fresh concrete and hardened concrete the students are already sensitised to aspects of durability. Furthermore fabrication and properties of light weight concrete and certain high performance concretes are discussed.

The fire performance of building materials and the possibilities of fire protection are presented as a comprehensive package for all covered materials.

## ÜBUNGEN ZU „WERKSTOFFE IM BAUWESEN I“ (UNTERSTUFE) EXERCISES IN „WERKSTOFFE IM BAUWESEN I“ (BASIC LEVEL)

Begleitend zur Vorlesung finden im Wintersemester praktische Übungen statt. Diese bestehen im Wesentlichen aus Vorführversuchen, die in den Räumen der *Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA)* und mit der Unterstützung deren Mitarbeiter durchgeführt werden. Sie dienen zur Ermittlung von charakteristischen Eigenschaften der in der Vorlesung behandelten Werkstoffe. Dabei werden Grundlagen der anzuwendenden Messtechnik und der Materialprüfung vermittelt.

Die Teilnahme ist für die Studierenden obligatorisch und gilt als Prüfungsvorleistung. Der Umfang der Übungen beläuft sich gemäß Studienplan auf 2 SWh. Zur effizienten Durchführung der Übungen werden die Studierenden in überschaubare Gruppen von ca. 18 Teilnehmern aufgeteilt.

The lectures are accompanied by exercises that are offered once a year in the winter semester. During these exercises the equipment and the laboratories of the *Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA)* are used. The here presented tests shall give a further knowledge on how to determine characteristic properties of the materials the lectures deal with. The basics of generally used measuring techniques and material testing are shown.

Participation in these exercises is obligatory for the students to take the examination.

In accordance with the examination regulations, the exercises cover 2 lecture hours per week. For an efficient execution of the exercises, the students are divided into groups of manageable size of about 18 persons.

Tabelle 1: Themenübersicht der praktischen Übungen

Übung / Exercise:	Themen / Topics:
Ü1: Stahl	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zugversuche, Recken</li> <li>- Wärmebehandlung: Vergüten</li> <li>- Zähigkeit: Biegen von Betonstahl</li> <li>- Vorführungen zum Schweißen</li> </ul>
Ü2: Beton I	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bestimmung der Festigkeitseigenschaften von Zement</li> <li>- Frischbetonkennwerte</li> </ul>
Ü3: Beton II	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren für Festbeton</li> <li>- Ermittlung der Carbonatisierungstiefe</li> <li>- Druckprüfungen an Ziegeln und einem Mauerwerksprüfkörper</li> </ul>
Ü4: Holz und Kunststoffe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Druckversuche mit unterschiedlichen Kraft / Faser-Winkeln</li> <li>- Versuche zur Tragfähigkeitsermittlung von Nagel-, Dübel- und Leimverbindungen</li> <li>- Zugversuche an unterschiedlichen Kunststoffen</li> <li>- Temperatureinfluss auf Kunststoff: Kriechen, Relaxation</li> </ul>

Jede Gruppe nimmt an 4 Veranstaltungen (Dauer jeweils 120 min, seit 2010 90 min) mit unterschiedlichen Themenschwerpunkten teil. Zusätzlich werden Einführungsvorträge angeboten. Die Themen der einzelnen Übungsveranstaltungen sind in der oben

Each group visits the laboratories for 4 events (duration of each event 120 min, since 2010 90 min). Several experiments with different centres of interest are demonstrated. Additionally introducing lectures are given. The topics covered in the exercises

stehenden Tabelle 1 zusammengefasst.

Da es sich um eine Pflichtveranstaltung handelt, stimmen die Zahlen der eingeschriebenen Studenten mit den Teilnehmerzahlen verhältnismäßig gut überein.

Tabelle 2 gibt dazu eine Übersicht über den Berichtszeitraum.

Tabelle 2: *Teilnehmerzahlen der praktischen Übungen*

Semester	Teilnehmerzahl Number of participants	Einteilung Division
WS 2008/09	103	6 Gruppen mit 15 bis 21 Teilnehmern
WS 2009/10	98	6 Gruppen mit 13 bis 21 Teilnehmern
WS 2010/11	131	10 Gruppen mit 8 bis 17 Teilnehmern

are presented in Table 1 (given above).

The numbers of participants are listed in Table 2. Since participation is a matter of duty, the number of participants almost equals to the number of students registered in the concerning semester.

### **PRÜFUNG IM FACH „WERKSTOFFE IM BAUWESEN I“ (UNTERSTUFE) EXAMINATION IN „WERKSTOFFE IM BAUWESEN I“ (BASIC LEVEL)**

Im Fach „Werkstoffe im Bauwesen I“ findet zweimal jährlich eine vierstündige schriftliche Prüfung für Diplomstudenten und eine dreistündige schriftliche Prüfung für Bachelorstudenten statt. Darin wird anhand von etwa 34 Aufgaben zu Themen aus dem gesamten Lehrinhalt der Vorlesungsreihe das erworbene Fachwissen abgeprüft.

Options to take the examination in „Werkstoffe im Bauwesen I“ are offered twice a year. The examination takes 4 hours for graduate students and 3 hours for undergraduate student. About 34 questions to topics from all contents of the lectures are to be answered.

**VORLESUNGSREIHE „WERKSTOFFE IM BAUWESEN II“**  
**LECTURE COURSE „WERKSTOFFE IM BAUWESEN II“**

Dr. Schwarte / Dr. Hariri (MPA)

Insbesondere der als Konstrukteur tätige Ingenieur wird über die im Fach „Werkstoffe im Bauwesen I“ vermittelten Grundlagen hinaus vertiefte Kenntnisse der material- und milieugerechten Anwendung der Ingenieurbaustoffe erwerben müssen. Modelle bzgl. der relevanten Deformations- und Schädigungsprozesse sowie zugehörige Rechenverfahren müssen erarbeitet werden.

In der folgenden Tabelle sind die Themen, die von der Vorlesungsreihe abgedeckt werden, zusammengestellt.

Die Vorlesungen über „Betriebsfestigkeit“, „Bruchmechanik“, „Rheologie“ und „Transportvorgänge“ werden durch Hörsaalübungen ergänzt.

Apart from the basics offered in „Werkstoffe im Bauwesen I“ the civil engineer will need deeper knowledge about the behaviour of the building materials and their interaction with other media. Models concerning the relevant processes of deformation and degradation as well as the related calculation methods have to be acquired.

In the following table the topics, that are covered by the lecture course, are listed.

The lectures on „cyclic loading“, „rheology“, „fracture mechanics“ and „transport phenomena“ are accompanied by exercises.

*Vorlesungsinhalte „Werkstoffe im Bauwesen II“*

Semester: Term:	Themen: Topics:
6. Semester (Dipl.) 4. Semester (BSc) (Sommersemester)	* Rheologie * Transportvorgänge * Bautenschutz * Dauerhaftigkeitsbemessung * Instandsetzung
7. Semester (Dipl.) 5. Semester (BSc) (Wintersemester)	* Bruchmechanik * Betriebsfestigkeit * Faserbeton * Kunststoffe * Holz

**VORLESUNGSREIHE „BAUSCHÄDEN UND INSTANDHALTUNG“ /  
“ERHALTUNG VON IMMOBILIEN“  
LECTURE COURSE „STRUCTURAL DAMAGE AND RESTORATION“/  
”MAINTENANCE OF PROPERTY”**

bis SS 2008: Prof. Gehlen; ab SS 2009: Dr. Hariri

Im Rahmen der Vorlesungsreihe werden Bauschäden, die Instandhaltungs- bzw. Instandsetzungsplanung und die Qualitätsüberwachung der Ausführung behandelt.

Die Schäden an Bauwerken werden ausgehend vom Schadensbild über den Schädigungsmechanismus bis hin zum Schadensverlauf analysiert und mithilfe von Beispielen aus der Praxis erläutert. Anschließend werden dauerhafte Instandsetzungsmethoden dargestellt und prinzipielle Möglichkeiten aufgezeigt, Bauschäden schon während der Planungsphase zu vermeiden. Der Schwerpunkt liegt auf dem Werkstoff Stahlbeton, doch wird zusätzlich auf Schäden und Instandsetzung von Bauwerken aus Naturstein und Holz eingegangen. Ergänzend werden zerstörungsfreie Prüfungen zur Erfassung des Bauwerkzustandes vorgestellt. Die Vorlesung wird für Studenten/innen des Studienganges Bauingenieurwesen im 8. Semester und für Studenten/innen des Studienganges Immobilienwirtschaft und Immobilientchnik im 6. Semester angeboten. Der Vorlesungsumfang beträgt 3 SWS. Die Vorlesungsreihe schließt mit einer 1,5-stündigen Prüfung ab.

Ab dem Sommersemester 2011 wird diese Vorlesungsreihe, im Zuge der Umstellung des Studiums auf den Bachelor-Abschluss, ersetzt durch die Vorlesungsreihe „Schutz, Instandsetzung und Ertüchtigung“.

The lecture course treats of structural damage, strategy of maintenance and repair of structures and the quality control of the realisation.

Structural damages will be analysed with examples of the practice based on the damage symptoms, the mechanism and the progress of the damage. Afterwards durable techniques of repair and possibilities to avoid structural damages during the phase of design will be presented. The main focus of building materials in the course is given to reinforced concrete, but there are also lectures about repair of structures made of natural stone and timber. The lecture course will be completed by presentations of non-destructive test methods for the condition control of existing structures.

The course is offered to advanced level students of civil engineering in the 8<sup>th</sup> term and students of economy of properties in the 6<sup>th</sup> term including 3 lecture hours per week. At the end of each term there is an examination taking 1½ hours.

From the summer semester 2011, this course is replaced by the course "protection, repair and retrofitting"

## VORLESUNGSREIHE “BEFESTIGUNGSTECHNIK I UND II“ LECTURE COURSE “BEFESTIGUNGSTECHNIK I UND II”

von/by: Prof. Dr.-Ing. Hofmann

Im Masterstudiengang Bauingenieurwesen wird im 7. Semester die Vorlesungsreihe „Befestigungstechnik I“ als Wahlmodul beziehungsweise Kernmodul mit einem Umfang von insgesamt 6 SWS angeboten.

Die Vorlesungsreihe besteht aus fünfzehn Terminen zu jeweils 90 Minuten. Davon sind dreizehn der Termine Vorlesungen und zwei der Termine Übungsstunden. Zusätzlich wird eine Exkursion zu einer Herstellerfirma von Befestigungsmitteln angeboten, die den Studenten einen sehr interessanten Einblick in die Herstellung von Befestigungsmitteln bietet.

Die Studenten lernen die Anwendung und das Tragverhalten von Einlegeteilen sowie von Dübeln in Beton und Mauerwerk unter statischer Belastung kennen und können beliebige Befestigungen bemessen.

Der Vorlesungsablauf ist an das Vorgehen in der Praxis angelehnt und beginnt mit einer Einführung in die Befestigungstechnik, wobei eine Übersicht über die Befestigungstechnik mit ihren typischen Anwendungen in den Bereichen des Bauwesens gegeben wird und die Kriterien zur richtigen Dübelauswahl beschrieben werden.

Des Weiteren werden die Befestigungssysteme in ihrer Wirkungsweise und die Art der Montage beschrieben sowie mögliche Schadensfälle bei falscher Anwendung aufgezeigt.

Aufbauend dazu wird das Verhalten von Beton unter Zug- und Querbeanspruchung sowie das Tragverhalten und die Bemessung von Einlegeteilen und Dübeln in Beton behandelt. Ergänzend dazu wird auch das Verhalten von Mauerwerk unter Zugbeanspruchung sowie das Tragverhalten und die Bemessung von Kunststoff- und Verbunddübeln im Mauerwerk behandelt.

Vervollständigt wird die Vorlesungsreihe mit

The basic level lecture course in „Befestigungstechnik I“ is obligatory for all students studying civil engineering. The lectures are offered for students in the seventh semester with a total of 6 lecture hours per week.

The course includes thirteen lectures and two exercises. In addition one excursion to a manufacturer company of fasteners is offered where an interesting insight in fastening production is possible.

Students get knowledge about application and load bearing behaviour of fasteners in concrete and masonry under static load and are able to calculate these fasteners.

The timetable is adhered closely to the procedures on a construction site. First, the students get an introduction into fasteners. It is given an overview of the fastening technology with its typical application in civil engineering. It is also described the criteria to choose the right fastener.

Furthermore the fastening systems are described in their mode of operation and in the way how to install as well as possible damages based on wrong application.

After this the behavior of concrete under tension and shear load as well as load bearing behaviour and design of fasteners in concrete is discussed. Additionally it is broached the issue of the behavior of masonry under tension load as well as load bearing behaviour and design of plastic and adhesive anchors.

The course is completed with a lecture about fasteners which are exposed to high temperatures. In this lecture the aims of fire protection requirements and the behavior of concrete and steel under high temperatures is defined.

In the last lecture the most important contents are repeated and summarized.

These contents of teaching are basics for the

einem Vorlesungsblock über Befestigungen unter Brandbeanspruchung in der die Ziele des baulichen Brandschutzes sowie das Verhalten von Stahl und Beton bei hohen Temperaturen erläutert werden.

In der letzten Vorlesung werden die wichtigsten Inhalte der Vorlesung noch einmal zusammengefasst und wiederholt.

Diese Lehrinhalte sind Grundlagen für die Vorlesungsreihe „Befestigungstechnik II“, welche als Wahlmodul beziehungsweise Ergänzungsmodul für Studenten im 8. Semester mit einem Umfang von 3 SWS angeboten werden.

In dieser Vorlesung lernen die Studenten das Tragverhalten von Einlegeteilen sowie von Dübeln unter Ermüdungs- und seismischer Belastung kennen und können Befestigungen bei diesen Anwendungen bemessen.

lecture „Befestigungstechnik II“, which are offered for students at the eighth semester with a total of 3 lecture hours per week.

In this lecture the students get knowledge about load bearing behaviour of fasteners in concrete under fatigue stress and seismic load and are able to calculate the fasteners on these applications.

### **ÜBUNGEN ZU „BEFESTIGUNGSTECHNIK I UND II“ EXERCISES IN „BEFESTIGUNGSTECHNIK I UND II“**

Begleitend zur Vorlesungsreihe finden zwei Termine zur klausurvorbereitenden Übung statt.

Hier werden die Inhalte der Vorlesung für die Bemessung noch einmal wiederholt und Anwendungen aus der Praxis, wie sie auch in der Prüfung vorkommen könnten, berechnet. Die Übung wird für Studierende des Bauingenieurwesens angeboten.

The lectures are accompanied by two exercises.

This exercises are a repetition of the contents the students need to know for some design tasks. Afterwards some design tasks similar to the tasks at the exam will be calculated.

The exercises are offered for students studying civil engineering.

### **PRÜFUNG IM FACH „BEFESTIGUNGSTECHNIK I UND II“ EXAMINATION IN „BEFESTIGUNGSTECHNIK I UND II“**

Im Fach „Befestigungstechnik I“ findet einmal jährlich eine schriftliche Prüfung statt. Die Prüfung dauert 90 Minuten und besteht aus zwei Teilen zu je 45 Minuten.

Die Inhalte darin beziehen sich auf die ge-

Option to take the examination in „Befestigungstechnik I“ is offered once a year. The examination takes 90 minutes and is divided into two parts.

The questions deal with the contents the

hörten Themen. Im ersten Teil erhalten die Studenten Fragen über alle Themengebiete. Im zweiten Teil sollen Bemessungsaufgaben gelöst werden.

Die Prüfung zu „Befestigungstechnik II“ erfolgt mündlich und dauert 30 Minuten.

students are given in the lectures. In the first part the students are asked questions about all contents. In the second part there should be calculated some design tasks

## VORLESUNGSREIHE „BETONTECHNOLOGIE“ LECTURE COURSE „TECHNOLOGY OF CONCRETE”

von/by: Alexander Assmann

Die Vorlesungsreihe „Betontechnologie“ wurde erstmals im Wintersemester 1996/1997 angeboten und hat einen Umfang von drei Semesterwochenstunden. Im Rahmen der Vorlesung wird der Werkstoff Beton in all seinen Facetten detailliert behandelt. Neben den theoretischen Grundlagen werden auch die für die Praxis relevanten Aspekte abgedeckt. Im Folgenden sind die wichtigsten Vorlesungsinhalte genannt:

- Betonkomponenten und Betonzusätze
- Zementhydratation
- Junger Beton
- Zeit- und lastabhängiges Verhalten
- Dauerhaftigkeit
- Leichtbeton und Sonderbetone
- Verbund Stahl/Beton
- Konformität und Qualitätsmanagement
- Prüfverfahren für Frisch- und Festbeton.

Die Vorträge zu den einzelnen Themengebieten halten Referenten aus Forschung und Industrie.<sup>1</sup> Die Vorlesungsreihe wird zum Ende des Wintersemesters mit einer eineinhalbstündigen schriftlichen Prüfung abgeschlossen.

Im Sommersemester wird den Studierenden im Rahmen eines einwöchigen Praktikums die Möglichkeit geboten, den theoretischen Teil des E-Scheins (erweiterte Betontechnologisch Ausbildung) zu erwerben. Als Voraussetzung dafür gilt die erfolgreiche Teilnahme an einem Kolloquium sowie das Bestehen der Prüfungen in den beiden Fächern „Bauschäden und Instandhaltung“ / „Erhaltung von Immobilien“ und „Werkstoffe im Bauwesen II“.

The lecture course “technology of concrete” was provided in the winter term 1996/1997 for the first time and has a total of three lecture hours per week. The lectures discuss all aspects of concrete in detail. Besides the theoretical basics, the practical aspects are also taken into account. The main topics are presented in the following:

- Components of concrete and additives
- Hydration of cement
- Early age concrete
- Time- and load-dependent behaviour
- Durability of concrete
- Lightweight concrete and special concrete
- Bond between steel and concrete
- Conformity and quality management
- Testing methods for fresh and hardened concrete.

The lectures are given by speakers from the fields of industry and research.<sup>1</sup> At the end of the winter semester there is a written examination which lasts one and a half hour.

In the summer semester our institute offers the possibility to take part in a one week internship to get the theoretical conditions of the E-Schein (certificate). As prerequisites the students have to withstand a colloquium and they have to pass the exams in the courses “Structural damage and restoration” / “Maintenance of property” and “Werkstoffe im Bauwesen II”.

<sup>1</sup> Referenten/speakers: Dr.-Ing. Michael Aufrecht (BÜV-ZERT Baden-Württemberg e.V.); Dr.-Ing. Reiner Hårdt (HeidelbergCement); Dr.-Ing. Karim Hariri, Dr.-Ing. Markus Krüger, Dr.-Ing. Christian Öttl (MPA Universität Stuttgart); Dipl.-Ing. Alexander Assmann, Dipl.-Ing. Christian Fischer (IWB).

**VORLESUNGSREIHE „KORROSIONSSCHUTZ IM BAUWESEN“**  
**LECTURE COURSE „CORROSION PROTECTION IN CIVIL ENGINEERING“**

Prof. Nürnberger

Die Vorlesungen im „Korrosionsschutz im Bauwesen“ werden im Rahmen des „Master of Science“ Studienganges im Bauingenieurwesen und der Immobilientechnik und -wirtschaft angeboten. Durch die Vorlesungen können Kenntnisse erworben werden, die helfen, Probleme und Aufgaben beim vorbeugenden Korrosionsschutz sowie bei der Instandhaltung und Instandsetzung von Baukonstruktionen zu lösen.

Die Vorlesung wendet sich auch an Mitarbeiter von Ingenieur- und Architekturbüros sowie Baufirmen, die einen Einstieg in die Korrosionskunde des Bauwesens suchen oder ihre Kenntnisse auffrischen bzw. vertiefen möchten.

Die Vorlesung „Korrosionsschutz im Bauwesen“ wird abwechselnd mit zwei unterschiedlichen thematischen Schwerpunkten angeboten:

Sommersemester: Schwerpunkt Betonbau

Themen:

Korrosionsschutz durch Beton, Korrosionsprobleme im Spannbetonbau, Betonbeschichtung, Instandsetzung von Betonbauwerken.

Wintersemester: Schwerpunkt Metallbau

Themen:

Korrosionsschutz durch metallische Überzüge (Verzinken), org. Beschichtungen und Werkstoffauswahl (wetterfeste und nichtrostende Stähle, Aluminium, Kupfer) sowie korrosionsgerechtes Konstruieren.

Die Vorlesung kann alternativ im Sommersemester oder im Wintersemester gehört werden und hat einen Umfang von 2 Semesterwochenstunden / 3 Leistungspunkten. Sie wird durch eine einstündige schriftliche Prüfung abgeschlossen.

The lecture course „Corrosion Protection in Civil Engineering“ is offered for students of the master course studying structural engineering and real estate engineering and management. The lectures provide knowledge which helps to solve problems concerning preventive corrosion protection as well as maintenance and repair of structures. The course addresses also employees of engineer and architecture offices as well as construction companies looking for an introduction to “corrosion sciences” in civil engineering or would like to refresh / deepen their knowledge.

The lecture course „Corrosion Protection in Civil Engineering“ focusses on two different aspects.

Thematic priority in summer semester: concrete structure

Topics:

Corrosion protection by concrete. Corrosion problems in prestressed concrete. Coatings for concrete. Repair of concrete constructions.

Thematic priority in winter semester: metal structure

Topics:

Corrosion protection by metallic coatings, organic coatings and special materials (weatherproof steel and non-corrosive steel, aluminium, copper). Quality of constructions with respect to corrosion problems.

The lecture course may be taken either in the summer or in the winter semester. 2 lecture hours per week are offered (3 graduate credits). The course will be finished with an one hour written examination.

**VORLESUNGSREIHE „MASSTABEFFEKT IN BETON- UND  
STAHLBETONKONSTRUKTIONEN“  
LECTURE COURSE, „ SIZE EFFECT IN CONCRETE AND  
REINFORCED CONCRETE STRUCTURES“**

Prof. Dr.-Ing. habil. Josko Ozbolt (IWB)

Die Vorlesung „Maßstabeffekt in Beton- und Stahlbetonkonstruktionen“ (2 SWS) soll den Hörern einen Überblick über die theoretischen Grundlagen der Bruchmechanik sowie deren Anwendung in Beton- und Stahlbetonkonstruktionen geben. Sie gliedert sich in folgende Themenbereiche:

- Lineare Bruchmechanik
- Nichtlineare Bruchmechanik
- Bestimmung der bruchmechanischen Parameter des Betons
- Anwendung der Bruchmechanik in Beton- und Stahlbetonkonstruktionen
- Maßstabeffekt - Einfluss der Bauteilgröße auf: Festigkeit, Duktilität, erforderliche Mindestbewehrung und erforderliche konstruktive Bewehrung von Stahlbetonbauteilen
- Praktische Beispiele: Biegebalken aus Beton und Stahlbeton, Schubversagensart (schlanke und gedrungene Balken mit und ohne Schubbewehrung), Torsion, Befestigungselemente.

Auf Grundlage der Vorlesung können anschließend Seminar- und Diplomarbeiten durchgeführt werden.

**Literatur:**

**Karihaloo, B.L. (1994).** Fracture Mechanics & Structural Concrete. Concrete Design and Construction Series.

**Ozbolt, J. (1995).** Maßstabeffekt und Duktilität von Beton- und Stahlbeton- Konstruktionen. Habilitationsschrift, Universität Stuttgart.

The lecture course „Size effect in concrete and reinforced concrete structures“ (2 lecture hours per week) offers the students an overview through the theory of fracture mechanics and it's application to concrete and reinforced concrete structures. The lectures consist of the following topics:

- Linear fracture mechanics
- Non-linear fracture mechanics
- Measuring of concrete fracture parameters
- Use of fracture mechanics in concrete and reinforced concrete structures
- Size effect - influence of the structural size on: structural resistance, ductility, minimum reinforcement requirement and distributed reinforcement.
- Examples from the engineering practice: beam failing in bending - minimum reinforcement requirement - ductility - minimum distributed reinforcement, diagonal shear failure of slender and deep beams with and without shear reinforcement, torsion and examples from anchorage technology.

In the framework of the lectures the students may take the part in a seminar work or in a final graduate work in the field of the application of fracture mechanics to concrete and reinforced concrete structures.

## VORLESUNGSREIHE „NUMERISCHE MODELLIERUNG VON STAHLBETON“ LECTURE COURSES „NUMERICAL MODELLING OF REINFORCED CONCRETE“

Prof. Dr.-Ing. habil. Josko Ozbolt (IWB)

Die Studierenden, und zwar insbesondere solche, die später als konstruierende Ingenieure tätig werden, sollen die Grundlage über die numerische Modellierung von Stahlbeton kennen lernen (2 SWS). Die gewonnenen Kenntnisse werden die Anwendung von nichtlinearen FE Programmen in der Praxis wesentlich erleichtern. Die Vorlesung gliedert sich in folgende Themenbereiche:

- Einleitung
- Betoneigenschaften
- Grundlage der Bruchmechanik des Betons
- Plastizitätsmodelle für Beton
- Schädigungsmodelle für Beton
- Modelle der verschmierten Risse
- „Microplane“ Modell
- Regularisierungsmethoden und neue Entwicklungen
- Modellierung der Bewehrung und des Verbundes
- Grundlage für die Modellierung von Transportprozessen in Beton
- Gekoppelte Modelle für Beton
- Beispiele
- Zusammenfassung

Auf Grundlage der Vorlesung können anschließend Seminar- und Diplomarbeiten durchgeführt werden.

### Literatur:

**Jirasék, M., and Bažant, Z. P. (2001).** Inelastic Analysis of Structures. John Wiley & Sons Ltd.

**Karihaloo, B.L. (1994).** Fracture Mechanics & Structural Concrete. Concrete Design and Construction Series.

**Ožbolt, J. (1995).** Maßstabeffekt und Duktilität von Beton- und Stahlbeton- Konstruktionen. Habilitationsschrift, Universität Stuttgart.

The lecture „Numerical modelling of reinforced concrete“ (2 lecture hours per week) offers the students an overview through the different material models and procedures that can be used in the non-linear numerical analysis of concrete and reinforced concrete structures made. In the framework of the course the following topics are discussed:

- Introduction
- Properties of concrete
- Basics of linear and non-linear fracture mechanics
- Plasticity based models for concrete
- Damage mechanics based models for concrete
- Smeared crack models
- „Microplane“ Models
- Objectivity of the analysis and regularisation methods
- Modelling of reinforcement and bond between concrete and reinforcement
- Basics for the modelling of transport processes in concrete
- Coupled models – thermo-hygro-mechanical models for concrete
- Examples
- Summary

In frame of the lecture it is possible to workout a seminar work or final graduate work.

**VORLESUNGSREIHE „INGENIEURWERKSTOFFE I“**  
**LECTURE COURSE „ENGINEERING MATERIALS I“**  
**[COMMAS – C7]**

Prof. Jan Hofmann

In dem internationalen Masterstudiengang „COMMAS“ (Pflichtmodul) und Bauingenieurwesen (Ergänzungsmodul) wird die Vorlesung „Konstruktions-Werkstoffe I“ mit einem Umfang von insgesamt 2 SWh / 3 Leistungspunkten angeboten.

Die Vorlesung beinhaltet die großen Themengebiete Metalle, Beton und Böden. Die Vorlesungsreihe zum Thema Beton (5 Vorlesungen) wird von unserem Institut betreut.

Folgende Themen werden bzgl. Beton abgedeckt:

- Eigenschaften von Beton
- Eigenschaften von Beton bei Druckbelastung
- Eigenschaften von Beton bei Zugbelastung
- Zeitabhängiges Verhalten
- Sonderbetone

Durch die Vorlesungsreihe sollen die Studenten ein tiefes Verständnis über die Eigenschaften von Beton, ein heterogener und ziemlich brüchiger Werkstoff, unter Zug- und Druckbelastung erlangen. Sie lernen die Einflüsse von Prüfbedingungen, leichten Zuschlägen und Fasern auf die Betoneigenschaften zu verstehen.

Die Vorlesung kann im Wintersemester gehört werden und wird durch eine zweistündige schriftliche Prüfung abgeschlossen.

The lecture course “Engineering Materials I” is offered for students studying the International Master program “COMMAS” (compulsory module) and civil engineering (elective module). The lectures are offered with a total of 2 lecture hours per week (3 graduate credits).

The course covers a big range of subjects on metals, concrete and soils. The lecture series on concrete (5 lectures) is provided by our institute.

The following topics concerning concrete are covered:

- Properties of concrete
- Behaviour of concrete under compressive loading
- Behaviour of concrete under tensile loading
- Time dependent behaviour
- Special concretes

The lecture series provides students with a deep understanding of the behaviour of concrete, a very heterogeneous and rather brittle material, under compression and tension loading. Influence of test conditions, light weight aggregates and fibres on concrete properties will be explained.

The lecture course is conducted in winter semester and will be finished by a written two hour examination

**VORLESUNGSREIHE „INGENIEURWERKSTOFFE – BETON“**  
**LECTURE COURSE “ENGINEERING MATERIALS - CONCRETE“**  
**[COMMAS – E7-2]**

Prof. Dr.-Ing. habil. Josko Ozbolt (IWB)

Dieser Kurs gehört zum „Master of Science“ Studiengang in Computerunterstützter Mechanik von Materialien und Strukturen (COMMAS). Der Kurs hat zwar den gleichen Titel wie COMMAS C7 – „Ingenieurwerkstoffe – Metall, Beton, Boden“, aber E7-2 behandelt die numerische Modellierung von quasi-spröden Materialien, wobei C7 ein reiner Werkstoffkunde Kurs ist. Der Kurs E7, der früher gemeinsam vom Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB), dem Institut für Geotechnik (IGS) und der Materialprüfungsanstalt (MPA) betreut wurde, ist in den vergangenen Jahren in drei getrennte Wahlkursen (E7-1, E2-7, E7-3) unterteilt wurden.

E7-2 handelt von der detaillierten 3D numerischen Modellierung von quasi-spröden Materialien. Nach einer Einführung in lineare Bruchmechanik und nichtlineare Bruchmechanik werden die Grundlagen der Schädigungs-, Plastizitäts-, Verschmiert- und Diskretriss und Mikroplanetheorie dargestellt. Die Anwendung dieser Theorien im Bereich der Betone wird in diesem Zusammenhang besonders angesprochen. Außerdem wird über die speziellen Methoden für die Modellierung von quasi-spröden Materialien berichtet, die im Rahmen einer FE Analyse zu einer realistischen Modellierung solcher Materialien führen und die, die Grundlagen der nichtlinearen Bruchmechanik berücksichtigen.

This course is part of the Master of Science Program in Computational Mechanics of Materials and Structures (COMMAS). The course has the same title as COMMAS C7 – “Engineering Materials – Metal, Concrete, Soils”, however, E7-2 focuses on aspects of computational modeling of quasibrittle materials, whereas C7 is purely a material science course. The course E7, which was previously jointly taught by the Institute of Construction Materials (IWB), the Institute of Geotechnical Engineering (IGS) and the State Material Testing Institute (MPA), was split into three separate elective courses (E7-1, E7-2, E7-3) in the last years.

In E7-2 the development of computational material models for detailed 3D analysis of quasibrittle materials is treated. After beginning with a general introduction to linear and nonlinear fracture mechanics, material models such as damage, plasticity, smeared and discrete crack and microplane are discussed. Strong emphasis is placed on the application of these models to concrete. The topics of regularization techniques and adaptive remeshing are also discussed.

Table 6: *Inhalt der Vorlesung / Course Outline*

Introduction and course organization	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Course organization and outline</li> <li>* Quasibrittle materials and motivation for nonlinear analysis</li> </ul>
Concrete material properties	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Review of concrete behavior in tension and compression</li> <li>* Extension to 3D</li> </ul>
Modeling of concrete and fracture mechanics	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Basic frameworks for modeling of quasibrittle materials</li> <li>* Continuum / Combination continuum-discontinuum / Discrete</li> <li>* Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)</li> <li>* Griffith &amp; Irwin</li> <li>* Nonlinear Fracture Mechanics (NLFM)</li> <li>* Discrete crack concept / Smeared crack concept</li> <li>* Size effect</li> </ul>
Plasticity models for concrete	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Associated vs. non-associated flow</li> <li>* Failure surfaces for quasibrittle materials</li> </ul>
Damage mechanics	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Simple isotropic damage</li> <li>* Mazar's damage model for concrete</li> <li>* Other damage models</li> </ul>
"The Smeared Crack Models"	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Fixed / Multi-direction fixed / Rotating</li> <li>* Stress locking</li> </ul>
Microplane theory	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Concept and fundamental equations</li> <li>* Relaxation of kinematic constraint / Anisotropy / Model validation</li> </ul>
Objectivity of the analysis (regularization) and new developments	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Crack band and higher order methods</li> <li>* Adaptive meshing</li> </ul>
Course summary	

## VORLESUNGSREIHE „BAUSTOFFE“ LECTURE COURSE „BUILDING MATERIALS“

Prof. Jan Hofmann

In dem internationalen Studiengang „Infrastrukturplanung“ wird im 3. Semester die Vorlesung „Baustoffe“ als Ergänzungsmodul mit einem Umfang von insgesamt 4 SWh / 6 Leistungspunkten angeboten.

Für das gesamte Spektrum der im Bauwesen verwendeten Baustoffe werden die wichtigsten Grundlagen hinsichtlich der charakteristischen Eigenschaften unter Berücksichtigung ihrer praktischen Bedeutung behandelt.

Folgende Themen werden abgedeckt:

- Bindemittel
- Beton
- Stahl
- Holz
- Mauerwerk
- Kunststoffe
- Korrosion im Stahlbau und Korrosionsschutz
- Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen

Die Vorlesungsreihe soll den Studierenden ein grundlegendes Wissen im Hinblick auf das Gebrauchs- und Versagensverhalten sowie die Dauerhaftigkeit der damit erstellten Konstruktionen geben.

Die Vorlesung kann im Wintersemester gehört werden und wird durch eine einstündige schriftliche Prüfung abgeschlossen.

The optional lecture course “building materials” is offered for students studying the International Master program “Infrastructure Planning”. The lectures are offered for students in the third semester of the master program with a total of 4 lecture hours per week (6 graduate credits).

For the entire spectrum of the materials used in civil engineering the most important basics concerning the properties of building materials and their application in practice are taught.

The following topics are covered:

- binding materials
- concrete
- steel
- timber
- masonry
- plastics
- corrosion of steel structures and corrosion protection
- durability of reinforced concrete structures

After visiting the lecture series, the students will have a basic knowledge about the load-deformation behaviour at serviceability and ultimate limit state as well as the durability aspects.

The lecture course can be visited in the winter semester and will be finished with an one hour written examination.

**EINFÜHRUNG IN DIE INFORMATIK  
INTRODUCTION TO INFORMATICS**

Dr.-Ing. J. Schwarte / Dipl.-Ing.(BA) S. Bachmaier, MSc

Die Veranstaltung „Einführung in die Informatik“ wird regelmäßig im Wintersemester für Hörer des ersten Fachsemesters im BSc-Studiengang Bauingenieurwesen angeboten. Seit dem Sommersemester 2010 findet regelmäßig im Sommersemester eine inhaltsgleiche Vorlesungsveranstaltung mit dem Titel „Informatik“ für Hörer des vierten Semesters im BSc-Studiengang Umweltschutztechnik statt. Die Vorlesungen und Übungen werden ergänzt durch häusliche Gruppenübungen. Diese Gruppenübungen werden unter Nutzung des vom RUS (Rechenzentrum der Universität Stuttgart) bereitgestellten Online Systems Ilias organisiert.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die in den Vorlesungen behandelten Themen:

The course „Introduction to Informatics“ is offered every winter semester for students of civil engineering in their first semester. Since summer 2010 a course with identical content called “Informatics” is offered every summer semester for students of environmental protection technology in their fourth term.

The lectures and exercises are additionally supplemented by virtual group exercises, that are organized using the online cooperation software system Ilias which is facilitated by RUS (local computing centre of the University of Stuttgart).

The following tabel shows the topics covered by the lectures:

Tabelle / Table: *Themen und Stichworte / Topics and Keywords*

Thema / Topic	Stichworte /Keywords
Algorithmen und Turing-Maschinen	Bsp.: Euklidischer Algorithmus; Berechenbarkeit; Halteproblem
Datenstrukturen	Graph, Baum; Liste; Adjazenzmatrix, Inzidenzmatrix, „Königsberger Brückenproblem“; Netzplan; Petry-Netze
Computer	Geschichtliche Entwicklung; Von-Neumann-Rechner; Betriebssysteme; Dateien und Dateisysteme; Kompatibilität
Programmiersprachen	Maschinenorientierte Programmierung; Assembler; Interpreter; Compiler; nichtprozedurale Sprachen; Programmierparadigmen
Programmierprinzipien	„Top-Down-Methode“; Rekursion; Iteration; Backtracking-Verfahren; Heuristik; „Teile und Herrsche“; Simulation
Programmentwicklung mit Matlab	Interaktive Nutzung, Erstellung von M-Dateien, Schleifen, Verzweigungen, Funktionen
Vom Algorithmus zum Programm	Unterprogramme; Prozeduren; Funktionen; Ausdrücke; Operatoren; Beispiele in JavaScript
Tabellenkalkulation	Geschichtliche Entwicklung; Bsp.: Massenermittlung
Sicherheit und Datenschutz	Datenschutz; Viren; Zertifizierung; Redundanz; Kryptographie
Ausblick	Numerische Methoden; FEM; graphische Datenverarbeitung; CAD; CIM; Projektmanagement; AVA

## VORLESUNGSREIHE “WERKSTOFFKUNDE“ (BACHELOR) LECTURE COURSE “WERKSTOFFKUNDE” (BACHELOR)

von/by: Dr.-Ing. Hariri  
Dr.-Ing. Schwarte

Im Bachelorstudiengang Umweltschutztechnik wird ab dem 1. Semester die vorlesungsreihe „Werkstoffkunde“ als Wahlpflichtveranstaltung mit einem Umfang von insgesamt 2 SWh angeboten.

Für das gesamte Spektrum der im Bauwesen verwendeten Werkstoffe werden die Grundlagen hinsichtlich der charakteristischen Eigenschaften unter Berücksichtigung ihrer praktischen Bedeutung behandelt. Als Voraussetzung für die angemessene Wahl der Werkstoffe, im Hinblick auf das Gebrauchs- und Versagensverhalten sowie die Dauerhaftigkeit der damit erstellten Konstruktionen bietet diese Vorlesungsreihe im Rahmen des Umweltschutztechnikstudiums einen gute Möglichkeit zur Kenntnissvertiefung an.

Vorträge zu einzelnen Themengebieten werden von drei Referenten aus der Forschung gehalten.<sup>1</sup>

Die Vorlesungsreihe beginnt mit dem Themengebiet „Allgemeine Grundlagen“, welches eine Einführung in bautechnische Bestimmungen, Bauchemie, Materialparameter und Modellrheologie beinhaltet.

Danach folgt die Vorstellung des Werkstoffes Metall, in all seinen für das Bauwesen relevanten Ausführungen. Ausgehend von der Herstellung über Aufbau, Eigenschaften und Fügetechnik werden Stahl und Gusseisen behandelt. Ergänzend dazu werden auch Nichteisenmetalle mit ihren Eigenschaften

The undergraduate lecture course „Werkstoffkunde“ is a compulsory elective course for all students studying environmental protection technology. The lectures are offered for students in all semesters with a total of 2 lecture hours per week.

The basics for the whole range of materials used in engineering will be taught. As the knowledge of material properties is an important prerequisite for the proper use of materials in construction this course offers a good possibility to deepen knowledge.

The lecturers are from the fields of research.<sup>1</sup>

The lectures start with the basics that give an introduction into technical construction regulations, material characteristics as well as rheology.

This is followed by the presentation of steel and the relevant details for the construction industry. From the manufacturing to the assembling, techniques of joining and properties of steel and cast iron are explained in detail. Additional to that, non-ferrous metals and their properties are also taught. The topics corrosion and corrosion protection include the corrosive hazards as well as the safety measures which convey the principle of durability for the covered materials, e. g. concrete, steel and non-ferrous metals.

The organic material topic is focused on wood, polymers and bitumen. The complex of mineral materials begins with the topics of

---

<sup>1</sup> Referenten/speakers: Dr.-Ing. Karim Hariri (MPA), Dr.-Ing. Joachim Schwarte, Dipl.-Ing. Christian Fischer (IWB)

behandelt. Die Themen Korrosion und Korrosionsschutz beinhalten werkstoffübergreifend, von Beton über Stahl und Nichteisenmetalle, die korrosiven Gefährdungen sowie Schutzmaßnahmen, die wiederum den Grundsatz der Dauerhaftigkeit vermitteln.

Bei den organischen Werkstoffen liegen die Schwerpunkte auf den Themengebieten Holz, Kunststoffe und Bitumen.

Der Komplex der mineralischen Werkstoffe beginnt mit dem Thema Glas. Vorbereitend auf den Themenkomplex Beton werden zuerst die mineralischen Bindemittel, im Wesentlichen Gips, Kalk, und Zement, sowie die Gesteinskörnungen behandelt. Mit diesen Grundlagen ausgestattet, werden die Studenten in das Schwerpunktthema Beton eingeführt. Bei der Behandlung der Frisch- und Festbetoneigenschaften wird bereits Wert auf eine Sensibilisierung für Dauerhaftigkeitsaspekte gelegt. Weiterführend von Dauerhaftigkeit und abschließend zur Vorlesungsreihe wird das Thema Nachhaltigkeit und Ökologie erläutert.

glass. Preliminary to the topic of concrete mineral binders, especially gypsum, lime and cement as well as aggregates are discussed. Equipped with this background, the students are taught in the major topics of concrete. When dealing with the topics of fresh concrete and hardened concrete, the students are already aware of the aspects of durability. Related to durability, the lectures finish with the discussion of ecology and sustainability.

# GRUNDLAGEN DER ANWENDUNG VON SUPERABSORBIERENDEN POLYMEREN IN NORMAL- UND HOCHFESTEM BETON

## BASIC PRINCIPLES FOR THE APPLICATION OF SUPERABSORBENT POLYMERS IN NORMAL AND HIGH STRENGTH CONCRETE

von/by: Alexander Assmann

### Einleitung

Superabsorbierende Polymere (SAP) können als interne Wasserquellen zur inneren Nachbehandlung des Betons verwendet werden. Trocken zugegeben entziehen sie dem Frischbeton während des Mischvorgangs ein Vielfaches ihres Eigengewichts an Porenlösung, das sie während der Hydratation des Zements wieder abgeben. Infolge dessen kann bei Betonen mit niedrigen Wasser-Zement-Werten ( $w/z$ ), z.B. im Bereich von 0,20 - 0,35, das innere Austrocknen durch zusätzliche Wasserquellen verhindert und die damit verbundene autogene Schwindverformung stark reduziert werden. Des Weiteren wird eine Erhöhung des Hydratationsgrades erreicht.

Größe und Anzahl der luftgefüllten Hohlräume die nach Austrocknen der SAP zurückbleiben, sind abhängig von der Sieblinie der trockenen Partikel, ihrer Wasseraufnahmekapazität und der Zugabemenge. Bei geeigneter Wahl der SAP-Eigenschaften lassen sich Poren in den Beton einbringen, die vergleichbar mit der Wirkung von Luftporenbildnern den Frost-Taumittelwiderstand des Betons erhöhen.

Im Folgenden werden einige Anwendungsbereiche für SAP in Betonen mit  $w/z$ -Werten von 0,36 - 0,50 näher erläutert.

### Allgemeine Grundlagen

Ein weit verbreitetes Modell zur Beschreibung der Phasenverteilung im hydratisierenden Zementleim ist das so genannte Powers Modell [1]. Jensen und Hansen [2] legten das Modell neu aus, um die Vorgänge der inneren Austrocknung und den Einfluss der inneren Wasserquellen zu veranschaulichen.

### Introduction

Superabsorbent polymers (SAPs) can be used for water-entrainment in concrete in order to provide internal curing. When adding them dryly to the fresh concrete during the mixing process, they absorb many times more pore solution than their own weight. Later on the water is released due to hydration of cement. As a consequence, self-desiccation of concretes with low water-cement ratios ( $w/c$ ), e.g. in the range 0.20 - 0.35, is prevented due to the additional water inclusions. Autogenous deformations which accompany self-desiccation can be reduced substantially. Furthermore the maximum degree of hydration gets increased.

Size and number of the air-filled cavities, which remain when SAPs are dried out, depend on the size distribution, the water absorption capacity and the added amount of the dry particles. As a result of adequate chosen properties of SAP, pores are formed that can improve the freeze-thaw resistance of concrete similar to pores generated by ordinary air-entraining agents (AEA).

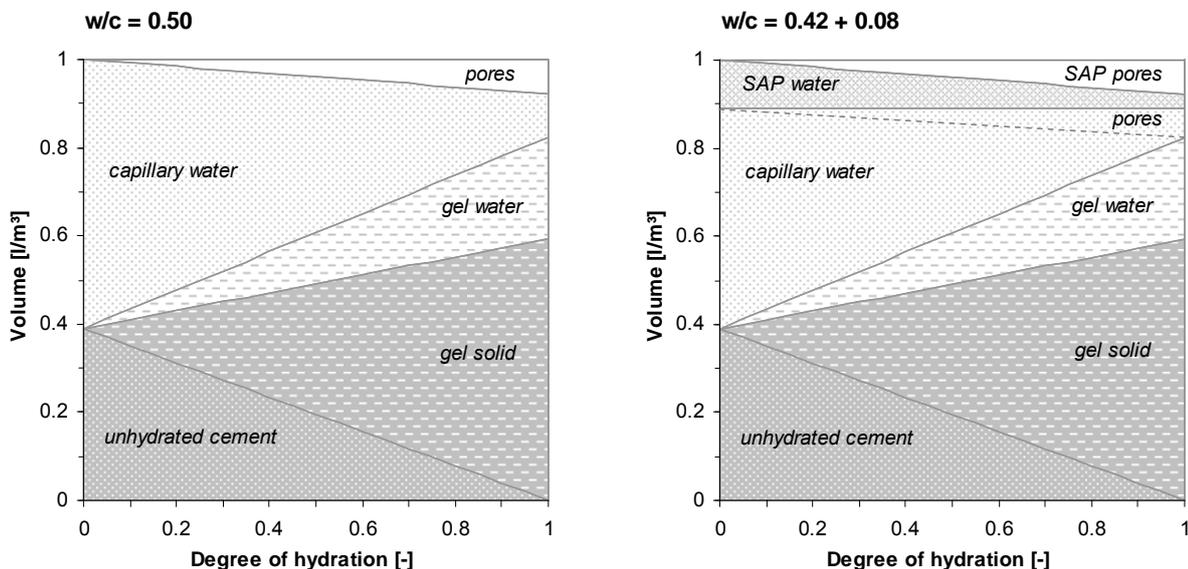
Some fields of application for SAP in concretes with  $w/c$  ratios in the range 0.36 - 0.50 will be illustrated in the following.

### General principles

A widely discussed model describing the volumetric phase distribution of hardening cement paste is the so called Powers model [1]. Jensen and Hansen [2] formulated a reinterpretation of the model in order to explain the phenomenon of self-desiccation and the basics of water-entrainment.

Nach vollständiger Hydratation bindet 1 g Portlandzement etwa 0,23 g Wasser chemisch. Die Hydratationsprodukte die entstehen, nehmen ein geringeres Volumen ein als das Ausgangsvolumen von Wasser und Zement (chemisches Schwinden). Bei autogener Lagerung, d.h. es ist kein Feuchtigkeitsaustausch zwischen dem hydratisierenden Zementleim und der Umgebung möglich, entstehen dadurch luftgefüllte Mikroporen. An der Oberfläche der Hydratationsprodukte werden etwa 0,19 g Wasser je g reagierten Zements physikalisch gebunden. Der restliche Teil des Wassers liegt als freies Kapillarwasser vor. Somit werden also 0,42 g Wasser benötigt, damit 1 g Zement vollständig hydratisieren kann. Werden höhere w/z-Werte gewählt, z.B. 0,50 wie in Abbildung 1 dargestellt, ist auch nach vollständiger Hydratation überschüssiges Wasser in Form von Kapillarporen vorhanden. Dieses kann bei Zugabe von SAP durch deutlich größere Wassereinschlüsse ersetzt werden, sodass das Kapillarporensystem dem eines Zementleims mit w/z = 0,42 entspricht.

After complete hydration, 1 g of Portland cement can bind approximately 0.23 g of water chemically. The hydration products formed within this process have a smaller volume than the volume of water and cement unreacted (chemically shrinkage). In sealed condition, that means exchange of moisture between the hydrating cement paste and the environment is impossible, air-filled micropores are created. At the surface of the hydration products approximately 0.19 g of water is bound physically per 1 g of completely hydrated cement. The remaining part of the water is present as free capillary water. Thus, 0.42 g of water is needed in order to reach full hydration of 1 g of cement. If higher w/c ratios are chosen, e.g. 0.50 as done in figure 1, excess water in the form of capillary pores will remain even after hydration is completed. Due to addition of SAP this water can be replaced by significantly larger water inclusions. As a consequence, the resulting capillary pore system is equivalent to the one of a plain cement paste with w/c = 0.42.



**Abbildung 1:** Volumenverteilung der Zementleimphasen während der Hydratation bei autogener Lagerung. Links: Reiner Zementleim mit  $w/z = 0,50$ . Rechts: Zementleim mit Wassereinschlüssen durch SAP (0,33 M.-% bezogen auf den Zementgehalt) und  $w/z = 0,42+0,08$ .

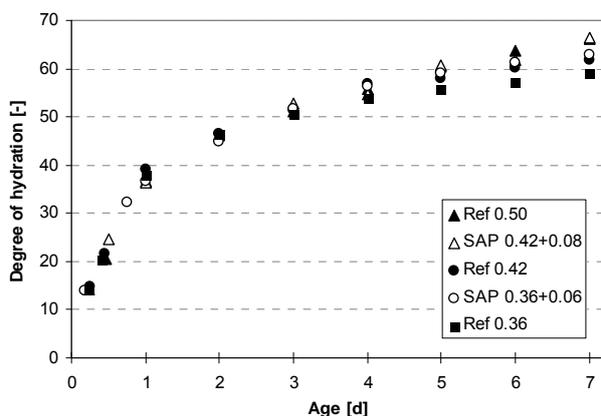
**Figure 1:** Volumetric phase distribution of cement paste during sealed hydration. Left: plain cement paste with  $w/c = 0.50$ . Right: water-entrained cement paste (0.33 % SAP by mass of c) with  $w/c = 0.42+0.08$ .

### Einfluss der SAP auf die Hydratation

Theoretisch betrachtet erreicht ein Zementleim ohne SAP den gleichen Hydratationsgrad wie ein Zementleim mit SAP, vorausgesetzt, dass die Gesamtwassermenge gleich ist. Um den Hydratationsgrad über die Zeit zu bestimmen, wurden bei 20°C versiegelt gelagerte Zementsteinproben verschiedenen Alters mittels thermogravimetrischer Analyse (TGA) untersucht. Dabei wurde der Anteil des chemisch gebundenen Wassers durch Austreiben bei Temperaturen zwischen 105°C und 1050°C bestimmt. Mit der Annahme, dass 1 g des verwendeten Portlandzements (CEM I 42,5 R) nach vollständiger Hydratation 0,23 g Wasser chemisch bindet, kann der Hydratationsgrad nach Gleichung (1) berechnet werden:

$$\alpha = [(\Delta m_s - \Delta m_c) / 0.23] / c$$

Der Hydratationsgrad  $\alpha$  wird hier definiert als das Gewichtsverhältnis aus hydratisiertem Zement zur vorhandenen Gesamtmenge an Zement. Dabei steht  $\Delta m_s$  für den Masseverlust der Probe [%] zwischen 105°C und 1050°C,  $\Delta m_c$  für den Glühverlust des reinen Zements [%] im selben Temperaturbereich und  $c$  für den Massenanteil des Zements [%] in der Probe.

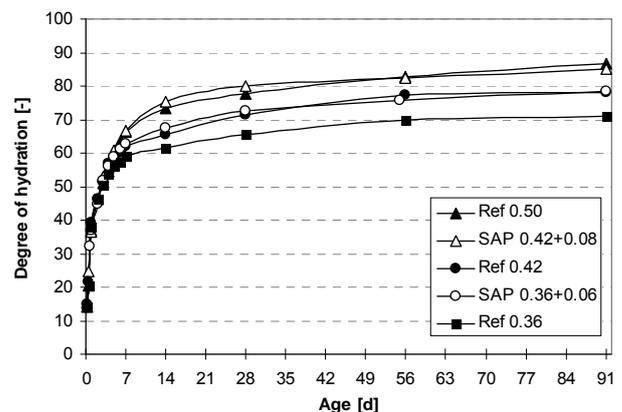


### Influence of SAP on the hydration

From a theoretical point of view, the maximum degree of hydration is the same for a plain cement paste and a water-entrained cement paste, provided that the total amount of water is the same. For the determination of the development of the degree of hydration, sealed cement paste samples of varying age stored at 20°C were investigated by thermogravimetric analysis (TGA). In doing so, the amount of chemically bound water was driven off by heating the sample at temperatures of 105°C and 1050°C. Under the assumption that 1 g of the used Portland cement (CEM I 42.5 R) can bind 0.23 g water chemically when reacted completely, the degree of hydration can be calculated by equation (1):

$$(1)$$

In this context the degree of hydration  $\alpha$  is defined as the weight ratio of hydrated cement and existing total amount of cement. Further  $\Delta m_s$  [%] is the weight loss of the sample between 105°C and 1050°C,  $\Delta m_c$  [%] is the loss on ignition of the plain cement when exposed to the same temperatures and  $c$  [%] is the weight fraction of cement in the sample.



**Abbildung 2:** Entwicklung des Hydratationsgrads  $\alpha$  von Zementleim mit unterschiedlichen  $w/z$ -Werten bei 20°C und autogener Lagerung. Links:  $\alpha$  bis zum Alter von 7 Tagen. Rechts:  $\alpha$  bis zum Alter von 91 Tagen.

**Figure 2:** Degree of hydration  $\alpha$  of sealed cement pastes with different  $w/c$  ratios stored at 20°C. Left:  $\alpha$  up to 7 days. Right:  $\alpha$  up to 91 days.

Abbildung 2 zeigt die ermittelten Verläufe der Hydratation von fünf Zementleimen mit unterschiedlichen w/z-Werten bis zu einem Alter von 7 bzw. 91 Tagen. Es ist deutlich zu erkennen, dass ab einem Alter von 2 Tagen die Hydratation mit sinkendem w/z-Wert langsamer abläuft. Des Weiteren sieht man, dass der Verlauf der Hydratationskurven im betrachteten Zeitraum tatsächlich nur von der Menge des Gesamtwassers abhängt und nicht davon, ob das Wasser frei oder anfangs in SAP gespeichert vorliegt. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse dieser Versuchsreihe findet sich in [3].

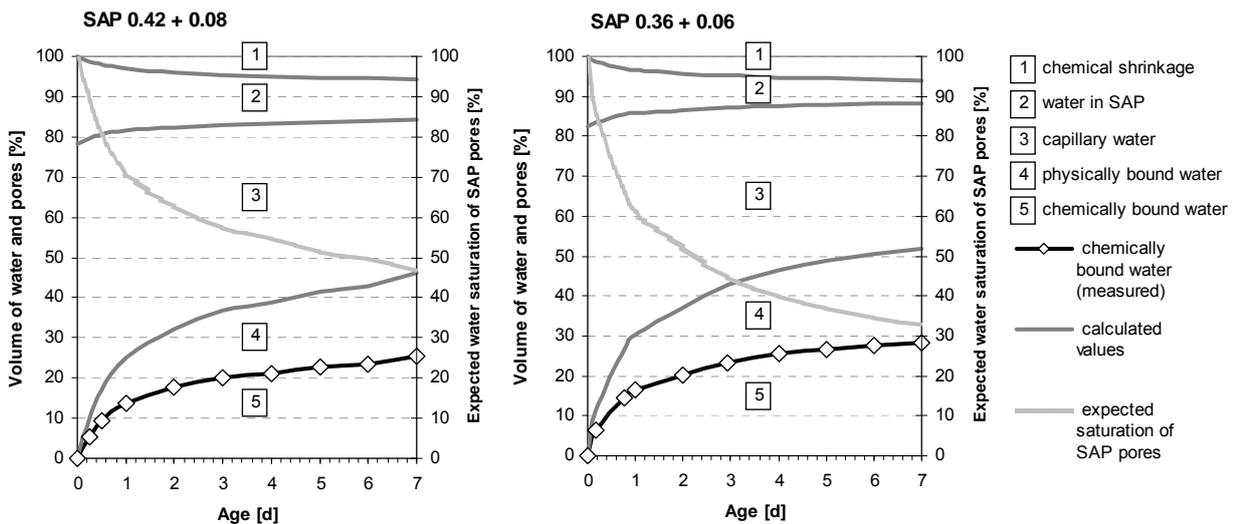
Figure 2 shows the determined hydration curves of five cement pastes with varying w/c ratios up to ages of 7 and 91 days respectively. Obviously after 2 days the hydration passes off slower when decreasing the w/c ratio. Further, it can be seen that the hydration actually depends on the total amount of added water, at least for the observed time period. It means that it doesn't matter whether the water is added ordinarily or the water accessible for hydration is stored initially by SAP. A detailed description of the results is presented in [3].

**Annahmen zur Wasserabgabe der SAP**

Auf Basis des experimentell ermittelten Anteils an chemisch gebundenem Wasser, können die Anteile an physikalisch gebundenem und freiem Wasser berechnet werden. Geht man davon aus, dass chemisches Schwinden zur Entleerung der SAP-Poren führt, lässt sich die Sättigungskurve der SAP-Poren angeben. In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Berechnung für die beiden mit SAP versetzten Zementleime bis zu einem Alter von 7 Tagen dargestellt.

**Assumptions on the water supply by SAP**

The experimentally determined volume fractions of the chemically bound water can be used for the calculation of the volume fractions of physically bound water and free water. The assumption that SAP pores get emptied due to chemical shrinkage leads to the saturation curve of the SAP pores. Figure 3 presents the results of the calculations for the two water-entrained cement pastes up to an age of 7 days.



**Abbildung 3:** Volumenanteile von Wasser und Poren im Zementleim mit innerer Nachbehandlung durch SAP während der ersten 7 Tage bei autogener Lagerung. Links: w/z = 0,42+0,08. Rechts: w/z = 0,36+0,06.

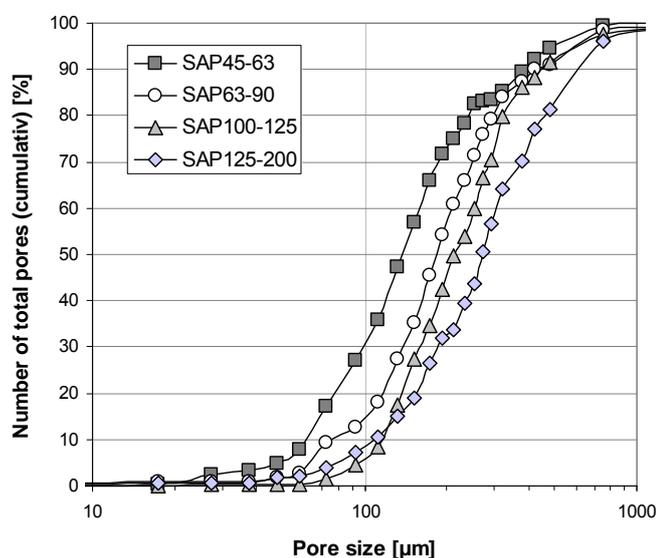
**Figure 3:** Volumetric distribution of water and pores in cement paste with water-entrainment by SAP during the first 7 days of sealed hydration. Left: w/c = 0.42+0.08. Right: w/c = 0.36+0.06.

### Porengrößenverteilung

Anhand der Sieblinie der trockenen Partikel und deren Wasseraufnahmekapazität lassen sich die Größen der kugelförmigen Wassereinschlüsse im Beton abschätzen. Die nach deren Austrocknung zurückbleibenden Makroporen lassen sich durch Porenzählung auswerten. Abbildung 4 zeigt die Größenverteilung der Porenanzahl von vier Betonen mit unterschiedlich gewählten Partikelsieblinien. Die hier eingesetzten SAP haben eine Wasseraufnahmekapazität von rund 24 g/g. Aufgrund des Quellvorgangs nimmt die Größe der SAP um mehr als das dreifache zu.

### Pore size distribution

On the basis of the size distribution of the dry particles and their water absorption capacity, the size of the spherical water-filled cavities can be estimated. The macropores, which remain in concrete after the SAPs dried out, can be evaluated by pore counting. Figure 4 shows the size distribution of the number of pores obtained from four concretes containing different size ranges of dry SAP particles. The type of SAP used here has a water absorption capacity of 24 g/g. Due to swelling the size of the SAP grows by more than three times.



**Abbildung 4:** Größenverteilung (kumulativ) der gezählten Poren im Beton. Die Bezeichnung der Betone steht für die Sieblinienbereiche der verwendeten trockenen SAP-Partikel in  $\mu\text{m}$ .

**Figure 4:** Cumulative size distribution of counted pores in concrete. The designation of the concretes represents the size range of the sieved dry SAP particles in  $\mu\text{m}$ .

### Frost-Tausalz widerstand

Um den Einfluss der SAP-Poren auf den Frost-Tausalzwiderstand von Beton zu ermitteln, wurden 10 Betonmischungen nach dem CDF-Prüfverfahren [4] untersucht. Bei diesem Verfahren werden fünf in Tausalzlösung vorgesättigte Betonproben mit einer Prüffläche von je  $150 \times 150 \text{ mm}^2$  Temperaturen von  $+20^\circ\text{C}$  bis  $-20^\circ\text{C}$  ausgesetzt. Ein Frost-Tauzyklus dauert dabei 12 Stunden. Nach 14

### Freeze-thaw resistance

In order to investigate the effect of SAP pores on the freeze-thaw resistance of concrete, 10 concrete mixes were tested according to the CDF-test method [4]. This method uses five concrete specimens, each with a test surface of  $150 \times 150 \text{ mm}^2$ , which were previously put in a water bath with deicing salt before exposing them to temperatures between  $+20^\circ\text{C}$  and  $-20^\circ\text{C}$ . Each freeze-

Tagen ist der Versuch beendet. Die Abwitterungsmengen der Betonproben werden während des Versuchs regelmäßig bestimmt.

Zwei der hier untersuchten Betone enthielten Luftporenbildner (AEA) und hatten Luftgehalte von rund 6,0 bis 6,5 Vol.-%. Die verwendeten w/z-Werte von 0,50 und 0,40 entsprachen denen der beiden Referenzbetone ohne porenbildende Zusätze. Die Mischungen mit Superabsorbent (SAP 1-6) hatten einen w/z-Wert von 0,50. Während Form und Größenverteilung der zugegebenen Partikel variierte, entsprach das zusätzlich eingebrachte Porenvolumen bei allen sechs Betonen etwa 3,2 Vol.-%. Damit lag das Gesamtporenvolumen knapp unter dem der Betone mit Luftporenbildnern.

Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Abwitterung der untersuchten Betone sowie deren Festigkeitsentwicklung. Man sieht, dass die Zugabe von SAP den Frost-Tausalzwiderstand deutlich steigern kann. Dabei weisen die mit SAP versetzten Betone höhere Festigkeiten auf als die Betone mit gewöhnlichen Luftporenbildnern.

Die Ergebnisse einer zweiten Versuchsreihe sind in [5] veröffentlicht.

thaw cycle lasts 12 hours. The test ends after 14 days. The scaling of the specimens is determined regularly.

Two of the concretes tested in this series contained air-entraining agents (AEA) and had air contents of about 6.0 to 6.5 Vol.-%. Their w/c ratios of 0.50 and 0.40 corresponded to the w/c ratios of the two reference concretes which had no air-entraining additives. Mixtures with SAP (SAP 1-6) had a w/c ratio of 0.50. Shape and size of the added particles varied whereas the resulting additional pore volume was the same for all six mixtures amounting to 3.2 Vol.-%. As a consequence, the total pore volume of mixtures with SAP was a little bit smaller than for mixtures with air-entraining agents.

Figure 5 shows the scaling of the tested concretes as well as the development of the compressive strength. It can be seen that adding SAP can enhance the freeze-thaw resistance of concrete significantly. Further mixtures modified with SAP show higher strengths than concretes with ordinary air-entraining agents.

The results of a second test series are published in [5].

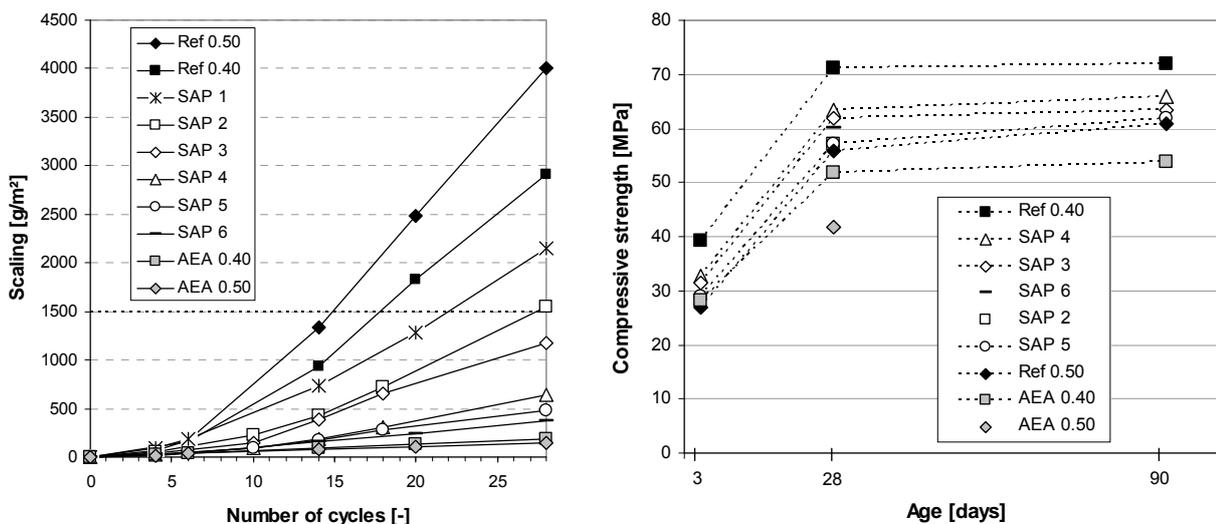


Abbildung 5: Links: Abwitterung während der ersten 28 Zyklen des CDF-Tests. Rechts: Entwicklung der Druckfestigkeit bis zum Alter von 90 Tagen.

Figure 5: Left: Scaling of concrete during the first 28 cycles of CDF-testing. Right: Development of compressive strength up to an age of 90 days.

## Zusammenfassung

Die vorgestellte Anwendung von superabsorbierenden Polymeren als Betonzusatz basiert auf den folgenden zwei Überlegungen: Zum einen können SAP als Wasserspeicher zur inneren Nachbehandlung von hochfestem Beton mit niedrigen w/z-Werten dienen. Dadurch lassen sich autogene Schwindverformungen stark reduzieren. Zum anderen können die nach der Wasserabgabe der SAP zurückbleibenden Makroporen zur Steigerung der Dauerhaftigkeit des Betons, z. B. des Frost-Tausalz widerstandes, gezielt eingesetzt werden. Diese Methode bietet, im Vergleich zur Verwendung herkömmlicher Luftporenbildner, Vorteile aufgrund der geringeren Empfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen. Im Allgemeinen sollten folgende Punkte beim Einsatz der Superabsorber beachtet werden:

- Die trocken zugegebenen SAP lassen sich gleichmäßig verteilt in die Mischung einbringen und nehmen einen definierbaren Teil des Anmachwassers zuverlässig auf.
- Das Kapillarporensystem wird um den Volumenanteil des in SAP gespeicherten Wassers verringert.
- Ob das Zugabewasser frei vorliegt oder in SAP gespeichert ist, hat keinen Einfluss auf die Hydratation.
- Die Ausbildung der Makroporen kann gezielt durch Zugabemenge, Form, Sieblinie und Wasseraufnahme der trockenen Partikel eingestellt werden.

## Ausblick

Der Schwerpunkt der künftigen Arbeit liegt weiterhin auf der Erforschung der SAP als Betonzusatz zur Steigerung der Dauerhaftigkeit. Zudem sollen Versuche an Zementleimen mittels Kernspinresonanzspektroskopie durchgeführt werden, um die Annahmen zur Wasserabgabe der SAP mit experimentell ermittelten Daten vergleichen zu können.

## Summary

The fields of application presented for superabsorbent polymers as concrete additive base on the following two considerations: First, SAP can be served as water sources for internal curing of high strength concrete with low w/c ratios. As a result, autogenous deformations can be reduced remarkably. Second, the macropores that remain after the water stored in SAP is consumed can be used efficiently in order to increase the durability of concrete, e. g. its freeze-thaw resistance. Compared to the use of ordinary air-entraining agents this method offers some benefits concerning its insensibility to environmental impacts. When using superabsorbent polymers, it is generally recommended to take into account the following points:

- Dryly added SAP can be homogeneously distributed in the concrete mix and they reliably absorb a certain amount of the mixing water.
- The capillary pore system is reduced by the volume of water absorbed by SAP.
- The hydration of cement is not affected by whether the water is freely available or stored in SAP.
- The characteristics of the macropores can be adjusted by choosing amount, shape, size distribution and water absorption capacity of the dry particles.

## Outlook

The investigation of SAP in order to serve as concrete additive for the enhancement of durability remains the focus of future activities. Further, examinations with nuclear magnetic resonance on cement paste samples will be performed to provide experimental data for the comparison with assumptions on the water release of SAP.

### Danksagung

Dank gilt in erster Linie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), die im Rahmen zweier Projekte mit den Titeln „Erforschung der Eigenschaften neuer salzstabiler Polymere und Ableitung werkstoffwissenschaftlicher Kenngrößen“ und „Steigerung der Dauerhaftigkeit von Beton durch Zugabe von superabsorbierenden Polymeren“ die vorgestellte Forschungstätigkeit finanziell unterstützt hat.

Der BASF Construction Chemicals, als langjährigem Kooperationspartner, sei für die Bereitstellung von Superabsorbent und die vielfältige weitere Unterstützung gedankt.

Der Schwenk Zement KG sei an dieser Stelle recht herzlich für die großzügige Bereitstellung von Zement gedankt.

### Acknowledgment

First of all, thank applies to the German Research Institute (DFG) which has supported the presented work financially by two research projects named “Investigation of new salt-stable polymers and conduction of material science parameters” and “Increase of the durability of concrete by adding superabsorbent polymers”.

The BASF Construction Chemicals group, our long-term cooperation partner, is thanked for the provision of SAP and further for their manifold support.

The Schwenk Zement KG is gratefully acknowledged for the generous provision of cement.

### Literatur / References

- [1] **Powers, T. C.; Brownyard, T. L. (1948):** *Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste.* In: Bulletin 22 (1948), Research Laboratories of the Portland Cement Association, Chicago.
- [2] **Jensen, O. M.; Hansen, P. F. (2001):** *Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background.* In: Cement and Concrete Research 31 (2001), S. 647-654.
- [3] **Assmann, A.; Reinhardt, H.-W. (2011):** *Influence of water-filled macropore inclusions on the hydration of Portland cement detected by thermogravimetric analysis.* In: International Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering, accepted.
- [4] **RILEM recommendation, RILEM TC-117 FDC (1996):** *CDF-test – Test method for the freeze thaw resistance of concrete with sodium chloride solutions.* In: Materials and Structures 29 (1996), S. 523-528.
- [5] **Reinhardt, H.-W.; Mönnig, S. (2008):** *Ein Zusatzmittel zur Vergrößerung des Frost-Taumittelwiderstandes von normal- und hochfesten Betonen.* In: Betonwerk International, Heft 1 (2008), S. 70-80.

## ZUR VERSCHIEBUNG DER KOPFBOLZEN UNTER ZUGBELASTUNG ABOUT THE DISPLACEMENT OF HEADED STUDS UNDER TENSION LOADS

von/by: Walter Berger

### Zusammenfassung

Die Beschreibung der Last-Verschiebungskurve von Anschlüssen mit Kopfbolzen unter Zuglast trägt dazu bei, die Rotationsfähigkeit von Biegeanschlüssen zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird in diesem Artikel die Verschiebungsgleichung, die die Kopfverschiebung von Kopfbolzen unter Zuglast beschreibt, präsentiert.

Für die Verifizierung der Gleichung wurden sowohl eigene Versuchsergebnisse als auch Versuchsergebnisse aus der Literatur [1-8] herangezogen.

Für die Beschreibung der Kopfbolzen-Kopfverschiebung wurde ein Ansatz von Furche [9] vom Autor überprüft und modifiziert.

### Beschreibung der neuen Verschiebungsgleichung

Bei der Auswertung der Last-Verschiebungskurven wurden folgende Einflussfaktoren untersucht:

- Betondruckfestigkeit
- Abstützung (enge/weite (Abb.1))
- Betonzustand (gerissen/ungerissen)
- Betonierichtung

Zur Beurteilung des Einflusses der genannten Faktoren auf den Verlauf der Last-Verschiebungskurven war eine Quantifizierung der Lastverschiebungskurven erforderlich. Deswegen wurden aus den Versuchskurven das Wertepaar Kraft und Kopfverschiebung bei 60% und 90% der Höchstlast bestimmt. Die Werte der Verschiebungen bei niedrigeren Lasten wurden nicht übernommen, da eine ausreichende Genauigkeit bei der Digitalisierung der Kurven aufgrund der kleinen Verschiebungswerte nicht gegeben

### Abstract

The Description of the load-displacement-curve of joints under tension load is helpful for the determination of the rotation capacity of bending joints. For this purpose the equation of the displacement for headed studs under tension load will be presented.

For the verification of the equation results of test carried out by the author were used as well as test results found elsewhere [1-8].

For the head displacement estimation of the headed stud a function proposed by Furche [9] was reassessed and modified by the author.

### Description of the new equation of the displacement

The following influencing factors were studied by the evaluation of the load-displacement curves:

- Concrete compression strength
- Setup (confined/unconfined (Fig. 1))
- Concrete condition (cracked/uncracked)
- Direction of the casting

A quantification of the load-displacement-curves was required to assess the influence of the mentioned factors on the load-displacement behavior. Therefore the pairs of values load and head displacement were determined at 60% and 90% of the failure load. The values of the lower load levels were not taken into account because the digitalized curves were not accurate enough because of the small displacements values. The displacement at the failure load was not taken into account too because the load-

ist. Die Verschiebung bei der Höchstlast wurde auch nicht berücksichtigt, weil die Lastverschiebungskurve bei der Höchstlast in ein Plateau übergeht. Zudem ist aus eigenen Untersuchungen bekannt, dass sich bei Versuchen mit weiter Abstützung der aufwölbende Ausbruchkegel kurz vor dem Erreichen der Höchstlast wesentlich zu den Verschiebungen beiträgt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Lastverschiebungskurven große Streuungen zeigen. Das ist sowohl auf die Verdichtung des Betons als auch auf die Verteilung der Zuschläge im Bereich des Bolzenkopfes zurückzuführen, die stark schwanken.

Die Verschiebungen der Versuche, die in der Literatur beschrieben sind, wurden i.d.R. am Lastangriffspunkt bestimmt. Somit wurde sowohl die elastische Dehnung des Schaftes zwischen Lastangriffspunkt und Kopf als auch die Aufwölbung des sich entwickelnden Ausbruchkegels mitgemessen. Eigene Versuche haben jedoch gezeigt, dass sich der Ausbruchkegel bis zum Erreichen von 90% der Betonausbruchlast nicht wesentlich aufwölbt. Deshalb können die in der Literatur beschriebenen Lastverschiebungskurven bis zu einer Last von 90% der Höchstlast verwendet werden, wenn die elastische Dehnung herausgerechnet wird.

Die Auswertung der eigenen Versuche und der Versuche aus der Literatur ergab folgende Funktion:

$$\delta_{p1} = \frac{k_a \cdot k_A}{c \cdot f_{cc,200}} \cdot \left( \frac{N}{A_h \cdot n} \right)^2 \quad (1)$$

mit:

$$k_a = \sqrt{5/a} \geq 1 \quad (2)$$

$$k_A = 0,5 \cdot \sqrt{d^2 + m \cdot (d_h^2 - d^2)} - 0,5 \cdot d_h \quad (3)$$

displacement curve flattens into a plateau. Furthermore, tests carried out by the author unveiled that at unconfined setups the concrete breakout cone starts to bulge shortly before the ultimate load is reached and contributes significantly to the displacements.

At this point it should be noted that the load-displacement-curves show a big scatter. This can be explained by the concrete compaction as well as the aggregate distribution near the head of the stud which differ very much.

The displacements of the tests described in the literature commonly were determined at the point of attack. Thus, the elastic elongation of the shaft between the point of attack as well as the bulging of the forming concrete cone was included in the measurement. However, experiments carried out by the author have shown that the concrete cone does not bulge significantly at loads 90% of the ultimate load or lower. Therefore, the load-displacement curves described in the literature can be considered up to 90% of the ultimate load when compensating the elastic elongation by computation.

The evaluation of the tests carried out by the author and others derived the following function:

where:

$$a = 0,5 \cdot (d_h + d) \quad (4)$$

$$A_h = \frac{\pi}{4} \cdot (d_h^2 - d^2) \quad (5)$$

mit:

$k_a$  - Formbeiwert bei porösen Randbereichen [-]

$k_A$  - querschnittsabhängiger Formbeiwert [-]

$a$  - Schulterbreite [mm]

$d$  - Schaftdurchmesser des Kopfbolzens [mm]

$d_h$  - Kopfdurchmesser des Kopfbolzens [mm]

$A_h$  - Pressungsfläche eines Kopfbolzens [mm<sup>2</sup>]

$m$  - Spannungsverhältnis,  $m=9$  für Kopfbolzen nach [1] [-]

$f_{cc,200}$  - Betondruckfestigkeit, gemessen an Würfeln mit einer Kantenlänge von 200mm [N/mm<sup>2</sup>]

$N$  - Zugkraft auf  $n$  Kopfbolzen einer Gruppe [kN]

$n$  - Anzahl der Zugbelasteten Kopfbolzen [-]

$c$  - Beiwert für die Kopfpressung [-]

$c=23300$  im ungerissenen Beton

$c=11650$  im gerissenen Beton

(bei enger Abstützung sind die Werte mit dem Faktor 2 zu multiplizieren)

### **Einflussfaktoren**

Die Auswertung der Versuchsergebnisse ergab, dass die Abstützung einen deutlichen Einfluss auf den Verlauf der Last-Verschiebungskurve hat. Es wird dabei zwischen enger und weiter Abstützung unterschieden (Abb.1). So wird bei enger Abstützung die Ausbildung des Bruchkegels behindert. Bei weiter Abstützung ist dagegen die ungehinderte Ausbildung des Ausbruchkegels möglich.

where:

$k_a$  - form factor at porous edge sections [-]

$k_A$  - cross section depending form factor[-]

$a$  - shoulder width [mm]

$d$  - diameter of the shaft of the headed stud [mm]

$d_h$  - diameter of the head of the headed stud [mm]

$A_h$  - bearing area of the headed stud [mm<sup>2</sup>]

$m$  - pressing relation,  $m=9$  for headed studs acc. to [1] [-]

$f_{cc,200}$  - concrete compression strength measured on 200mm cubes [N/mm<sup>2</sup>]

$N$  - load applied on  $n$  headed studs in the group [kN]

$n$  - Number of the headed studs [-]

$c$  - Factor for the head stress [-]

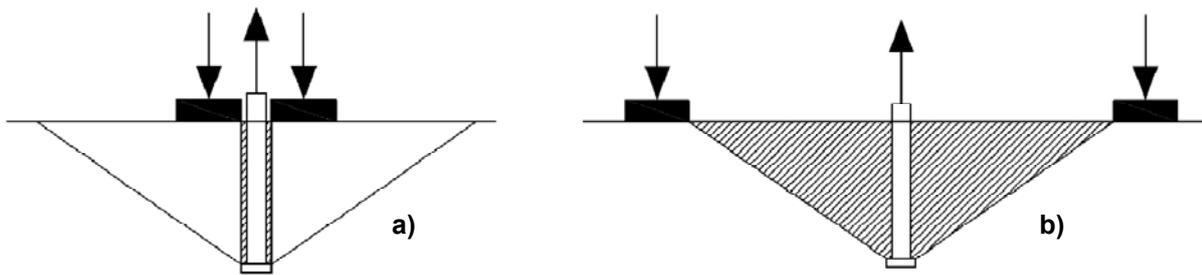
$c=23300$  in uncracked concrete

$c=11650$  in cracked concrete

(the  $c$ -values to be multiply by factor 2 for confined setup)

### **Influencing factors**

The evaluation of the test results showed that the confinement has a significant influence on the shape of the load-displacement curve. It can be distinguished between confined and unconfined test support (Fig. 1). In case of the confined test the forming of the concrete cone is hindered. In case of the unconfined test the concrete cone can form unhindered.

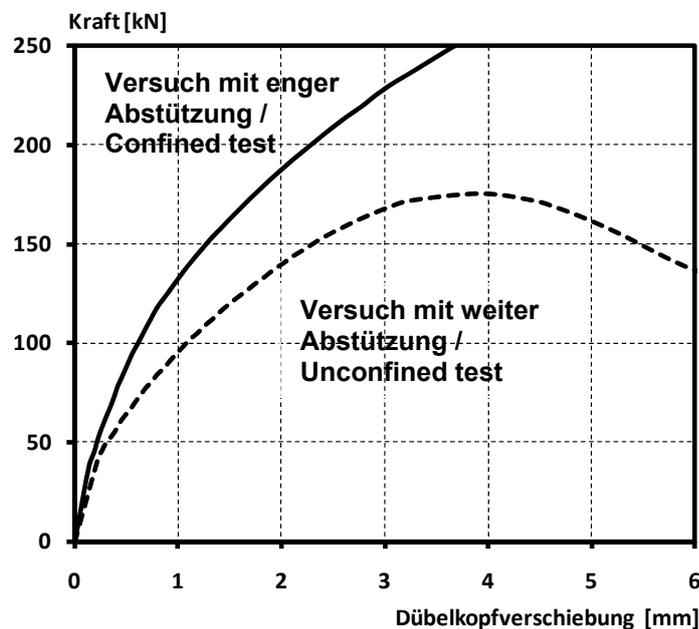


**Abbildung 1:** Schematische Darstellung der Zugversuche an Kopfbolzen a) mit enger Abstützung und b) mit weiter Abstützung

**Figure 1:** Schematically illustration of the tension tests on headed studs a) confined test support and b) unconfined test support

Die Versuche zeigen, dass die Verschiebung des Kopfes bei den Versuchen mit weiter Abstützung deutlich größer ist. Dieser Einfluss kann etwa mit dem Faktor 2 beziffert werden. Abbildung 2 zeigt einen Vergleich der Last-Verschiebungskurven mit enger und weiter Abstützung.

The tests show that the displacement of the head is significantly larger for the unconfined tests. This influence can be taken into account by the factor 2. Figure 2 shows a comparison between the load-displacement curves of confined and unconfined tests.



**Abbildung 2:** Vergleich der Lastverschiebungskurven von Versuchen mit weiter und enger Abstützung ( $d=22\text{mm}$ ,  $d_h=35\text{mm}$ )

**Figure 2:** Comparison of the load-displacement curves of tests with unconfined and confined test support ( $d=22\text{mm}$ ,  $d_h=35\text{mm}$ )

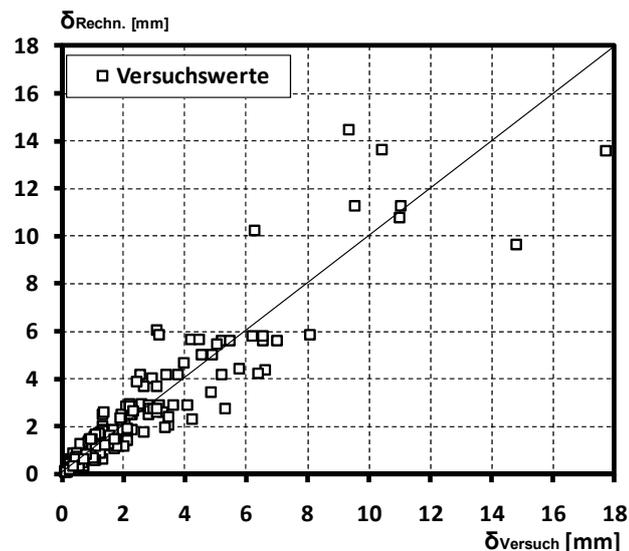
Bei der Beurteilung der Betonierichtung wurde bei den Versuchen mit weiter Abstützung kein signifikanter Einfluss auf den Kurvenverlauf festgestellt.

Die Rissbreite wird dagegen wie beim Furche [9] mit dem Faktor 2 berücksichtigt (gerissen/ungerissen).

Bei der Beurteilung des Einflusses der Betondruckfestigkeit auf den Verlauf Kopfverschiebungskurve ging es im wesentlichen um den Vergleich der Proportionalität von Furche [9], der eine lineare Beziehung zwischen der Kopfspannung und der Betondruckfestigkeit vorschlägt ( $\sigma \sim f_{cc,200}$ ) und dem Vorschlag des Autors, die Kopfspannung  $\sigma$  proportional der Wurzel der Betondruckfestigkeit ( $\sigma \sim f_{cc,200}^{0,5}$ ) zu berücksichtigen. Der zweite Vorschlag würde sich zudem mit der gängigen Abhängigkeit der Versagenslast von der Betondruckfestigkeit decken wie z.B. beim CC-Verfahren [10].

### Vergleich der Rechenwerte mit den Versuchswerten

Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der Versuchswerte mit den Werten errechneten nach der Formel (1).



**Abbildung 3:** Vergleich der Versuchswerte mit den Werten nach der Formel (1)  
**Figure 3:** Comparison of the test results with values according to formula (1)

Die Auswertung ergibt einen Mittelwert von ca. 1,00 und einen Variationskoeffizienten

The evaluation of the test results of the unconfined tests showed that the casting direction have no significant influence on the shape of the curve.

Whereas the presence of a crack has to be taken into account as suggested by Furche [9] by the factor 2 (cracked/uncracked).

The focus when evaluating the influence of the concrete compression strength on the shape of the head displacement curve was to compare the proportionality according to Furche [9] who proposes a linear relationship between head stress and the concrete compression strength ( $\sigma \sim f_{cc,200}$ ) and the proposal of the author to consider the head stress  $\sigma$  proportional to the root of the concrete compression strength ( $\sigma \sim f_{cc,200}^{0,5}$ ). The second proposal is furthermore conform to the common relationship between failure load and concrete compression strength e.g. CC-Method [10].

### Comparison between calculated values and test values

Figure 3 shows an comparison of the test values with the values calculated according to formula (1).

The evaluation yields a mean value of 1.00 and a coefficient of variation of 33.1%. A

von ca. 33,1%. Es wurden insgesamt 189 Verschiebungswerte berücksichtigt. Es zeigt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung der berechneten Werte mit den Versuchswerten.

Im Vergleich hierzu ergibt sich bei dem Ansatz nach Furche [9] ein Mittelwert von ca. 1,03 und einen Variationskoeffizienten von ca. 43,6%.

Damit wird gezeigt, dass die vorgeschlagene Gleichung eine bessere Übereinstimmung mit den Versuchswerten ergibt.

### Zusammenfassung

Die präsentierte Verschiebungsgleichung ist wichtig für die Beschreibung der Lastverschiebungskurve bei Kopfbolzenanschlüssen unter Zuglast. Diese Beschreibung ermöglicht eine Bestimmung der Steifigkeit und Rotationsfähigkeit von Anschlüssen zwischen z.B. Stahlträgern und Stahlbetonstützen mit Ankerplatten.

### Literatur / References

- [1] **Bouška, P. (1992):** Analysis of Experimental Data of the Pull-out Tests of Anchor Bolts. Klokner Institute, Czech Technical University in Prague, 1992, nicht veröffentlicht.
- [2] **Furche, J.; Dieterle, H. (1986):** Ausziehversuche an Kopfbolzen mit unterschiedlichen Kopfformen bei Verankerungen im ungerissenen Beton und in Parallelrissen. Bericht Nr. 9/1-86/9, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1986, nicht veröffentlicht.
- [3] **Greiner, U.; Ramm, W. (1993):** Gutachten zur Bemessung von Kopfbolzenverankerungen. Teil II: Verankerungen mit Rückhängebewehrung. Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion, Universität Kaiserslautern, 1993, nicht veröffentlicht.
- [4] **Hanenkamp, W.; Wunderlich, W. (1984):** Zugversuche an einbetonierten Kopfbolzen in Randnähe eines Bauteils. Bericht Nr. A-08/84-1, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1984, nicht veröffentlicht.
- [5] **Hanenkamp, W.; Wunderlich, W. (1985/1):** Tragverhalten von Verankerungen mit Kopfbolzen. Zusatzversuche Serie 4 und 5. Zugtragfähigkeit von Einzel-Kopfbolzen mit unterschiedlichen Randabständen. Bericht Nr. A-04/85-4/5-1, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1985, nicht veröffentlicht.

total of 189 displacement values were taken into account. It shows a sufficient agreement of calculated values and test values.

In comparison, the function of Furche [9] gives a mean value of 1.03 and a coefficient of variation of 43.6%.

It shows that the proposed function gives a better agreement with the test results.

### Summary

The presented equation of the displacement is important for the description of the load-displacement curves of the connections with headed studs under tension load. This description allows a determination of the stiffness and of the rotation capacity of e.g. steel beam and concrete column connections.

- [6] **Hanenkamp, W.; Wunderlich, W. (1985/2):** Tragverhalten von Verankerungen mit Kopfbolzen. Versuchsserie 4. Zugtragfähigkeit unterschiedlichen Randabständen. Bericht Nr. A-04/85-4, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1985, nicht veröffentlicht.
- [7] **Zhao, G.; Eligehausen, R. (1991):** Zugtragfähigkeit von Ankerplatten mit Kopfbolzen mit unterschiedlichen Achsabständen. Bericht-Nr. KRT-799/07-91/23, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1991, nicht veröffentlicht.
- [8] **Zhao, G.; Dieterle, H. (1991):** Tragverhalten von Verankerungen mit Kopfbolzen. Versuchsserie 2. Zugtragfähigkeit von Kopfbolzensgruppen mit unterschiedlichen Lastexzentrizitäten. Bericht-Nr. KRT-2/799-91/2, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1991, nicht veröffentlicht.
- [9] **Furche, J. (1994):** Zum Trag- und Verschiebungsverhalten von Kopfbolzen bei zentrischem Zug. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 1994
- [10] **Fuchs, W.; Eligehausen, R.; Breen, JE. (1995):** Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete. In: ACI Structural Journal, Vol. 92 (1995), No. 1, pp. 73-94

## **VERFORMUNGSVERHALTEN VON KORRODIERTER BEWEHRUNG IN BETON DEFORMATIONAL BEHAVIOUR OF CORRODED REINFORCEMENT IN CONCRETE**

von/by: Christian Fischer und Joško Ožbolt

### **Zusammenfassung**

In diesem Beitrag werden Ergebnisse zum Verformungsverhalten von korrodierter Bewehrung in Beton vorgestellt, die im Rahmen eines durch die DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) geförderten Forschungsvorhabens gewonnen wurden. Als Grundlage für die Untersuchungen dienten Balkenendprobekörper mit jeweils vier gerippten Bewehrungsstäben in Ecklage, die teils mit und teils ohne Bügelbewehrung ausgeführt waren. Die Vorkorrosion erfolgte durch anodische Polarisierung über einen Zeitraum von bis zu 16 Monaten mit sehr geringen Stromdichten, die zwischen  $15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  und  $25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  lagen. Das Verformungsverhalten wurde jeweils anhand der relativen Stabendverschiebung bestimmt.

Die Ergebnisse zeigen einen Einfluss der Korrosion auf die Verbundfestigkeit, jedoch nicht auf das Verformungsverhalten. Insbesondere die Probekörper mit Bügelbewehrung wiesen zu unterschiedlichen Korrosionsstadien mit Abtragstiefen von bis zu rd.  $400 \mu\text{m}$  keine Änderung im Verbundspannungs-Verschiebungs-Verhalten auf. Anhand von Untersuchungen am Interface Stahl-Korrosionsprodukt-Beton konnten diese Beobachtungen bestätigt werden.

### **Einleitung**

Eine wesentliche Eigenschaft von Stahlbetonbauteilen ist deren Verformungsverhalten. Das Verformungsverhalten wird u. a. von der Oberflächengestalt der Bewehrungsstäbe beeinflusst. Eine zunehmende Rippenhöhe führt zu größeren übertragbaren Verbundspannungen und zu einer geringeren Duktilität. Nimmt die Rippenhöhe ab, bis hin zum Glattstahl, so nimmt die Duktilität zu, jedoch

### **Abstract**

In the present paper experimental results for the deformational behaviour of corroded reinforcing bars in concrete are presented. The results were obtained in the framework of a project funded by DFG (German Research Foundation). As a basis for the investigations served beam-end specimens with four ribbed reinforcing bars at corner position partly with and without stirrups. The pre-corrosion was performed by anodic polarization over a period of up to 16 months with very low current densities between  $15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  and  $25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . The deformational behaviour was measured by the relative bar end displacement.

The results show an influence of corrosion on the bond strength, but not on the deformational behaviour. In particular, the specimens with stirrups showed no change in bond stress-displacement-behaviour at different corrosion levels with penetration depths of up to approx. 400 microns. Based on investigations at the steel-corrosion products-concrete interface, these observations could be confirmed.

### **Introduction**

An essential characteristic of reinforced concrete structures is their deformational behaviour. The deformational behaviour is influenced by the surface shape of the reinforcing bars. Increasing rib height results in larger transferable bond stresses and a lower ductility. Decreasing the rib height, to the smooth steel, results in increasing ductility, however, transferable bond stresses are

können immer geringere Verbundspannungen übertragen werden. Weiterhin nehmen bei Biegebelastung die Rissbreite und der Rissabstand zu.

Die Korrosion des Bewehrungsstahls verändert die Stahloberfläche und somit die Kontaktschicht zwischen Stahl und Beton. Der Stahl an der Oberfläche wird allmählich in Korrosionsprodukte umgewandelt. Dieser Vorgang findet anfangs lokal und mit fortschreitender Dauer flächig statt. Einfluss darauf nimmt auch die Art der Korrosion – ob chlorid- oder carbonatisierungsinduziert.

### Probekörper

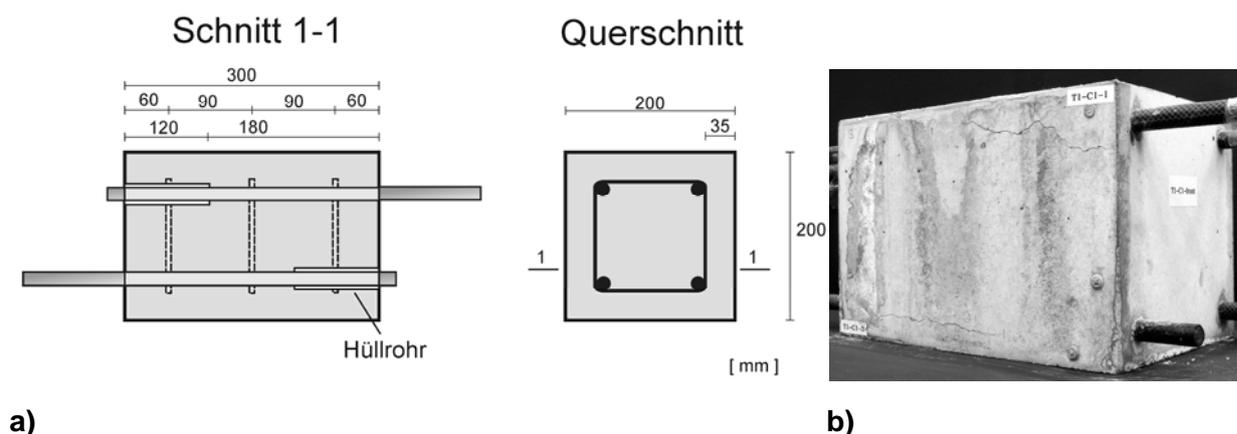
Zur Untersuchung des Einflusses der Bewehrungsstahlkorrosion auf das Verbundverhalten zwischen Stahl und Beton wurde ein Probekörper benötigt, mit dessen Hilfe das strukturelle Verhalten des Verbundes in einem Stahlbetonbauteil abgebildet werden konnte. Die Wahl fiel auf den in Abbildung 1 dargestellten Balkenend-Probekörper. Als Grundlage für den Probekörper dienten die Untersuchungen von Chana /1/, denen eigene Untersuchungen der Autoren folgten, die in /2/ näher erläutert sind.

reduced. Furthermore, crack width and crack spacing are increased under bending load.

The corrosion of reinforcing steel changes the steel surface and thus the contact layer between steel and concrete. The steel at the surface is gradually converted into corrosion products. This process initially takes place locally and with timely progress over the entire surface. This is also influenced by the type of corrosion – whether chloride or carbonation induced.

### Specimen

To study the influence of reinforcing steel corrosion on the bond behaviour between steel and concrete, a test specimen was needed, with which the structural behaviour of bond in a reinforced concrete structure could be shown. The choice fell on the beam-end specimen shown in Figure 1. The test specimen was based on investigations performed by Chana /1/ that followed own investigations of the authors, which are discussed in /2/.



**Abbildung 1:** Geometrie des Balkenend-Probekörpers a) schematisch mit Abmessungen und b) als Fotografie

**Figure 1:** Geometry of the beam-end specimen a) schematically with dimensions and b) as photography

Insgesamt wurden sechs unterschiedliche Probekörpertypen (siehe Tabelle 1) untersucht. Von jedem Probekörpertyp wurden acht Exemplare hergestellt, von denen jeweils zwei als unkorrodierte Referenzproben (R1 und R2) und jeweils sechs Proben (C1 bis C6) zu unterschiedlichen Korrosionsstadien geprüft wurden.

Die Probekörper enthielten jeweils vier Stäbe in Ecklage mit Stabdurchmessern von  $d = 12$  mm und  $d = 16$  mm sowie mit Betondeckungen von  $c = 20$  mm und  $c = 35$  mm. Die Verbundlänge betrug stets 180 mm. Weiterhin wurden vier Probekörpertypen (Typ 2, 4, 5 und 6) mit Bügeln im Durchmesser von 6 mm und einem Bügelabstand von 90 mm untersucht. Bei zwei dieser vier Probekörpertypen (Typ 5 und 6) wurden die Bügel elektrisch gegen die Längsstäbe isoliert. Diese Maßnahme diente der Untersuchung der Wirksamkeit von korrodierten Bügeln. Dafür wurden die Bügelecken mit Klebeband umwickelt und die Fixierung an den Längsstäben mit Kabelbindern anstatt mit Bewehrungsdraht ausgeführt. Der verwendete Beton enthielt 360 kg Zement pro Kubikmeter, hatte einen w/z-Wert von 0,5 und enthielt quarzitisches Sand und Kies mit einem Größtkorndurchmesser von 8 mm. Mit Hilfe von Fließmittel wurde der Konsistenzbereich F3 eingestellt.

A total of six different specimen types (see Table 1) were investigated. From each specimen type eight specimens were produced, of which two were uncorroded reference samples (R1 and R2) and six specimens (C1 to C6) were tested at different corrosion levels.

Each specimen contained four bars at corner position with bar diameters of  $d = 12$  mm and  $d = 16$  mm and with concrete covers of  $c = 20$  mm and  $c = 35$  mm. The bond length was always 180 mm. Furthermore, four specimen types (types 2, 4, 5 and 6) were investigated with stirrups of 6 mm diameter and a bar spacing of 90 mm. In two of these four types of specimens (type 5 and 6) the stirrups were electrically isolated against the longitudinal bars. This measure was used to evaluate the efficacy of corroded stirrups. For this reason the stirrup corners were wrapped with tape and the attachment to the longitudinal bars was achieved by cable ties instead of reinforcing wire. The concrete used contained 360 kg of cement per cubic meter, had a w/c-ratio of 0.5 and contained quartz sand and gravel with a maximum diameter of 8 mm. With the using of superplasticizer, the consistency was set to class F3.

**Tabelle 1:** *Untersuchte Probekörpertypen*

**Table 1:** *Investigated specimen types*

Typ Nr.	d mm	c mm	c/d -	Bügel mm	elektr. Bügel Kontakt
1	12	20	1,67	-	-
2	12	20	1,67	6/90	ja
3	16	35	2,19	-	-
4	16	35	2,19	6/90	ja
5	12	20	1,67	6/90	nein
6	16	35	2,19	6/90	nein

Aufgrund der begrenzten Laufzeit des zugrunde liegenden Projektes musste die Bewehrungsstahlkorrosion in den Probekörpern beschleunigt werden. Die beschleunigte Vorkorrosion erfolgte durch potentiostatische Polarisation bei +500 mV gegen die Normalwasserstoffelektrode (NHE). Zusätzlich zum angelegten Potential wurden die Seitenflächen der Proben zweimal täglich für 3 min bzw. 1 min mit 1%-iger Chloridlösung beriebelt. Zur beschleunigten Aktivierung der Vorkorrosion wurde dem Zugabewasser ein Chloridgehalt von 2,5 M.-%/zem in Form von 90 % NaCl und 10 % CaCl<sub>2</sub>, entsprechend dem Mischungsverhältnis für Tausalz, zugegeben. Die angewendete Konditionierung der Probekörper ist mit einer Wasserwechselzone im Meerwasserbereich vergleichbar. Die sich einstellenden Stromdichten lagen für die Proben mit Stabdurchmesser  $d = 12$  mm bei  $i_{\text{corr}} = 20\text{-}25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  und für den Stabdurchmesser  $d = 16$  mm bei  $i_{\text{corr}} = 15\text{-}20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . In Berra /3/ wird die maximal in der Natur auftretende Korrosionsstromdichte (im Wasserwechselbereich von Meerwasserbauwerken) mit rd.  $i_{\text{corr}} = 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  beziffert. Die im Rahmen der Vorkorrosion aufgetretenen Korrosionsstromdichten entsprechen demnach dem 3- bis 5-fachen dieses Wertes.

### Ergebnisse der Probekörper ohne Bügel

In Abbildung 2 sind beispielhaft Verbundspannungs-Stabendverschiebungs-Beziehungen für a) Probekörper des Typs 1 mit 12 mm Stabdurchmesser und 20 mm Betondeckung sowie b) für Typ 3 Probekörper mit 16 mm Stabdurchmesser und 35 mm Betondeckung abgebildet. Aus Abbildung 2a wird ersichtlich, dass die Typ 1 Probekörper mit zunehmender Korrosion bis zu einem mittleren Korrosionsabtrag von rd. 450  $\mu\text{m}$  keine Änderung der Stabendverschiebung zeigen. Die übertragbaren Verbundspannungen sinken mit zunehmender Korrosion, jedoch

Due to the limited duration of the underlying project the corrosion of the reinforcing steel in the specimens had to be accelerated. The accelerated pre-corrosion was carried out by potentiostatic polarisation at +500 mV against normal hydrogen electrode (NHE). In addition to the applied potential, the side surfaces of the specimens were sprayed twice a day for 3 min and 1 min respectively with 1 % sodium chloride solution. To accelerate the activation of the pre-corrosion a chloride content of 2.5 % per weight of cement including 90 % NaCl and 10 % CaCl<sub>2</sub> reflecting the mix ratio for de-icing salt was added to the mixing water. The applied condition of the specimens is comparable to the splash water zone in a sea side environment. The self-adjusting current densities were around  $i_{\text{corr}} = 20\text{-}25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  for the specimens with a bar diameter of  $d = 12$  mm and around  $i_{\text{corr}} = 15\text{-}20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  for a bar diameter of  $d = 16$  mm. In Berra /3/ the highest in nature occurring corrosion current density (in the splash water zone of sea side structures) is quantified with approx.  $i_{\text{corr}} = 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . The current densities measured within this project were thus between 3- and 5-times this value.

### Results of specimens without stirrups

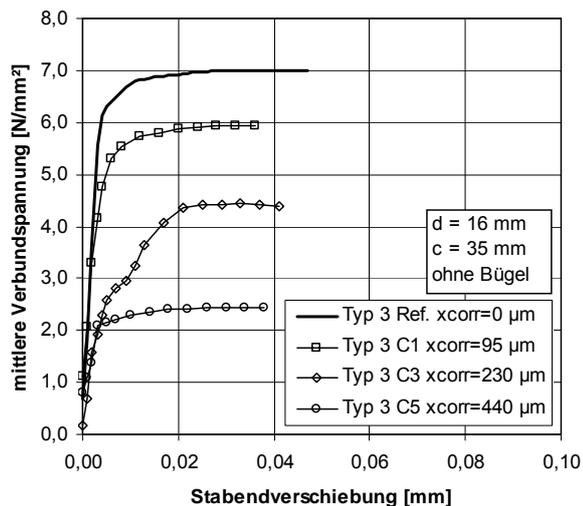
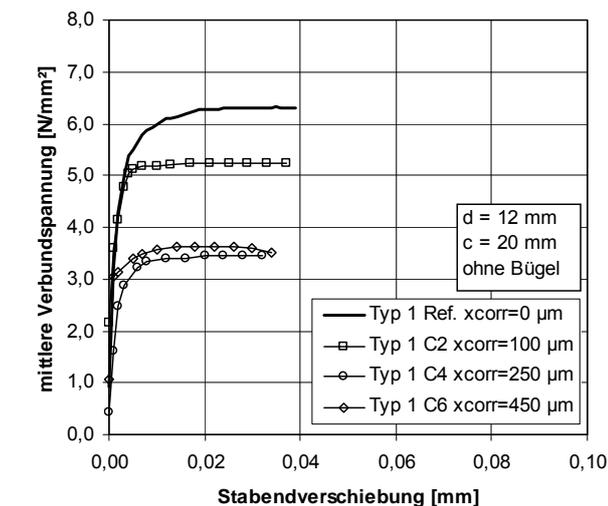
In Figure 2 are shown characteristic bond stress-bar end displacement-relationships for a) specimens of type 1 with 12 mm bar diameter and 20 mm concrete cover, and b) for type 3 specimens with 16 mm bar diameter and 35 mm concrete cover. From Figure 2a it becomes apparent that type 1 specimens do not show a change in bar end displacement with increasing corrosion up to an average corrosion rate of approx. 450 microns. The transferable bond stresses decrease with increasing corrosion; however, the deformational behaviour with the very

bleibt das Verschiebungsverhalten mit der sehr hohen Anfangssteifigkeit unverändert. Aus Abbildung 2b wird ersichtlich, dass die korrodierten Typ 3 Probekörper ebenfalls nahezu das gleiche Stabendverschiebungsverhalten wie im unkorrodierten Zustand zeigen. Auch hier zeigt sich eine Abnahme der übertragbaren Verbundspannungen mit zunehmendem Korrosionsabtrag.

Die in Abbildung 2 dargestellten Kurvenverläufe sind charakteristisch für die jeweiligen Probekörpertypen und Korrosionsstadien. Bei der Betrachtung aller Versuche kam es im Mittel bei einer Stabendverschiebung zwischen rd. 0,02 und 0,04 mm zum Versagen. Das Versagen war bei den Probekörpern ohne Bügelbewehrung durch ein plötzlich auftretendes sprödes Spalten der Betondeckung charakterisiert. Die Zunahme der Stabendverschiebung war ab rd. 0,005 mm ohne wesentliche Zunahme der Verbundspannung mit dem Auftreten von sichtbaren Rissen in der Betondeckung verbunden.

high initial stiffness remains unchanged. From Figure 2b it becomes apparent that the corroded type 3 specimens show also almost the same bar end displacement as at the uncorroded state. Here too, a decrease of the transferable bond stresses can be found with increasing corrosion rate.

The results shown in Figure 2 are characteristic for the respective specimen types and levels of corrosion. Considering all experimental results, there was an average bar end displacement between approx. 0.02 and 0.04 mm at failure. The failure was characterised by a sudden onset of brittle spalling of the concrete cover for the specimens without stirrups. The increase in bar end displacement was up from approx. 0.005 mm without any significant increase in bond stress accompanied with the occurrence of visible cracks in the concrete cover attached.



a)

b)

**Abbildung 2:** Verbundspannungs-Stabendverschiebungs-Beziehungen ohne Korrosion (Ref.) sowie zu verschiedenen Korrosionsstadien (C1-C6) für a) Typ 1 Probekörper und b) Typ 3 Probekörper

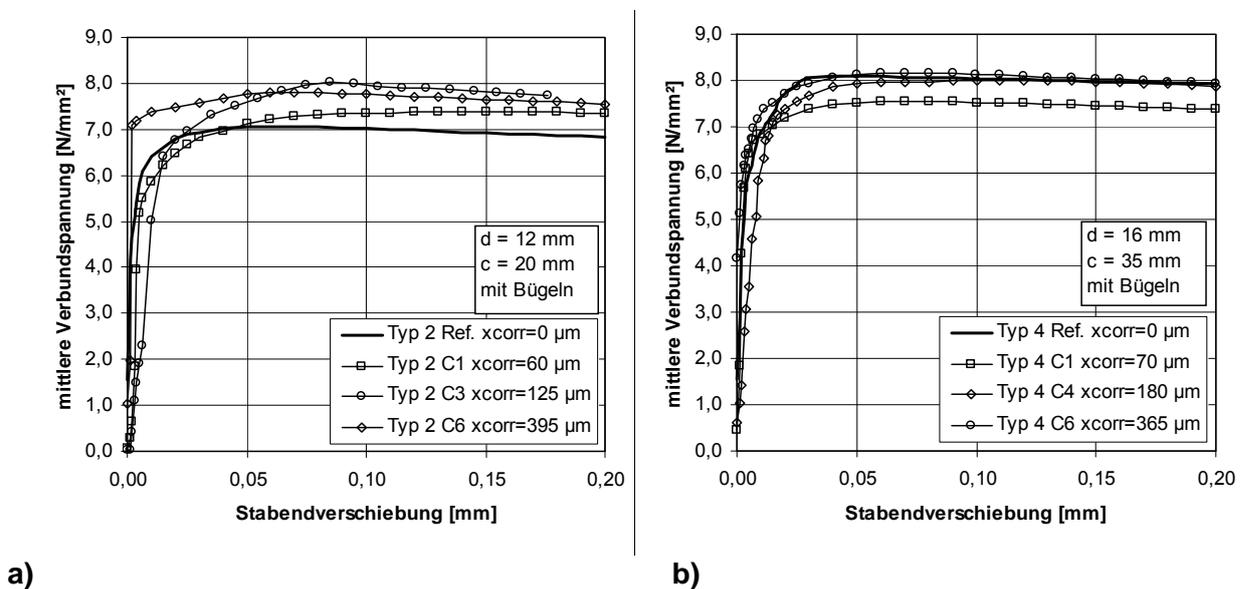
**Figure 2:** Relationship between bond stress and bar end displacement without corrosion and at different corrosion levels (C1-C6) for a) type 1 specimens and b) type 3 specimens

### Ergebnisse der Probekörper mit Bügeln

Beispielhaft für die Probekörpertypen mit Bügeln sind in Abbildung 3 die Verbundspannungs-Stabendverschiebungs-Beziehungen der Typ 2 und 4 Probekörper dargestellt. Auf die Ergebnisdarstellungen der Typ 5 und 6 Probekörper wurde an dieser Stelle verzichtet, da sie rein geometrisch mit den Typen 2 und 4 identisch sind. Der Unterschied bestand lediglich darin, dass die Bügel der Probekörpertypen 5 und 6 elektrisch von den Längsstäben entkoppelt waren.

### Results of specimens with stirrups

The bond stress-bar end displacement relationships of type 2 and 4 specimens are exemplified shown in Figure 3. The representation of results of type 5 and 6 test specimens was omitted since they are geometrically identical to type 2 and 4 specimens. The only difference was the electrical isolation of the stirrups against the longitudinal bars of the type 5 and 6 specimens.



**Abbildung 3:** Verbundspannungs-Stabendverschiebungs-Beziehungen ohne Korrosion (Ref.) sowie zu verschiedenen Korrosionsstadien (C1-C6) für a) Typ 2 Probekörper und b) Typ 4 Probekörper

**Figure 3:** Relationship between bond stress and bar end displacement without corrosion and at different corrosion levels (C1-C6) for a) type 2 specimens and b) type 4 specimens

Aus Abbildung 3a wird ersichtlich, dass die Probekörper des Typs 2 mit 12 mm Stabdurchmesser und 20 mm Betondeckung mit zunehmendem Korrosionsabtrag keine nennenswerte Änderung der Stabendverschiebung im Vergleich zur unkorrodierten Referenz zeigen. Die maximal übertragbaren Verbundspannungen steigen mit zunehmendem Korrosionsabtrag sogar an. Auch die in Abbildung 3b dargestellten Verbundspannungs-Stabendverschiebungs-Beziehungen der Typ 4 Probekörper mit 16 mm Stabdurchmesser und 35 mm Betondeckung ze-

From Figure 3a it becomes apparent that the type 2 specimens with 12 mm bar diameter and 20 mm concrete cover do not show a significant change of bar end displacement with increasing corrosion penetration compared to the uncorroded reference. The maximum transferable bond stresses even increase with increasing corrosion penetration. The bond stress-bar end displacement relationships of the type 4 specimens with 16 mm bar diameter and 35 mm concrete cover shown in Figure 3b do not indicate a significant change in the bar end displace-

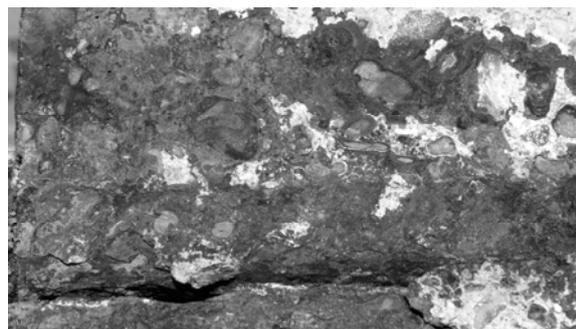
gen keine nennenswerte Änderung der Stabendverschiebung. Die maximal übertragbaren Verbundspannungen bleiben nahezu unverändert bzw. sinken im Vergleich zur Referenz leicht ab. Im Vergleich zu den Probekörpern ohne Bügel zeigen die Probekörper mit Bügeln ein duktileres Verhalten nach Erreichen der maximal übertragbaren Verbundspannungen.

### **Verzahnung Stahl-Korrosionsprodukte-Beton**

Aus den Ergebnissen der vorherigen Abschnitte wird ersichtlich, dass die Bildung einer Korrosionsschicht zwischen Stahl und Beton zwar zu einer Abnahme der Verbundfestigkeit (in Abwesenheit einer Bügelbewehrung), nicht aber zu einer Änderung der Stabendverschiebung führt. Es kann daher angenommen werden, dass die Abnahme der Verbundfestigkeit durch die Abnahme der Umschließungswirkung der Betondeckung aufgrund von Rissen hervorgerufen wird. Würde die Abnahme der Verbundfestigkeit auf eine nicht tragfähige Korrosionsschicht zurückzuführen sein, so müsste dies mit einer Zunahme der Stabendverschiebung einhergehen.



a)



b)

**Abbildung 4:** *Mit dem umgebenden Beton verzahnter korrodierter Bewehrungsstab*  
**Figure 4:** *Interlock between corroded reinforcing bar and surrounding concrete*

In Abbildung 4 sind zwei stark korrodierte Bewehrungsstäbe mit dem umgebenden Beton nach dem Herausziehen aus dem jeweiligen Probekörper dargestellt. Trotz des

ment either. The maximum transferable bond stresses remain almost unchanged or slightly decrease compared to the reference. In contrast to the specimens without stirrups, the specimens including stirrups show a more ductile behaviour after reaching the maximum transferable bond stresses.

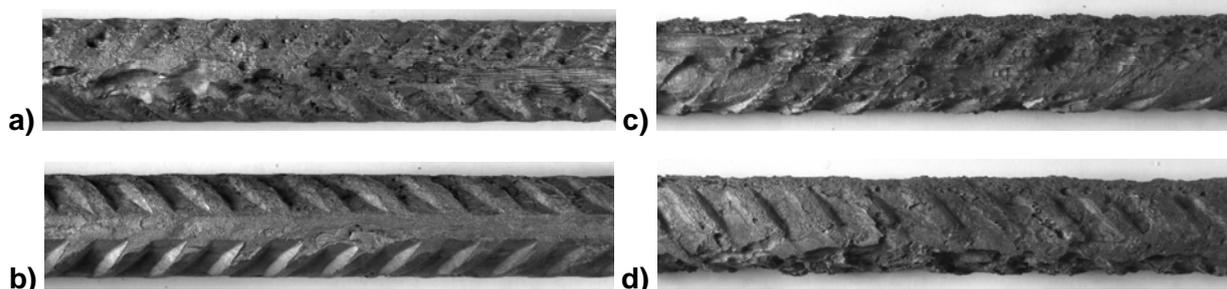
### **Interlock steel-corrosion products-concrete**

From the results of the previous sections it becomes apparent that the formation of a corrosion layer between steel and concrete, although resulting in a decrease of bond strength (in the absence of stirrups), does not lead to a change in bar end displacement. It can therefore be assumed that the decrease of bond strength is due to the decrease of concrete cover confinement induced by cracks. If the decrease in bond strength would have been caused by a non-viable corrosion layer, so this should be accompanied by an increase in bar end displacement.

In Figure 4, two heavily corroded reinforcement bars with the surrounding concrete after the removal from the respective specimens are shown. Despite the removal of the

Abspaltens der Betondeckung blieb ein Großteil des umliegenden Betons an den Bewehrungsstäben haften. In den abgebildeten Ausschnitten sind die Bewehrungsstäbe über große Bereiche fest mit dem umgebenden Beton verzahnt. Es hat sich eine dichte Schicht aus Korrosionsprodukten ausgebildet, die in das Porensystem des Betons hineingewachsen ist. Die Übertragung der Verbundspannungen konnte somit gewährleistet werden.

concrete cover most of the surrounding concrete adhered to the reinforcing bars. In the illustrated sections, reinforcing bars are densely interlocked over large areas with the surrounding concrete. A dense layer of corrosion products has been formed, which has grown into the pore system of concrete. Thus the transfer of bond stresses could be ensured.



**Abbildung 5:** Korrodierte Typ 1 Bewehrungsstäbe nach dem Entfernen der Korrosionsprodukte mit  $x_{\text{corr}} = 180 \mu\text{m}$  a) Außenseite und b) Innenseite, sowie mit  $x_{\text{corr}} = 445 \mu\text{m}$  c) Außenseite und d) Innenseite

**Figure 5:** Corroded type 1 reinforcing bars after removal of corrosion products with  $x_{\text{corr}} = 180 \mu\text{m}$  a) outside b) inside as well as with  $x_{\text{corr}} = 445 \mu\text{m}$  c) outside and d) inside

In Abbildung 5 sind beispielhaft die Ausschnitte von zwei korrodierten und gebeizten Bewehrungsstäben aus Typ 1 Probekörpern mit einem Durchmesser von 12 mm dargestellt. Im linken Teil der Abbildung sind a) die Außenseite und b) die Innenseite eines mäßig korrodierten Bewehrungsstabes ( $x_{\text{corr}} = 180 \mu\text{m}$ ) abgebildet. Die Stahloberfläche der Außenseite ist deutlich angegriffen. Der Korrosionsangriff erfolgte, wie für die chloridinduzierte Korrosion charakteristisch, lokal verteilt über die Oberfläche mit unterschiedlicher Ausprägung. Die Rippung ist noch erkennbar. Die Innenseite ist nahezu ungeschädigt und weist nur leichte Korrosionsnarben auf.

Im rechten Teil von Abbildung 5 sind c) die Außenseite und d) die Innenseite eines stark

In Figure 5, the details of two corroded and bated reinforcement bars from type 1 specimens with a diameter of 12 mm are exemplified shown. The left part of the figure shows: a) the outside and b) the inside of a moderately corroded reinforcing bar ( $x_{\text{corr}} = 180 \mu\text{m}$ ). The steel surface of the outside is clearly penetrated. As characteristic for chloride-induced corrosion, the corrosion attack occurred locally distributed over the surface to varying degrees. The individual ribs are still present. The bar inside is virtually undamaged and showed only slight corrosion.

In the right part of Figure 5, c) the outside and d) the inside of a heavily corroded reinforcing bar ( $x_{\text{corr}} = 445 \mu\text{m}$ ) are shown. The steel surface of the bar outside is heav-

korrodierten Bewehrungsstabes ( $x_{\text{corr}} = 445 \mu\text{m}$ ) dargestellt. Die Stahloberfläche der Außenseite ist vollflächig angegriffen und weist tiefe Narben auf. Trotz der starken Schädigung ist die Rippung des Stabes noch erkennbar. Auch die Innenseite des Stabes zeigt teilweise deutlichen Korrosionsabtrag, jedoch ist auch in diesem Fall die Innenseite weniger geschädigt als die Außenseite. Der quantitative Unterschied des Abtrages zwischen Außen- und Innenseite nimmt jedoch mit zunehmender Korrosion ab.

### Zusammenfassung

Bei der untersuchten chloridinduzierten Korrosion fand kein gleichmäßiger Abtrag der Oberfläche statt, sondern ein sowohl lokal als auch umfänglich unterschiedlich ausgeprägter Angriff. Über den Umfang betrachtet fand der Korrosionsfortschritt der Bewehrungsstäbe von außen nach innen statt. Demnach war der Korrosionsabtrag über den Umfang betrachtet an der nach außen gewandten Stabseite größer als an der nach innen gewandten Stabseite. Mit zunehmender Korrosion nahm diese Differenz jedoch ab. Die Rippen wurden selbst bei starker Korrosion nicht vollflächig abgetragen. Dadurch nahm die Oberflächenrauigkeit zu. Die Korrosionsprodukte, die den Raum zwischen dem abgetragenen Stahl und dem Beton eingenommen haben, sorgten für eine derartige Verzahnung, dass eine Übertragung der Verbundspannungen gewährleistet werden konnte. Gleichzeitig verhinderte diese Verzahnung eine im Vergleich zum unkorrodierten Stab andersartige Stabendverschiebung. Aufgrund dieser Ergebnisse kann angenommen werden, dass die Abnahme der Verbundfestigkeit auf die Abnahme der Umschließungswirkung des Betons zurückzuführen ist. Im Falle einer vorhandenen Bügelbewehrung kann die Verbundfestigkeitsabnahme zu großen Teilen kompensiert werden.

ily corroded at the whole area and has deep scars. Despite the severe damage the rib pattern of the bar is still visible. The inside of the bar shows some significant corrosion penetration, but though, there is less damage inside than outside. The quantitative difference between the penetration outside and inside decreases with increasing corrosion.

### Summary

The investigated chloride-induced corrosion did not show a uniform corrosion penetration of the surface, but both locally and peripherally varying degrees of attack. Considering the bar circumference the extent of corrosion occurred from outside to inside. Accordingly, the corrosion penetration was peripherally considered larger on the outward-facing bar side than on the inward-facing bar side. However, this difference decreased with increasing corrosion. Even at high corrosion levels the ribs were not entirely removed. In fact, the surface roughness increased. The corrosion products that have occupied the space between the penetrated steel and the concrete provided such an interlock that a transfer of bond stresses could be guaranteed. At the same time this interlock prevented a different bar end displacement compared to the uncorroded bars. Based on these results it can be concluded that the decrease in bond strength is due to the decrease in concrete confinement. In case of stirrup reinforcement, the decrease of bond strength is compensated to a large extent.

**Literatur / References**

- [1] **Chana, P. S. (1990):** A test method to establish realistic bond stresses. In: Magazine of Concrete Research, Jg. 42, H. 151, S. 83–90.
- [2] **Fischer, C. (2008):** Design of a beam end specimen for investigations of bond strength on corroded reinforcement. In: Eligehausen, R.; Gehlen, C. (Eds.): 7th International PhD Symposium in Civil Engineering, September 11 - 13, 2008, Stuttgart, Germany. Stuttgart : Universität, 2008, pp. 153-154, Volltext auf CD-ROM.
- [3] **Berra, M.; Castellani, A.; Coronelli, D. (1997):** Bond in reinforced concrete and corrosion of bars. In: Structural Faults and Repair. Proceedings of the 7th International Conference. Edinburgh, UK: Engineering Technics Press, Bd. 2, S. 349–356.

# AKUSTISCHE VERFAHREN ZUR SCHADENSDETEKTION IN ROTORBLÄTTERN VON WINDENERGIEANLAGEN - ERGEBNISSE DES PROJEKTES RIWEA

## ACOUSTIC TECHNIQUES FOR DAMAGE DETECTION IN WIND TURBINE BLADES – RESULTS OF THE RESEARCH PROJEKT RIWEA

von/by: Anne Jüngert<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Otto-Graf-Institut

### Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden in den Jahren 2006 bis 2009 zerstörungsfreie Prüfverfahren für die Untersuchung der Rotorblätter von Windenergieanlagen entwickelt. Im Projekt wurde ein automatisiertes Roboterkonzept entworfen, das die Rotorblätter mit Thermografie und akustischen Verfahren untersuchen soll. Das IWB übernahm in Zusammenarbeit mit der Abteilung „Zerstörungsfreie Prüfung und Überwachungstechnik“ der MPA Universität Stuttgart die Entwicklung der akustischen Verfahren. Die beiden akustischen Verfahren, die zum Einsatz kamen und für die Anwendung an den Rotorblättern speziell optimiert wurden, sind im Folgenden beschrieben und anhand von Beispielen dargestellt.

### Einleitung

Die Nutzung erneuerbarer Energien gewinnt im Hinblick auf den Klimawandel und die Laufzeitbegrenzung der Kernkraftwerke immer mehr an Bedeutung. Besonders die Windenergie spielt in Deutschland eine große Rolle und erzeugt mehr als 40 % des erneuerbar gewonnenen Stroms. Zur effizienteren Nutzung der Windstandorte, werden größere und leistungsstärkere Anlagen gebaut. Die Rotorblätter der Windenergieanlagen erreichen inzwischen Längen von über 60 Metern. Die Rotorblätter sind eine der Schwachstellen der Windenergieanlagen. Der Bruch eines Rotorblattes hat oft lange Stillstandszeiten zur Folge. Zur besseren Verfügbarkeit der Windenergieanlagen ist es wichtig, Wartungs- und Instandhaltungskonzepte auch für die Rotorblätter zu entwi-

### Abstract

During a research project in the years 2006 to 2009 nondestructive testing techniques for the use at wind turbine blades were developed. The aim was to invent an automated robot system that is able to investigate the turbine blades with thermography and acoustic techniques. The Institute for Construction Materials (IWB) in cooperation with the department “Nondestructive Testing and Monitoring Techniques” of the MPA Universität Stuttgart was responsible for the acoustic techniques. The two acoustic techniques used and adapted during this project are described in the following and examples of measurements at turbine blades are shown.

### Introduction

Not only the climate change but also the renunciation of nuclear power leads to a higher meaning of renewable energies. In Germany wind energy plays a major role and more than 40 % of the renewable generated electricity is produced from wind energy. To increase the efficiency of wind energy sites, bigger and more powerful wind turbines will be built. The turbine blades reach more than 60 meters length by now. But the turbine blades are one of the weak points of a wind turbine. The breakdown of only one blade causes long downtimes. To increase the availability of wind power plants it is important to develop maintenance procedures and concepts also for the turbine blades. Due to material thicknesses and other material properties, the direct transfer of techniques

ckeln. Aufgrund der großen Materialdicken und der besonderen Materialeigenschaften, ist es nicht möglich, Verfahren aus anderen Industriezweigen direkt zu übernehmen. Im Rahmen eines in den Jahren 2006 bis 2009 geförderten InnoNet-Projektes, sind Verfahren entwickelt worden, die zerstörungsfrei Fehlstellen schon im Frühstadium detektieren können. Neben der Thermografie kamen hier auch zwei akustische Verfahren zum Einsatz.

### Das Projekt RIWEA

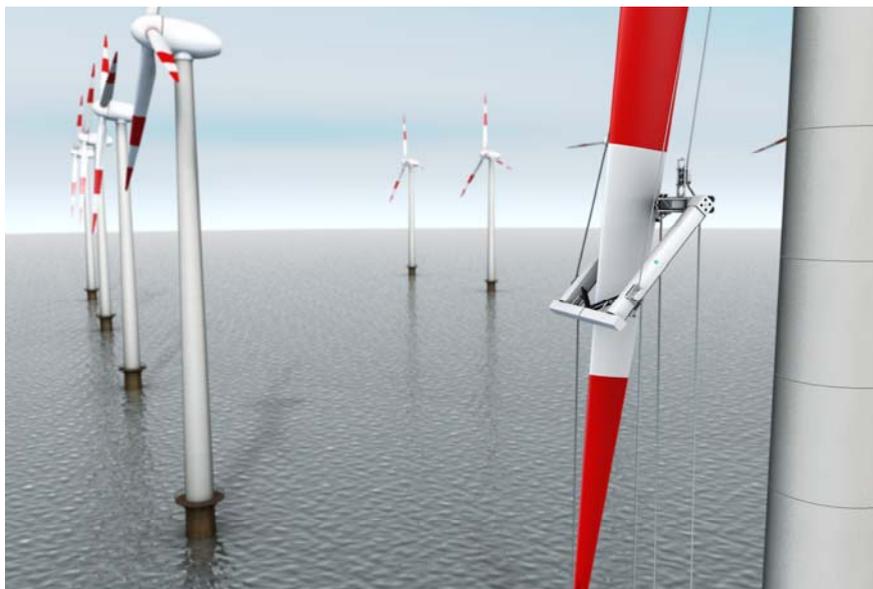
Das InnoNet-Projekt RIWEA – Roboter zur Inspektion der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Thermografie und Ultraschall- beschäftigte sich mit der Entwicklung zerstörungsfreier Prüfverfahren zum Einsatz auf einem automatisierten Prüfsystem zur Untersuchung der Rotorblätter von Windenergieanlagen. Beteiligt waren außer dem IWB, das Fraunhofer IFF in Magdeburg, das Fraunhofer WKI in Braunschweig sowie mehrere kleine und mittelständische Unternehmen.

used in other industrial branches is not possible.

Within a research project, funded in the years 2006 to 2009, nondestructive testing techniques for the detection of flaws within the turbine blades at an early stage were developed. Beside a thermographic technique two acoustic techniques were developed which will be shown in this paper.

### The project RIWEA

The project RIWEA –Robot system for the inspection of wind turbine blades using thermography and ultrasound- was funded as InnoNet-project by the German Federal Ministry of Economics and Technology. It deals with the development of nondestructive testing techniques for an automated inspection system for wind turbine blades. In addition to the Institute for Construction Materials (IWB) the Fraunhofer IFF, the Fraunhofer WKI and several small and medium sized companies took part in this research project.



**Abbildung 1:** Automatisiertes Trägersystem des Fraunhofer IFF zur Rotorblattprüfung.

**Figure 1:** Robot system for the inspection of wind turbine blades developed by Fraunhofer IFF.

Die akustischen Prüfverfahren, die im Folgenden vorgestellt werden, wurden vom IWB

The IWB was responsible for the acoustic techniques, which are presented in the fol-

entwickelt. Das WKI lieferte eine Untersuchungsmethode mit Thermografie. Die große Herausforderung war es, die drei Verfahren sinnvoll zu kombinieren. Das IFF entwickelte das automatisierte Trägersystem, das sich selbstständig am Rotorblatt hochziehen und orientieren kann. Das Trägersystem ist in Abbildung 1 zu sehen und wurde vom IFF zum Patent angemeldet [6]. Die Ergebnisse des Projektes sind in [1], [2] und [3] dargestellt.

### **Rotorblätter und typische Schädigungen**

Die Rotorblätter von Windenergieanlagen sind in der Regel in Leichtbauweise aus Kunststoffen und Holz gebaut. Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) werden kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) aufgrund des niedrigeren Preises oft vorgezogen. Jedoch gibt es auch Hersteller, die besonders bei langen Rotorblättern verstärkt auf CFK setzen.

Ein typischer Rotorblattquerschnitt ist in Abbildung 2 zu sehen. In der Regel bestehen die Rotorblätter aus zwei Hälften, die getrennt voneinander laminiert und anschließend zusammengeklebt werden. Das führt zu mehreren Verklebungsbereichen an der Vorderkante, der Hinterkante und in den Verbindungsbereichen der Gurte mit den Stegen. Die Vorder- und die Hinterkante, sowie die Hauptgurte bestehen meist aus faserverstärkten Kunststoffen. Die formgebenden Bereiche des Rotorblattes bestehen aus Leichtbaumaterialien wie Holz oder Kunststoffschäumen.

Die Schädigungsmechanismen in den Rotorblättern sind sehr vielfältig. Durch die starken Beanspruchungen im Betrieb, kann es zu Delaminationen insbesondere an der Hinterkante kommen. Aber auch in anderen Bereichen des Rotorblattes können sich verschiedene Schichten voneinander lösen. Bereits in der Produktion kann es passieren, dass die Rotorblatthälften fehlerhaft verklebt werden, dass Fasermatten Wellen aufweisen

lowing chapters. The WKI delivered a thermographic technique. The great challenge was the sensible combination of the three nondestructive testing techniques. The IFF constructed a robot system to hold the test systems that automatically accesses the wind turbine and is able to orient itself at the turbine blade. The robot system is shown in Figure 1. The IFF is holding the patent [6]. The results of the project can be found in [1], [2] and [3].

### **Wind turbine blades and typical damages**

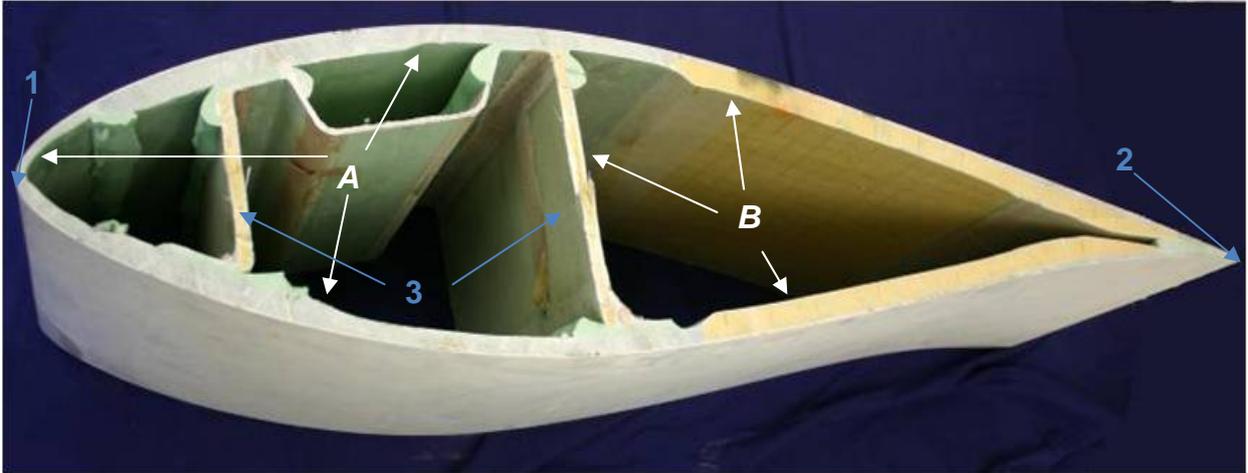
Wind turbine blades are usually built as lightweight constructions using materials like wood and plastic. Often glass fiber reinforced plastics (GFRP) are preferred to carbon fiber reinforced plastics (CFRP) due to the lower price. Nevertheless there are manufacturers that use CRFP, especially for the longer blades.

A typical wind turbine blade cross section is shown in Figure 2. Usually the blades are built out of two halves that are laminated separately and glued together afterwards. That leads to several bonding areas at the leading edge, the trailing edge and at the connections between shell and spar. The leading and the trailing edge and the main belts are built of fiber reinforced plastics. The shaping parts of the turbine blade often contain more lightweight materials like balsa wood and plastic foam.

The damages and damage sources are versatile. Due to the high strengths that affect all parts of the turbine during operation, delaminations in particular at the trailing edge are common. But also in other parts of the blade, delaminations of different layers or within the laminates can occur. Even during the manufacturing process it is possible that the bonding areas contain flaws which lead to disbonding immediately or at a later time. Sometimes the whole bonding process is deficient. During the automated injection of resin through the fibers, it may happen that

oder nicht vollständig von Harz durchtränkt werden. Verfahren zu finden, mit denen Fehlstellen frühzeitig detektiert werden können, war Ziel des Forschungsprojektes.

parts of the fibers aren't soaked with resin. Wrinkles within the fiber layers also can become a problem. It was the intention of the project to develop techniques that help to detect these flaws at an early stage.



**Abbildung 2:** Typischer Querschnitt eines Rotorblattes. Links im Bild ist die Vorderkante (1), rechts die Hinterkante (2) des Rotorblattes zu sehen. Die Stege (3) dienen zur Stabilisierung des Rotorblattes. Große Bereiche bestehen aus GFRP (A). In anderen Bereichen (B) sind zur Gewichtseinsparung Holz oder Kunststoffschäume in Sandwichbauweise eingebracht.

**Figure 2:** Typical cross-section of a wind turbine blade. On the left the leading edge (1) and the trailing edge (2) can be seen. The spars (3) stabilize the turbine blade. Large areas are built of GFRP. To reduce weight some regions (B) are built as composite of GFRP and wood or plastic foam.

### Das Ultraschall-Echo Verfahren

Das Ultraschall-Echo-Verfahren findet in vielen Industriezweigen insbesondere bei der Untersuchung von metallischen Werkstoffen Anwendung. Es basiert auf der Eigenschaft von Wellen, an Grenzflächen reflektiert zu werden. Ein Ultraschallpuls wird über einen Prüfkopf in das Bauteil gesendet und das Echo der Rückwand nach einer bestimmten Zeit registriert. Ändern sich die Lage der Rückwand, verschiebt sich auch der Zeitpunkt des Echos.

Mit diesem Verfahren ist es grundsätzlich möglich die Stegverklebungen der Rotorblätter von Windenergieanlagen zu prüfen. Eine besondere Herausforderung im Projekt war allerdings die gleichzeitige Nutzung von Thermografie und Ultraschallverfahren. Bei der Thermografie wird die Wärmeausbreitung im Innern des Rotorblattes mit einer Thermografiekamera beobachtet. Hierfür ist eine trockene Oberfläche erforderlich. Bei

### The Ultrasound-Echo Technique

The ultrasound-echo-technique is widely used in different industrial branches, especially for the evaluation of metallic materials. It is based on the nature of waves to reflect at material changes and boundaries. An ultrasonic pulse is sent into the material using a suitable ultrasonic transducer. The sound is reflected at the back wall and the echo is recorded after a certain time. If the location of the back wall changes, the time of the recorded echo changes as well.

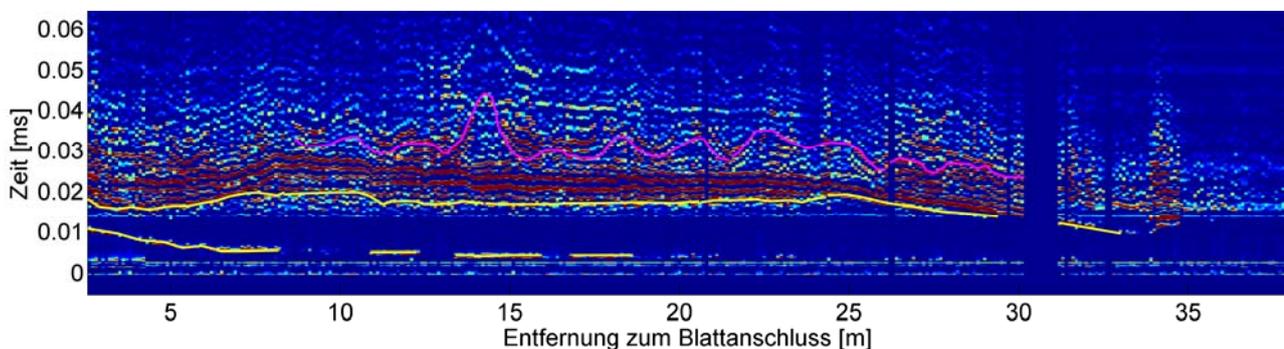
In general it is possible to use this technique to control the bonding between shell and spar within a wind turbine blade. A special challenge was the simultaneous use of ultrasonic and thermographic techniques. During a thermography the spreading of a heat pulse within the turbine blade is monitored using an infrared camera. Therefore it is important that the outer surface is dry. If ultrasound is used for material testing, in general

Ultraschallmessungen verwendet man in der Regel ein Koppelmittel um den Schall ins Material leiten zu können. Ein übliches Mittel ist Wasser. Aufgrund der gleichzeitigen Anwendung der Thermografie, musste eine Möglichkeit der trockenen Ankopplung gefunden werden. Außerdem sind die an Rotorblättern von Windenergieanlagen hauptsächlich verwendeten Materialien besonders stark schallschwächend –streuend. Das stellt besondere Anforderungen, wie leistungsstarke Ultraschallpulsgeber kombiniert mit hoch bedämpften Prüfköpfen, an das Prüfsystem [4].

Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IZFP in Dresden und der IMA Dresden, war es möglich, Messungen an einem kompletten Rotorblatt vor und nach einem zyklischen Belastungstest durchzuführen. Die Ergebnisse der Messung vor der Belastung sind in Abbildung 3 als B-Scan der Zeitsignale zu erkennen. Die verschiedenen Reflexionshorizonte sind mit farbigen Linien gekennzeichnet.

a coupling medium, e.g. water is essential to insert the sound wave into the material. Because thermography and ultrasound shall be used at the same time, a possibility to use a dry coupling had to be found. Furthermore the materials used in wind turbine blades are highly sound attenuating and scattering. Therefore a suitable ultrasonic system had to be developed. A high energy ultrasonic pulse generator had to be combined with high damping and low frequency ultrasonic transducers in a special ultrasonic system [4].

In cooperation with the Fraunhofer IZFP in Dresden and the IMA Dresden, it was possible to use the ultrasonic-echo-technique at the shell-spar-joint of an entire wind turbine blade. The measurements took place before and after a cyclic endurance testing. The results of the measurements before the endurance test are shown in Figure 3 as a B-Scan of the time series. The different reflecting layers are marked with color lines.



**Abbildung 3:** Zeitreihen der Ultraschall-Echo-Messungen an einem Rotorblatt von 40 m Länge als B-Scan. Die Reflexionshorizonte sind farbig gekennzeichnet.

**Figure 3:** B-Scan of the Time-signals of the ultrasound-echo-measurements at a 40 m wind turbine blade. Reflection horizons are marked.

Die erste Reflexion (gelb gekennzeichnet), die nahe dem Blattanschluss später aufgezeichnet wird, stammt von einer dünnen Lage CFK. Sie ist aufgrund von Eigenschaften des Messsystems nicht überall gut erkennbar. Die zweite Reflexion (ebenfalls gelb markiert), die fast über die gesamte Rotorblattlänge gut zu erkennen ist, gehört zur

The first reflection (marked in yellow), that is recorded later near to the flange, belongs to a thin layer of CFRP. Due to certain properties of the ultrasonic measurement system this reflection isn't visible in all the data. The second reflection (also marked in yellow) that can be seen nearly over the full length of the blade is related to the back wall of the

Rückwand des GFK-Gurtes. Die wellige Reflexion (in rosa eingezeichnet) stammt von der Stegverklebung. Aufgrund unterschiedlicher Verklebungsdicken, verläuft sie nicht so gerade wie die Reflexionen der Laminates.

Betrachtet man die Reflexionen der Verklebung nun genauer, so stellt man fest, dass es Bereiche gibt, wo die Verklebungsreflexion besonders stark ist oder verschwindet. Der Vergleich der Messungen mit den Wiederholungsmessungen nach den Belastungstests, der in [4] beschrieben ist, zeigte besonders in diesen Bereichen Veränderungen. Weitere Ergebnisse befinden sich außerdem in [4].

### **Die Lokale Resonanzspektroskopie**

Das zweite akustische Verfahren, das im Rahmen des Projektes eingesetzt wurde, beruht auf den in der Rotorblattprüfung üblichen Klopfests. Mit einem harten Gegenstand wird die Oberfläche abgeklopft und Hohlstellen sind durch Klangänderungen identifizierbar. Durch Verwendung eines instrumentierten Prüfhammers, kann das Zeitsignal der Kraftanregung mit aufgezeichnet werden. Die Aufnahme des Klangs wird über ein Mikrofon realisiert. Die lokale Resonanzspektroskopie unterscheidet sich von den ähnlichen aus der Fertigungskontrolle bekannten Resonanzuntersuchungen dadurch, dass die detektierten Fehlstellen im Material lokalisiert werden können. Die dahinterstehende Mechanik ist von Cawley und Adams [5] erläutert worden. Die Änderung der lokalen Eigenschaften eines Bauteils, hat Auswirkungen auf die sogenannte Kontaktsteifigkeit zwischen Anregungshammer und Material. Dieses führt zu einer veränderten Kontaktzeit zwischen beiden, sowie zu einer Änderung des erzeugten Klangs. Der Vorteil der lokalen Resonanzspektroskopie ist, dass sie, abgesehen vom Hammerimpakt, berührungslos und vor allem ohne Koppelmedium durchführbar ist.

GFRP belt. The wavy reflection (marked in pink) belongs to the bonding between shell and spar. Due to different bonding thicknesses and qualities these reflection isn't a straight line like the reflections of the laminates.

If you look closely at the reflection of the bonding, it can be seen, that there are areas where the reflection is particularly strong or weak. The comparison to the measurements recorded after the endurance testing, which can be found in [4] shows especially differences in these areas. Further results also can be found in [4].

### **The local resonance spectroscopy**

The second acoustic technique used during this research project, bases on the coin-tapping tests that are common during wind turbine blade inspections. The surface is hit with a hard item and hollow areas can be identified by the change in sound. By the use of an instrumented impulse hammer the time series of the exciting force can be recorded additionally. The sound signal is recorded using a microphone. Thus the local resonance spectroscopy can be compared to the resonance analyses used in process control. The big difference is that the flaws are not only detected but localized. The mechanic behind this technique is explained by Cawley and Adams [5]. The change of local properties of the material leads to changes in the so-called contact-stiffness between hammer and material. This causes changes in the contact time and in the recorded sound signal. One of the big advantages of the local resonance spectroscopy compared to the ultrasound-echo technique is the fact, that it works, disregarding the hammer impact, contact-free and without couplant.

The local resonance spectroscopy was applied to the wind turbine blade owned by the IMA Dresden as well. During a preliminary

Das Verfahren wurde ebenfalls am Rotorblatt der IMA Dresden durchgeführt. Im Rahmen einer Voruntersuchung durch einen Gutachter, waren hier Bereiche mit sichtbaren und hörbaren Veränderungen im Material markiert worden. Dies ist in Abbildung 4 links zu sehen. In Abbildung 4 rechts wurde dem Foto die Auswertung der Kraftanregung der lokalen Resonanzspektroskopie überlagert. Rote Bereiche entsprechen hier Bereichen mit verlängerter Kontaktzeit. Dies ist auf eine Hohlstelle zurückzuführen. Man erkennt, dass die roten Bereiche sich gut mit dem angezeichneten Hohlklang decken, aber auch sehr oberflächennahe Materialänderungen sich als lokale Änderungen zeigen. Die Auswertung der Klangsignale deckt sich in weiten Teilen mit diesen Ergebnissen. Weiterführende Ergebnisse sind in [4] beschrieben.

investigation by a turbine blade examiner, areas with visible or audible material changes were marked. The left picture of figure 4 shows one of these areas. The right picture shows the results of the analysis of the excitation forces of the local resonance spectroscopy as overlay plot. Red areas represent the areas with prolonged contact times between hammer and impact. This is caused by a weakening of the material due to a cavity. It can be seen, that the red area corresponds well to the area marked as hollow. Other shallow material changes are also seen as local changes in color. The analyses of the recorded sound signals show mainly the same results. Further results are described in [4].



**Abbildung 4:** Links: Foto der eingezeichneten Fehlstellen im Material. Rechts: Foto der Fehlstelle überlagert mit den Ergebnissen der lokalen Resonanzspektroskopie.

**Figure 4:** Left: photo of the marked flaws within the material. Right: Photo of the flaws overlaid with the results of the local resonance spectroscopy

### Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojektes RIWEA wurden zwei akustische Prüfverfahren und ein Thermografieverfahren zur Untersuchung der Rotorblätter von Windenergieanlagen sowie ein Trägersystem zu deren automatisierter Anwendung entwickelt. Bereits etablierte Verfahren aus anderen Industriezweigen konnten aufgrund verschie-

### Summary and Outlook

During the research project RIWEA two acoustic nondestructive testing techniques and a thermographic technique for the inspection of wind turbine blades as well as a robot system for automated application were developed. Due to different boundary conditions the direct transfer of well-established techniques from other industrial branches

dener Randbedingungen nicht direkt übernommen werden. Die Anpassung der Verfahren war notwendig. Das IWB befasste sich mit der Entwicklung der akustischen Verfahren. Es wurde das Ultraschall-Echo-Verfahren zur Untersuchung der Klebeverbindung zwischen Gurt und Steg verwendet. Zur Detektion oberflächennaher Delaminationen und Hohlstellen eignete sich die lokale Resonanzspektroskopie. Die Anwendbarkeit beider Verfahren konnte an einem Rotorblatt beispielhaft demonstriert werden. Beide Verfahren sind für die Anwendung auf einem automatisierten System konzipiert und entwickelt. Manuelle Prüfungen bei In-Service-Inspektionen sind ebenfalls möglich. Die Einbindung der Verfahren in Produktionsprozesse im Rahmen einer Qualitätssicherung ist der nächste sinnvolle Schritt.

#### Anmerkungen

Das Projekt wurde mit Mitteln vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Rahmen des Programms InnoNet unter dem Förderkennzeichen 16IN0354 gefördert.

was not possible. The adaption of nondestructive testing techniques was inevitable. The IWB was responsible for the development of the acoustic techniques. For the investigation of the bonding areas between shell and spar an ultrasound-echo-technique was used. To detect shallow delaminations and cavities the local resonance spectroscopy was suitable. The applicability of both techniques could be demonstrated exemplarily at a whole wind turbine blade. Both techniques were designed to work on an automated robot system. Manual tests used during in-service inspections are possible as well. The embedding of nondestructive testing techniques in manufacturing processes as means of quality assurance now are the next sensible step.

#### Annotation

The project was funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology during the program InnoNet under the support code 16IN0354.

#### Literatur / References

- [1] **Aderhold, J.; Meinlschmidt, P.; Schlüter, F. (2009):** Roboter zur Inspektion der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Thermographie und Ultraschall : RIWEA. Abschlussbericht des Fraunhofer WKI zum Forschungsprojekt. Herausgegeben von TIB/UB. Hannover
- [2] **Elkmann, N.; Felsch, T.; Förster, T. (2009):** Roboter zur Inspektion der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Thermographie und Ultraschall : RIWEA. Abschlussbericht des Fraunhofer IFF zum Forschungsprojekt. Herausgegeben von TIB/UB. Hannover.
- [3] **Jüngert, A.; Große, C. U. (2009):** Roboter zur Inspektion der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Thermographie und Ultraschall - RIWEA. Teilvorhaben: Entwicklung der Ultraschalltechnik : Abschlussbericht. Herausgegeben von TIB/UB. Hannover.
- [4] **Jüngert, A. (2010):** Untersuchung von GFK-Bauteilen mit akustischen Verfahren am Beispiel der Rotorblätter von Windenergieanlagen. Dissertation. Universität Stuttgart, 2010
- [5] **Cawley, P.; Adams, R.D. (1988):** The Mechanics of the Coin-Tap Method of Non-Destructive Testing. In: Journal of Sound and Vibration, Jg. 122, S. 299–316.
- [6] **Elkmann, N.; Förster, T.; Felsch, T.; Fritzsche, M.; Behrens, R. (11.04.2008):** Vorrichtung zum Ermöglichen des Zugangs zu einer sich hoch über dem Boden erstreckenden Anordnung und Verfahren zum Installieren einer solchen Vorrichtung, am 11.04.2008. Veröffentlichungsnummer: DE102008019680A1 12.11.2009.

**KORROSIONSVORHALTEN VON GESCHWEIßTEM NICHTROSTENDEM STAHL DER  
WERKSTOFF-NR. 1.4571 BEI ATMOSPHERISCHER BEANSPRUCHUNG –  
ERGEBNISSE BAUPRAKTISCHER UNTERSUCHUNGEN  
CORROSION BEHAVIOUR OF WELDED STAINLESS STEEL OF THE MATERIAL  
NO. 1.4571 IN ATMOSPHERIC ATTACK –  
RESULTS OF BUILDING PRACTICE INVESTIGATIONS**

U. Nürnberger, C. Köse

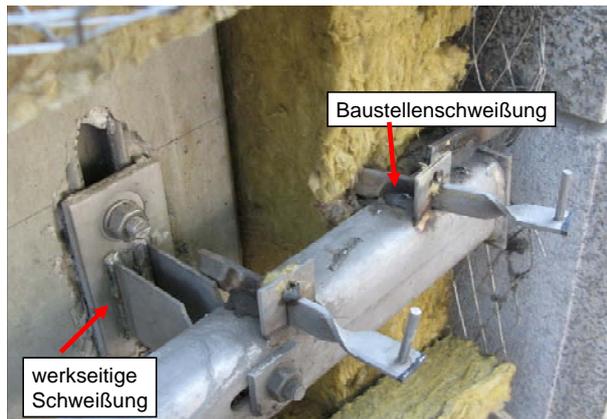
**Kurzfassung:** In der neuen Zulassung für nichtrostende Stähle wird für schwer zugängliche Bauteile, wie auch für Anschweißanker hinter Bekleidungen aus Naturwerksteinplatten, unabhängig von der tatsächlichen Korrosionsbeanspruchung, grundsätzlich Stahl einer sog. Korrosionswiderstandsklasse III (z.B. Werkstoff-Nr. 1.4571) gefordert. Es werden Betrachtungen zur Korrosion von Anschweißankern aus nichtrostendem Stahl der Werkstoff-Nr. 1.4571 bei Bewitterung und bei Anwendung als Anschweißanker bei Naturwerksteinfassaden angestellt. Weiterhin werden Ergebnisse korrosionstechnischer Untersuchungen an derartigen Ankern aus bestehenden, bis zu 23 Jahre alten Bauwerken und nach Auslagerung in Industrie- und Meeresklima wiedergegeben. Bei sachgerechter Interpretation der dargestellten Zusammenhänge kann gefolgert werden, dass Maßnahmen zur Entfernung von Anlauffarben bei atmosphärisch beanspruchten geschweißten Verbindungen und im Fall der hinterlüfteten Außenwandbekleidungen aus Sicht der Korrosion technisch nicht begründet und unnötig sind.

**Abstract.** In the new approval for stainless steel, for hard-to-reach devices as well as weld-on anchor behind lining made of natural stone, steel belong to corrosion resistance class III (material No. 1.4571 for example) is strictly stipulated independently of the real corrosion exposure. In the contribution considerations are made about the corrosion of stainless steel weld-on anchors of the material No. 1.4571 of claddings for external walls ventilated at the rear. Furthermore, results of corrosion-technical investigations on such anchors of buildings which are up to 23 years old and after storage in industrial atmosphere and maritime climate are reported. With proper interpretation of the shown connections it must necessarily be concluded that the measures concerning the removal of temper colours on atmospherically exposed welded connections are technically not founded and unnecessary from the corrosion point of view if ventilated facades are taken into consideration.

## 1 Sachverhalt

In der letzten Zeit fanden in Fachkreisen und bei Bauherrn wiederholt Diskussionen über die korrosionsschutzgerechte Ausführung von sog. Anschweißankern für hinterlüftete Außenwandbekleidungen Natursteinfassaden statt. Diese Anker dienen der Befestigung einer Außenbekleidung aus Natursteinplatten auf einem Untergrund aus Beton. Sie befinden sich zwischen der Wand und der Bekleidung

in einem mit der Außenluft in Verbindung stehenden Luftspalt und übertragen die Lasten aus dem Eigengewicht aller Fassadenelemente sowie zusätzlich wirkende dynamische Windlasten auf das Bauwerk. Diese als Befestigungsmittel eingesetzten Anschweißanker werden aus nichtrostendem Stahl einer Werkstoff-Nr. 1.4571 hergestellt und auf der Baustelle mittels Lichtbogenhandschweißens gefertigt. Ein typisches Ausführungsbeispiel zeigt Bild 1.



**Bild 1:** Anschweißanker für eine hinterlüftete Außenwandbekleidung aus Naturstein

**Figure 1:** Weld-on anchors for an external wall ventilated at the rear and made of natural stone

Ein wesentlicher Punkt der Diskussion betraf die Frage, ob die Entfernung von schweißbedingten Anlauffarben (Bild 2) erforderlich ist, um unter den Bedingungen einer üblichen Stadtatmosphäre eine ausreichend hohe Korrosionsbeständigkeit sicherzustellen.



**Bild 2:** Anlauffarben bei einem Anschweißanker

**Figure 2:** Temper colours on a weld-on anchor

In der Fachliteratur sind keinerlei Hinweise zu finden, dass Anlauffarben von Schweißverbindungen aus den Stählen einer Werkstoff-Nr. 1.4571 unter „normalen“ atmosphärischen Korrosionsbedingungen im Zeitraum einer üblichen Nutzung einen die Tragfähigkeit abmindernden Korrosionsabtrag herbeiführen. Auch sind bei ausgeführten älteren Natusteinfassaden nie schädigende Korrosionsangriffe an Schweißverbindungen dieser Stähle er-

kannt worden. Trotzdem fordert das für hinterlüftete Außenwandbekleidungen zuständige Regelwerk (Abschn. 2), dass auch bei geschweißten Stählen der Sorte 1.4571 Anlauffarben restlos entfernt werden müssen. In zwei Untersuchungen der Universität Stuttgart [1, 2] wurde daher die Frage nach der grundsätzlichen Notwendigkeit einer Entfernung von schweißbedingten Anlauffarben bei atmosphärischer Korrosionsbeanspruchung überprüft. Hierzu wurde die Literatur gesichtet, es wurden geschweißte Stähle in der Meeresatmosphäre ausgelagert und es erfolgten Untersuchungen an bestehenden älteren Bauwerken.

## 2 Regelwerke für den Korrosionsschutz

Zuständige Regelwerke, die den Korrosionsschutz von Konstruktionsteilen bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen betreffen, sind:

- die bauaufsichtliche Zulassung Z-30.3-6 „Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen“ (2009) [3],
- und die DIN 18516-1 (1999) „Außenwandbekleidungen, hinterlüftet“ [4].

Hier wird in erster Linie die technische Korrosionsbeständigkeit (sicherheitsrelevante Aspekte des Korrosionsschutzes) behandelt und geregelt. Die erforderliche Werkstoffauswahl

bei atmosphärischer Exposition hängt ab von den jeweiligen Korrosionseinwirkungen: Einwirkung von Feuchte, von Chloriden und von Schadgasen, pH-Wert des Mediums an der Oberfläche sowie die Lage der Bauteile (z. B. beregnet ja/nein und die Zugänglichkeit des Bauteils) [3]. Zugänglich bedeutet, dass alle Stahlbauteile ohne wesentliche bauliche Veränderungen erreichbar sind. Dadurch kann deren Schutz kontrolliert und im Bedarfsfall mit vertretbarem Aufwand instandgesetzt werden. Anschweißanker hinter Bekleidungen

aus Naturwerksteinplatten gelten i. allg. als schwer zugänglich. In der neuen Zulassung für nichtrostende Stähle wird für solche Bauteile, unabhängig von der tatsächlichen Korrosionsbeanspruchung, grundsätzlich Stahl einer sog. Korrosionswiderstandsklasse III (z. B. Werkstoff-Nr. 1.4571) gefordert.

Wegen der von verschiedener Seite gesehene möglichen korrosionsbedingten Einschränkung der Dauerhaftigkeit von Befestigungsmitteln wird bei Schweißverbindungen auch der Umgang mit Anlauffarben geregelt. Verbindungen, die nicht unter Schutzgas erstellt werden, weisen bekanntlich unmittelbar neben der Schweißnaht einen schmalen Saum sog. Anlauffarben (dünne Oxidschichten) auf. Sie können das Korrosionsverhalten (die Passivierung) von nichtrostenden Stählen an diesen Stellen unter Korrosionsbelastung nachteilig beeinflussen [5]. Daher wird seitens der Zulassung [3] u. a. gefordert, dass bei allen Anwendungen in der Bautechnik, also auch bei normaler atmosphärischer Beanspruchung, eine Nachbehandlung der Schweißnähte zur Entfernung der Anlauffarben durchzuführen ist, wenn aus Korrosionsschutzgründen Stähle einer Korrosionswiderstandsklasse III und höher verlangt werden.

Das Korrosionsverhalten ungeschweißter nichtrostender Stähle wurde in [1,6] ausführlich behandelt.

**3 Korrosionsverhalten geschweißter nichtrostender Stähle**

Bei nichtrostenden Stählen ist die Korrosionsbeständigkeit im Bereich von Schweißverbindungen abgemindert, was sich bei Angriff eines wässrigen Elektrolyten im Sinne einer Korrosionsverstärkung auswirken kann. Neben Schweißverbindungen ist allerdings nur dann mit beachtenswerten Korrosionsangriffen in Form von Lochkorrosion bzw. Spaltkorrosion zu rechnen, wenn gleichzeitig folgende Voraussetzungen vorliegen [5, 9, 10]:

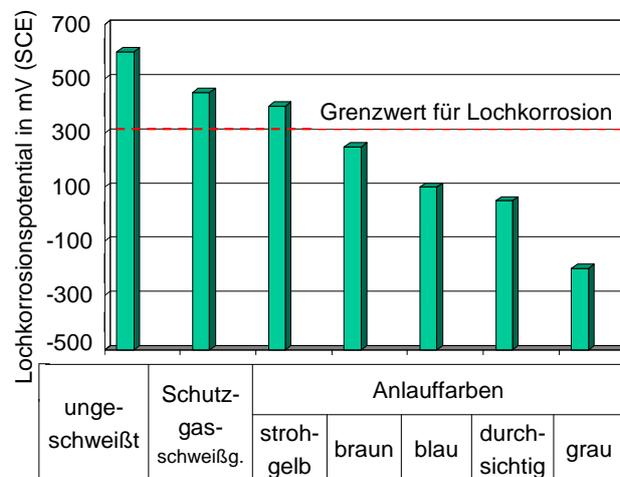
Im Schweißnahtbereich sind infolge unvollständiger oder fehlender Schutzgasführung Oxidfilme (Anlauffarben) und/oder Zunderschichten vorhanden.

Die Schweißnaht wird wiederholt oder ständig von einem wässrigen Medium mit erhöhten Schadstoffkonzentrationen benetzt. Dabei haben vor allem chloridhaltige und/oder saure wässrige Medien einen ungünstigen Einfluss.

Fehlen die letztgenannten Voraussetzungen, wie bei Konstruktionen in der Atmosphäre und vor allem auch im Hinterlüftungsraum von Fassaden in normaler städtischer Umgebung, so sind Anlauffarben ohne Bedeutung im Hinblick auf eine abtragende Korrosion und eine Abminderung der Tragfähigkeit (siehe unten).

**Korrosion in wässrigen Elektrolyten**

Die Oxidfilme durchlaufen mit zunehmender Filmdicke die Farbskala gelb, braun, violett, dunkelblau, hellblau, durchsichtig und grau.



**Bild 3:** Lochkorrosionspotentiale des ungeschweißten und geschweißten Stahls 1.4404 in 1M NaCl-Lösung, potentiodyn. Versuche (Morach)

**Figure 3:** Pitting corrosion potentials of unwelded and welded steel material No. 1.4404 in 1M NaCl-solution, potentiodynamic tests (Morach)

Bild 3 zeigt entsprechende Ergebnisse elektrochemischer Versuche in 1M Natriumchloridlösung. In der Reihenfolge der aufgeführten Anlauffarben, also mit zunehmender Dicke der Oxidschichten nimmt das Loch-

fraßpotential in der Chloridlösung ab, was auf eine Zunahme der Korrosionsempfindlichkeit hinweist. Der Grenzwert, bei dessen Unterschreitung in der 1 M Natriumchloridlösung Lochkorrosion eintritt, wurde mit +300 mV angenommen. Bei Angriff wässriger Lösungen mit nur geringem Chloridgehalt wären die Lochfraßpotentiale deutlich höher. In nahezu chloridfreien Lösungen würden diese für alle Formen von Anlauffarben oberhalb des genannten Grenzwertes liegen. Auf das Korrosionsverhalten der nichtrostenden Stähle können die Anlauffarben folgenden Einfluss haben [9, 11]:

- Bei ansteigender Dicke behindern sie zunehmend die Passivierung.
- Da die Anlauffarben (Oxidschichten) dem darunter liegenden Werkstoff Chrom entziehen und in die Oxide einbinden, ist der Chromgehalt unmittelbar unterhalb der Oxidschichten abgemindert.

Dadurch kann es bei nicht ausreichend hoch legierten nichtrostenden Stählen in aggressiven, insbesondere chloridhaltigen und/oder sauren wässrigen Lösungen, im Bereich der Anlauffarben, also in einem eng begrenzten Bereich neben der Schweißnaht, zu einem Korrosionsangriff mit einhergehendem Materialabtrag kommen. Unter milden Korrosionsbedingungen, wie in salzarmen Wässern oder unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen, können solche Korrosionsangriffe nicht stattfinden und wurden auch niemals festgestellt.

### **Korrosion in der Atmosphäre**

Bei Langzeituntersuchungen an verschiedenen nichtrostenden Stählen an der Atmosphäre wurde mehrfach festgestellt, dass geschweißte Stähle einer Widerstandsklasse II und III im Schweißnahtbereich keine signifikanten Angriffe aufweisen [7]. Auch bei älteren hinterlüfteten Außenwandbekleidungen im Zentrum einer deutschen Großstadt wurden

an geschweißten Befestigungsmitteln aus dem Werkstoff 1.4571, bei denen die Anlauffarben nicht entfernt wurden, keinerlei Korrosionsangriffe festgestellt [12]. Ausfälle von Anschweißankern durch Korrosionsschäden im Bereich von Schweißverbindungen sind unbekannt.

## **4 Auslagerung in Industrie- und Meeresklima**

In eigenen Untersuchungen [2] wurden Anschweißanker aus dem Werkstoff 1.4571, bei denen die Anlauffarben nicht entfernt wurden, in Industrie- und in Meeresklima ausgelagert. Die Proben waren sowohl unmittelbar bewittert (berechnet) als auch vor Beregnung geschützt. Bei den letztgenannten Anschweißankern sollte festgestellt werden, ob es bei fehlender Beregnung zu einer Aufkonzentration an Chloriden und demnach zu einer verstärkten Korrosion kommt.

### **Auslagerung in Industrieklima (Hüttenwerk)**

Die Auslagerung in Industrielatmosphäre erfolgte in Duisburg-Huckingen auf dem Dach der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH. Die Atmosphäre ist durch mäßig erhöhte Schwefeldioxidgehalte (10 bis 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) und erhöhte Staubbiederschläge um 200  $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  gekennzeichnet. Hinsichtlich des Schwefeldioxidgehaltes ist die Atmosphäre einer Korrosivitätskategorie C3 nach DIN EN ISO 12944-2 [8] zuzuordnen.

Alle bewitterten Anschweißanker Proben waren nach 3 Jahren Auslagerung außerhalb der Schweißnähte ohne Rostbefall und ohne sichtbaren Korrosionsangriff. Im Bereich der Anlauffarben wurde stellenweise ein sehr dünner Rostbelag (vielfach als „Flugrost“ bezeichnet) festgestellt; ein Angriff des Stahluntergrundes wurde nicht erkannt. Die der Außenatmosphäre ausgesetzten abgedeckten Proben waren nach 3 Jahren zwar stark ver-

schmutzt, jedoch zeigte sich an keiner Stelle Korrosion in Form von Rost oder Stahlangriff.

einer Korrosivitätskategorie C4 nach DIN EN ISO 12944-2 [8] zuzuordnen.



**Bild 4:** Anschweißanker nach 5 Jahren Bewitterung im Meeresklima von Helgoland (oben: Originalzustand, unten: nach Ablösen von Korrosionsprodukten in stark verdünnter inibierter Sparbeize)

**Figure 4:** Weld-on anchor after 5 years outdoor weathering in the sea-climate of Helgoland (on top: original state, below: after stripping the corrosion products in highly thinned inhibit pickling inhibitor)

#### Auslagerung in Meeresklima (Helgoland)

Die Auslagerung in Meeresklima erfolgte auf der Insel Helgoland, jeweils ca. 40 m von der Küste entfernt. Die frei bewitterten (beregneten) Proben wurden 5 Jahre auf dem Atmosphärenstand der MPA Universität Stuttgart ausgelagert. Die nicht beregneten Proben lagen 3 Jahre auf einem Prüfgelände der Universität Hamburg unter einem Vordach.

Die Atmosphäre ist durch einen stark erhöhten Aerosolgehalt gekennzeichnet. Hinsichtlich des Chloridgehaltes ist die Atmosphäre

**Bild 5:** Anschweißanker nach 3 Jahren Lagerung unter einem Vordach im Meeresklima von Helgoland (oben: Originalzustand, unten: nach Ablösen von Korrosionsprodukten in stark verdünnter inibierter Sparbeize)

**Figure 5:** Weld-on anchor after 3 years of storage under a porch in the sea-climate of Helgoland (on top: original state, below: after stripping the corrosion products in highly thinned inhibit pickling inhibitor)

Alle Proben waren außerhalb der Schweißnähte ohne Rostbefall und sichtbaren Korrosionsangriff. Im Bereich der Anlaufarben zeigt sich stets ein Belag von Rost (Bild 4 und

5, oben). Auffallend war, dass der Rostsaum bereits nach wenigen Monaten auftrat, innerhalb der folgenden Jahre wurden jedoch keine für das Auge erkennbaren Veränderungen erkannt. Bei den nach mehreren Jahren entnommenen Ankern wurden in keinem Fall im Bereich der Anlauffarben auch nur Ansätze eines Materialabtrages in Form einer Flächen- oder Lochkorrosion festgestellt (Bild 4 und 5, unten). Zwischen dem Korrosionsverhalten der berechneten und nicht berechneten Proben wurde kein bedeutsamer Unterschied erkannt. In beiden Fällen kam es in Übereinstimmung mit anderweitigen Untersuchungen (Abschn. 3) zu keinen signifikanten Angriffen.

## 5 Untersuchungen an älteren Natursteinfassaden

In den Jahren 2009 bis 2011 wurden eine Reihe von 8 bis 23 Jahre alten Bauwerken mit hinterlüfteter Außenwandbekleidung und Stützen aus Naturwerkstein mit offenen Fugen im Hinblick auf den Korrosionszustand der Anschweißanker aus nichtrostendem Stahl untersucht [1]. Für alle Fassaden treffen die folgenden Umstände zu: Sie befinden sich im städtischen Bereich von Stuttgart bzw. Ludwigsburg zwischen 2 und 15 m von tausalzbehandelten verkehrsreichen Straßen entfernt. Bei den Anschweißankern handelt es sich um nichtrostende Stähle der Werkstoff-Nr. 1.4571 einer Korrosionswiderstandsklasse III. In jedem Fall waren Anlauffarben an den Schweißverbindungen vorhanden. Die Verbindungen waren nicht umlaufend verschweißt. Die Anlauffarben waren nur teilweise zugänglich, so dass eine Vorgehensweise im Sinne der bauaufsichtlichen Zulassung für nichtrostende Stähle [3] (Beseitigung der schweißbedingten Anlauffarben) nicht möglich war. Die Ergebnisse der Untersuchungen an Anschweißankern von Fassaden im Spritzwasser- und Sprühnebelbereich lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Auf den Anschweißankern im Hinterlüftungsbereich der Fassaden und der Kaskierung der an den Hinterlüftungsbereich angrenzenden Wärmedämmung wurden durch röntgenographische (Rost) und nasschemische Untersuchungen (Stahloberfläche, Wärmedämmung) lediglich Spuren bis geringfügig erhöhte Gehalte an Chlor (Chlorid) festgestellt (Tabelle 1). Die Chloridbelegungen der Ankeroberflächen bei Bauwerken in der Spritzwasser- bzw. Sprühnebelzone lagen in jedem Fall unter dem gelegentlich als korrosionsauslösend genannten Wert von 0,2 g/m<sup>2</sup>. Die Entfernung der Natursteinfassaden zur tausalzbehandelten Straße hat keinen systematischen Einfluss auf die hinter der Bekleidung vorgefundenen Chloridgehalte.

**Tabelle 1:** Angaben zu den untersuchten Bauwerken sowie den Chloridgehalten auf den Anschweißankern, im Rost und auf der Wärmedämmung [1]

**Table 1:** Details concerning the investigated constructions and the chloride content on weld-on anchors, in rust and on thermal insulation

Bauwerk	Alter	Distanz zur Bundesstraße m	Cl auf Stahl	Cl im Rost	Cl auf WD
	Jahre		g/m <sup>2</sup>	M. %	g/m <sup>2</sup>
1	17	15	-	0,37	-
2	23	7	0,122	1,68	0,085
3a	23	12	0,025	0,31	-
3b	23	12	0,078	0,97	-
4	22	2	0,026	0,35	-
5a	8	4	0,0012	-	0,032
5b	8	7	0,0012	-	0,019

Cl=Chlorid, WD=Wärmedämmung

- Auf den Oberflächen wurden auch mäßig hohe Gehalte an Schwefel (Sulphat), ein Resultat der Verbrennung fossiler Brennstoffe in früheren Jahren, festgestellt.
- Alle Schweißnähte wiesen Reste von Schweißzunder auf. Die Bereiche mit Anlauffarben waren von einer dünnen Rostschicht überdeckt (Bild 6, oben).
- Nach dem Entfernen der dünnen Rostbeläge im Bereich von Anlauffarben wurden keinerlei Ansätze einer abtragenden Korro-

sion (Lochkorrosion) festgestellt (Bild 6, unten).



**Bild 6:** Schweißnähte von Ankern des Bauwerks 2 nach 23 Jahren im Originalzustand (oben) und nach Ablösen der Korrosionsprodukte (unten)

**Figure 6:** Welds of anchors of the building of the designation 2 after 23 years, in the original state (on top) and after stripping of the corrosion products (below)

- Auch im Fußbereich der Fassaden, die unmittelbar an tausalzbehandelte Gehflächen angrenzen und bei denen eine wiederholte Benetzung mit tausalzhaltigem Wasser angenommen werden kann, waren die Anschweißanker völlig frei von einer abtragenden Korrosion.

## 6 Folgerungen

Es existieren eine Reihe gewichtiger Argumente, welche gegen die Notwendigkeit einer Entfernung von Anlauffarben sprechen. Die-

ses gilt für die atmosphärische Korrosion geschweißter nichtrostender Stähle im Allgemeinen und für die hier eingehender betrachteten Anschweißanker für Natursteinfassaden im Besonderen:

- Die geforderte Vorgehensweise, nämlich besondere Maßnahmen gegen vor allem schweißnahtinduzierte Lochkorrosion zu treffen, ist wegen Unzugänglichkeit oft technisch schwierig bis unmöglich. Das betrifft vor allem Teile, die nicht umlaufend verschweißt werden, was bei Anschweißankern nahezu die Regel ist.
- Die Entfernung von Anlauffarben wird auf der Baustelle üblicherweise mit einer Drahtbürste durchgeführt. Durch diese „Nachbehandlung“ der Schweißverbindung kann man jedoch keinesfalls überall die Oxidschichten entfernen, da die Schweißverbindung bei speziellen Ausführungen durch die Bürste nicht erreicht werden kann. Ein zu starkes Bürsten erzeugt zudem Kratzer auf der Oberfläche, die bekanntlich eine Korrosion begünstigen.
- Eine ordnungsgemäße Entfernung von Anlauffarben ist nur durch ein Auftragen von Beizpasten möglich [13]. Nach Einwirkung der Beizpasten müssen diese durch Hochdruckwasserstrahlen und intensives Nachspülen entfernt werden, was unter den Bedingungen einer Natursteinfassade extrem schwierig und aufwendig ist. Korrosionsschäden durch die Beizbehandlung und eine ungenügende Nachreinigung sind sehr wahrscheinlich, da ein Verbleiben von Beizrückständen im Bereich der Schweißnähte und vor allem in den vorhandenen Spalten kaum zu vermeiden ist.
- Es bestehen auch berechtigte Zweifel über die Notwendigkeit der o. g. Anforderungen: Die Anlauffarben können selbstverständlich nur im Zusammenhang mit dem Vorhandensein von Feuchte (Wasser) und dem gleichzeitigen andauerndem Einwirken von

korrosionsfördernden Substanzen ausreichender Konzentration bei einem an sich korrosionsbeständigen Werkstoff wie dem Werkstoff 1.4571 Lochkorrosion hervorgerufen.

Wie die Untersuchungen in der Industrie- und Meeresatmosphäre in Übereinstimmung mit anderweitigen Untersuchungen gezeigt haben, weist Stahl einer Widerstandsklasse III (1.4571) auch unter diesen an sich sehr ungünstigen Korrosionsbedingungen im Bereich der Anlauffarben von Schweißnähten eine sehr hohe Lochkorrosionsbeständigkeit auf. Leichte oberflächige Anrostungen ohne erkennbaren Flächenabtrag sind die Folge einer begrenzten Chromverarmung an der unmittelbaren Oberfläche als Folge der Oxidbildung beim Schweißen. Ein Verlust an Tragwirkung aufgrund einer verstärkten Korrosion neben der Schweißverbindung ist daher auszuschließen. Das gilt natürlich im besonderen Maße für Schweißverbindungen in einer normalen Stadtatmosphäre.

Im Fall der Anschweißanker von hinterlüfteten Natursteinfassaden wurde immer wieder vermutet, dass sich bei Fassaden im Einzugsbereich von Tausalzen diese Salze hinter der Fassade auf den Befestigungsmitteln anreichern können. Sie sollen mit dem Hinterlüftungsstrom hinter die Bekleidung aus Natursteinplatten gelangen. Dieses konnte jedoch durch die angestellten Untersuchungen nicht bestätigt werden. Einerseits gelangen selbst unmittelbar neben verkehrsreichen und wiederholt mit Tausalz behandelten Straßen nur Spuren von Chloriden in den Hinterlüftungsraum. Andererseits weisen die Schweißnähte der nichtrostenden Stähle einer Widerstandsklasse III trotz vorhandener Anlauffarben (erkennbar an dem Verhalten im schadgasbelasteten Hüttenwerk und unmittelbar an der Meeresküste) eine hohe Beständigkeit unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen auf.

Aus den vorgelegten Ergebnissen von mehrjährigen Naturversuchen und insbesondere den Untersuchungen an älteren Bauwerken kann somit generell gefolgert werden, dass sich die Verminderung des Korrosionsschutzes von nichtrostendem Stahl durch Anlauffarben unter den Bedingungen einer normalen Stadtatmosphäre beim Stahl einer Werkstoff-Nr. 1.4571 nicht nachteilig im Sinne eines verstärkten Metallabtrages auswirkt. Selbst in einer schadstoffangereicherten Industriematmosphäre und in Meeresklima wird die Tragfähigkeit nicht zwangsläufig wegen korrosionsbedingter Einflüsse abgemindert.

Nicht nachbehandelte, mit Anlauffarben behaftete Schweißnähte des nichtrostenden Stahls einer Werkstoff-Nr. 1.4571 weisen unter den im Hinterlüftungsbereich einer Außenwandbekleidung im städtischen Bereich vorherrschenden Bedingungen auf jeden Fall eine ausreichende Korrosionsbeständigkeit auf.

## 7 Literatur

- [1] **Köse, C.:** Einfluss von Anlauffarben und Spalten auf das Korrosionsverhalten von Anschweißankern aus nichtrostendem Stahl bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen aus Naturwerkstein. Diplomarbeit Universität Stuttgart, 2009
- [2] **Nürnberger, U.:** Korrosionsuntersuchungen an Anschweißankern unter atmosphärischen Korrosionsverhältnissen. Bericht im Auftrag des Deutschen Naturwerksteinverbandes, Würzburg, 2009
- [3] **Zulassung Z- 30.3-6** Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen. DIBt, Berlin, 2009
- [4] **DIN 18516-1** Außenwandbekleidungen, hinterlüftet, Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze, 1999

- [5] **Nürnberg, U.:** Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Wiesbaden: Bauverlag 1995
- [6] **Nürnberg, U., Köse, C.:** Korrosionsverhalten von Anschweißankern aus nichtrostendem Stahl bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen aus Naturwerkstein, Bautechnik, Ausgabe 07/2010
- [7] **Nürnberg, U.:** Verwendung nichtrostender Stähle in der Befestigungstechnik - Stellungnahme zum korrosionstechnischen Regelwerk. DAfStb Forschungskolloqium, Universität Stuttgart, März 2006, S. 69-84
- [8] **DIN EN ISO 12944-2** Beschichtungssysteme - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme (1998)
- [9] **Morach, R.:** Technische Oberflächen. GfKORR-Seminar– Nichtrostende Stähle können rosten? Auf die Randbedingungen kommt es an GfKORR (Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V.) Frankfurt am Main, 2004, S. 61-70
- [10] **Saggau, R., Pries, H., Wohlfahrt, H., Kuscher, G.:** Schweißbedingte Anlauffarben – müssen grundsätzlich blanke Nähte gefordert werden? Schweißen und Schneiden 2001 Essen 11.-13. 9. S. 138 -142
- [11] **Pajonk G.:** Anlaufschichten – ein altbekanntes Phänomen neu betrachtet. In: Nichtrostender Stahl – Reinigen, beizen, passivieren, Korrosionsschutz optimieren 3-Länder-Korrosionstagung, Basel / Schweiz, April 2009, S. 86-102
- [12] **König, G., Heunisch, M.:** Untersuchung der Korrosion im Bereich von Anlauffarben und Spalten von geschweißten Haltekonstruktionen aus Edelstahl für Natursteinfassaden – BfG-Hochhaus, Frankfurt am Main, März 1993
- [13] **Bindschedler, D., Büchler, M.:** Beizen unter Baustellenbedingungen. Wie: [11], S. 80-85.

# EINE ALTERNATIVE METHODE DER DMS-APPLIKATION FÜR DIE KONTINUIERLICHE DEHNUNGSMESSUNG ENTLANG EINES BEWEHRUNGSSTABES AN ALTERNATIVE METHOD OF STRAIN GAUGE APPLICATION FOR MEASURING STRAINS CONTINUOUSLY ALONG A REINFORCING BAR

von/by: Christoph Mahrenholtz

## Zusammenfassung

Dehnmessstreifen (DMS) werden bei Versuchen mit Stahlbetonbauteilen häufig verwendet, um die Dehnungen der Bewehrungsstäbe zu messen. Wenn es erforderlich ist zur Dehnungsmessung entlang eines Bewehrungsstabes mehrere DMS in Reihe zu applizieren, kann dies nicht nach der sonst üblichen Applikationsmethode erfolgen. Deshalb wurde für diesen Fall eine alternative Methode entwickelt, deren Tauglichkeit anhand eines Verifikationsversuches gezeigt wurde. Die alternative Applikationsmethode und der Verifikationsversuch werden in diesem Artikel beschrieben.

## Einleitung

Die Applikation von DMS auf einem Bewehrungsstab für eine punktuelle Messung der Dehnung (Abbildung 1a) ist eine übliche Anwendung und wird detailliert in diversen Dokumenten beschrieben, beispielsweise in Herstelleranleitungen und Handbüchern.

Im Gegensatz hierzu ist die Anwendung von mehreren DMS für die kontinuierliche Messung der Dehnungen entlang eines Bewehrungsstabes (Abbildung 1b) eher unüblich.

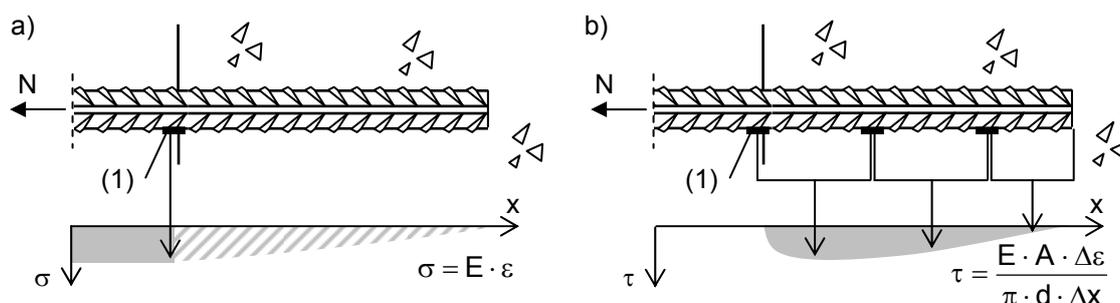
## Abstract

Strain gauges are frequently used at tests on reinforced concrete members for measuring the strains of the reinforcing bars. The common installation method cannot be applied if a strain measurement continuously along a reinforcing bar requires the installation of several strain gauges in series. Therefore, an alternative method was developed for this case and its fitness was shown by means of a verification test. The alternative installation method and the verification test is presented in this article.

## Introduction

The installation of strain gauges for measuring the strain at a selected point of the reinforcing bar (Figure 1a) is common practice and described in detail in various documents such as manufacturer's installation guidelines and manuals.

In the contrary, the application of multiple strain gauges for measuring the strain continuously along the reinforcing bar (Figure 1b) is rather uncommon.



**Abbildung 1:** a) punktuelle Dehnungsmessung; b) kontinuierliche Dehnungsmessung; (1) DMS  
**Figure 1:** a) selective strain measurement; b) continuous strain measurement; (1) strain gauge

Wie später erläutert wird, ist dabei der geringe Abstand der DMS problematisch. Es gibt erfindungsreiche aber unpraktikable Lösungen für dieses Problem, jedoch wurde nach Kenntnisstands des Autors bisher noch keine anwenderfreundliche Lösung veröffentlicht.

Um die Applikation der DMS für die Anforderungen einer kontinuierlichen Dehnungsmessung zu optimieren, wurde ein Bewehrungsstab mit einer Reihe DMS präpariert, die nach einer alternativen Methode appliziert wurden. Anschließend wurde der präparierte Bewehrungsstab nachträglich in Beton eingemörtelt und unter Zuglast getestet.

#### Übliche DMS-Applikationsmethode: Nur zur punktuellen Messung geeignet

Typischerweise werden die Rippen über eine Länge von 50mm und mehr abgeschliffen, um die Verarbeitbarkeit und damit die Qualität der DMS-Applikation zu erhöhen. Nach dem Verkleben der DMS wird der Abschnitt mit einem Abdeckband umhüllt.

Der Großteil der Anwendung von DMS auf Bewehrungsstäben dient der Dehnungsbestimmung an ausgewählten Punkten. Wird beispielsweise die Lasteinleitung in einem Stahlbetonanschluss untersucht, wird typischerweise die Normalspannung lediglich am Verankerungsbeginn bestimmt (Abbildung 2a). Im Verhältnis zu der Verankerungslänge ist die durch die Applikation der DMS gestörte Länge klein.

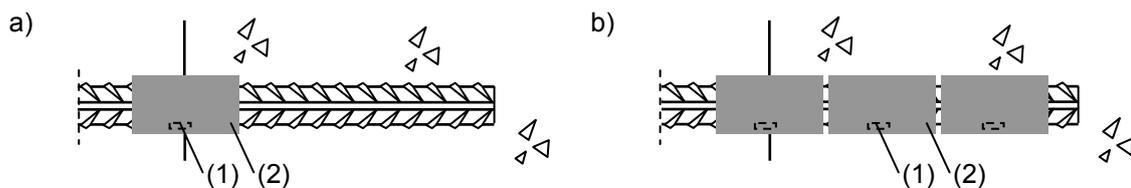
As explained later, the close distance of the strain gauges turns out to be problematic. Ingenious but impracticable solutions for this problem exist, however, to the author's knowledge, no description of a user-friendly solution has been published so far.

In order to optimize the installation of strain gauges for the needs of a continuous strain measuring along the reinforcing bar, a reinforcing bar was furnished with a series of strain gauges which were installed following an alternative method. Next, the reinforcing bar was post-installed in concrete and tested in tension.

#### Standard Strain Gauge Installation Method: Only Fit for Selective Strain Measurement

Typically, the ribs are removed over a stretch of 50mm and more to increase the workability and thus the quality of the strain gauge installation. After gluing the strain gauge, the stretch is covered by a mastic tape.

The vast majority of strain gauge applications on reinforcement bars serves the determination of the strain at a selected point. If for example the load transfer in a reinforced concrete connection is studied, the normal stress is typically determined only at the beginning of an anchorage (Figure 2a). The length affected by the strain gauge installation is relatively small compared to the total length.



**Abbildung 2:** Übliche DMS-Applikationsmethode : a) Geeignet zur punktuellen Dehnungsmessung; b) Ungeeignet zur kontinuierlichen Dehnungsmessung; (1) DMS, (2) Abdeckband

**Figure 2:** Standard strain gauge installation method: a) Fit for selective strain measurement; b) Unfit for continuous strain measurement; (1) Strain gauge, (2) mastic tape

Ist jedoch die Dehnung kontinuierlich entlang des Bewehrungsstabes zu ermitteln, beispielsweise um die Verbundspannungsverteilung einer Bewehrungsverankerung zu untersuchen, kann die zuvor beschriebene Applikationsmethode nicht angewendet werden. Der Bewehrungsstab wäre dann fast vollständig mit Abdeckband bedeckt (Abbildung 2b).

In der Fachliteratur werden zwei Lösungen für dieses Problem vorgeschlagen.

- Der Bewehrungsstab wird längs genutet und halbiert. Nach der Applikation der DMS auf die Schnittfläche werden die beiden Hälften wieder zusammengefügt. Die Kabel werden in der Nut geführt. Diese Methode wird in [1] beschrieben.
- Der Bewehrungsstab wird längs genutet. Eine faseroptische Dehnungsmessfaser wird in der Nut installiert. Auch das Lichtleitfaserkabel wird in der Nut geführt. Diese Methode wird in [2] beschrieben.

Beide Lösungen sind arbeitsintensiv, teuer und deshalb nur für eine kleine Versuchszahl geeignet.

Es war daher das Ziel, eine alternative Applikationsmethode für gewöhnliche DMS zu entwickeln, die brauchbar, schnell, kostengünstig, zuverlässig und praktikabel ist.

#### **Alternative DMS-Applikationsmethode : Auch zur kontinuierlichen Messung geeignet**

Um die Störung der Verbundspannungsübertragung zwischen Beton und Bewehrungsstab zu minimieren, muss die für die DMS-Applikation bearbeitete Fläche weitestgehend reduziert werden.

Daher sollte die abgeschliffene and abgedeckte Fläche nicht wesentlich größer sein als die Trägerfolie. Jedoch muss darauf geachtet werden, dass die feingeschliffene

However, when the strain has to be determined continuously along the reinforcing bar, e.g. to study the bond stress distribution of a reinforcing bar anchorage, the above described installation method cannot be followed. The reinforcing bar would be almost totally covered by the mastic tape (Figure 2b).

Two solutions of this problem are proposed in the literature:

- The reinforcing bar is longitudinally grooved and cut into two pieces. The two halves are joined together after installation of the strain gauges on the cut surface. The cables are routed in the groove. This method is described in [1].
- The reinforcing bar is longitudinally grooved. A fiber optical strain gauge is installed in the groove. Also, the fiber optical cable is routed in the groove. This method is described in [2].

Both existing solutions are elaborate and expensive, and rather impracticable if the number of tests is not limited to just a few.

Therefore, the aim was to develop an alternative installation method which is feasible, quick, cheap, reliable, and practicable, using standard electrical strain gauges.

#### **Alternative Strain Gauge Installation Method: Also Fit for Continuous Strain Measurement**

To minimize the disruption of the bond transfer between concrete and reinforcing bar, the area which is treated for the application of the strain gauges has to be reduced as much as possible.

Therefore, the area grinded and covered by the mastic tape should not be much larger than the carrier foil. However, if the sandpapered area is too small, the carrier foil may

Fläche nicht zu klein ist, da sich sonst die Trägerfolie nach dem Verkleben ablösen kann. Außerdem darf die Abdeckung nicht zu knapp bemessen sein, da sonst die DMS während der Betonage oder bei der nachträglichen Installation beschädigt werden kann und zudem Korrosion droht.

Die im Folgenden beschriebene alternative Applikationsmethode wurde in einem Verifikationsversuch getestet, der genauso ausgeführt wurde, wie ein Referenzversuch mit einem Bewehrungsstab, der nach der zuvor beschriebenen Schnitt-und-Zusammenfüge-Methode präpariert wurde [4].

Die Größe der für den Versuch verwendeten DMS betrug 5mm x 2mm, Die Trägerfolien waren geringfügig größer, etwa 7mm x 3mm.

Eine Fläche von etwa 10mm x 5mm wurde abgeschliffen. Nach der Applikation der DMS wurde nur ein kleines Stück des Abdeckbandes, etwa 7mm x 7mm, aufgebracht.

Die DMS wurden an mehreren Stellen appliziert, deren Abstände denen des Referenzversuchs entsprachen. Die DMS wurden an jeder Stelle paarweise installiert, um durch Mittelung der Messwerte Biegespannungen herausrechnen zu können. Eine Stelle befand sich außerhalb der Verankerungslänge, um die Messung durch die Bestimmung des E-Modul an der freien Dehnlänge zu kalibrieren (Abbildung 3).

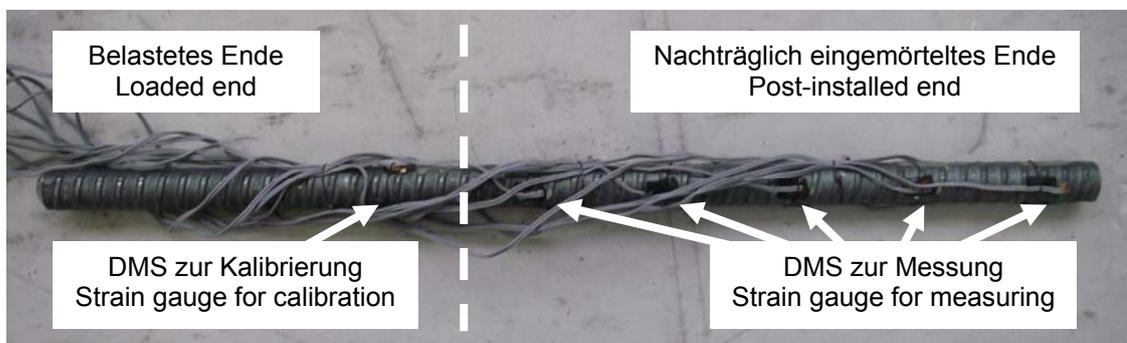
debond after gluing. Also, if the mastic cover is reduced too much, the strain gauge might get damaged during casting or post-installation and runs the risk to corrode before testing.

The alternative application method described in the following was tried by means of a verification test which was carried out identically to a reference test on a reinforcing bar which was prepared according to above described cut-and-join method [4].

The size of the strain gauges used for the test was 5mm x 2mm. The carrier foils were slightly larger, about 7mm x 3mm.

An area of about 10mm x 5mm was grinded and sandpapered. After installation of the strain gauge, only a small piece of mastic tape, about 7mm x 7mm, was placed.

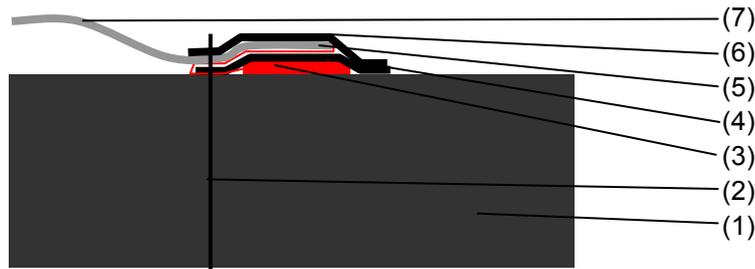
The strain gauges were applied at several locations which intervals were identical to those of the reference test. Sets of two gauges were installed in order to eliminate the effects of bending stresses by averaging both measures when evaluating the acquired data. One location was outside of the anchorage to calibrate the strain gauges by determining the E-modulus of the steel at the free strain length (Figure 3).



**Abbildung 3:** Instrumentierter Bewehrungsstab bereit zur nachträglichen Einmörtelung  
**Figure 3:** Instrumented reinforcement bar ready for post-installation

Üblicherweise werden die Kabel an dem Bewehrungsstab mit Kabelbindern aus Plastik befestigt. Um die Störung der Verbundspannungsübertragung auf ein Minimum zu reduzieren, wurden jedoch dünne Stahldrähte für die Zugentlastung verwendet. Abbildung 4 zeigt das Detail der Anschlussdrahtführung, Abdeckbandplatzierung und Zugentlastung.

Commonly, the cables are fixated to the reinforcing bar by plastic cable ties. However, thin steel wire were used to reduce the interference of the bond stress transfer to a minimum. Figure 4 shows the detail of the lead cable routing, mastic tape placing and fixation by wire.



**Abbildung 4:** Detail DMS-Applikation nach alternativer Methode: (1) Bewehrungsstab, (2) Stahldraht, (3) DMS auf Trägerfolie, (4) Abdeckband (1. Lage), (5) Anschlussdraht, (6) Abdeckband (2. Lage), (7) Kabel

**Figure 4:** Detail strain gauge application according to alternative method: (1) reinforcing bar, (2) steel wire, (3) strain gauge on carrier foil, (4) mastic tape (1<sup>st</sup> layer), (5) lead wire, (6) mastic tape (2<sup>nd</sup> layer), (7) cable

Das Bohren und Reinigen des Bohrlochs erfolgte wie beim Referenzversuch, auch wurde das gleiche Mörtelprodukt verwendet. Nach dem Einbringen des Mörtels wurde der präparierte Bewehrungsstab eingesetzt.

The drilling and cleaning of the borehole was carried out identically to the reference test as was the same mortar product used. After the injection of the mortar, the prepared reinforcing bar was inserted.

Ebenso wie bei dem Referenzversuch, wurde der monotone Zugversuch mit einer nahen Abstützung durchgeführt.

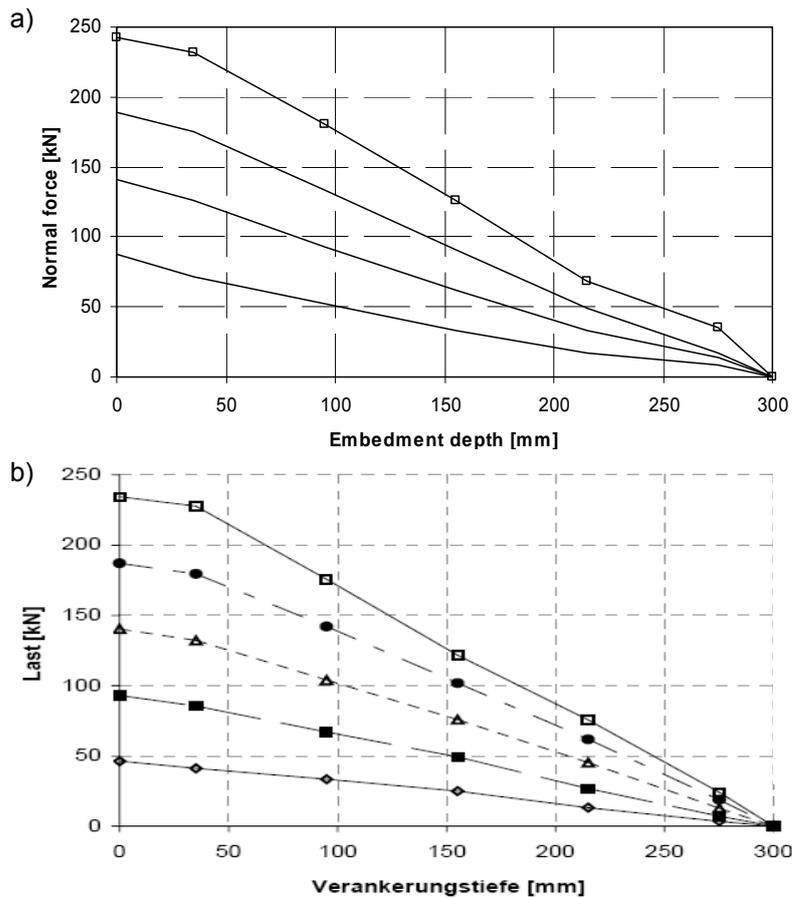
Like for the reference test, the monotonic tension test was carried out with a confined setup.

### Ergebnisse und Bewertung

### Results and Evaluation of Test

Durch den Vergleich der gemessenen Dehnungen mit den Dehnungen, die für den Referenzversuch protokolliert wurden [4], kann die Eignung der vorgeschlagenen DMS-Installationsmethode nachgewiesen werden. Abbildung 5 stellt die Normalkraft des Bewehrungsstabes für mehrere Laststufen dar. Die dargestellten Kurvenverläufe wurden aus den Dehnungsmessungen des Verifikationsversuchs (Abbildung 5a) berechnet und denen des Referenzversuchs (Abbildung 5b) nach [4]) gegenüber gestellt.

By comparing the measured strains with the strains reported for the reference test, the applicability of the suggested strain gauge installation method can be verified. Figure 5 depicts the normal force of the reinforcing bar for several load levels. The curves have been derived from the strain measurements of the verification test (Figure 5a) and opposed to those of the reference test (Figure 5b) after [4]).



**Abbildung 5:** Normalkraftverteilung entlang der Verankerungslänge für mehrere Laststufen ermittelt in a) Verifikationsversuch und b) Referenzversuch (nach [4])

**Figure 5:** Normal force distribution over embedment depth for various load levels derived from a) verification test and b) reference test (after [4])

Die nahezu identischen Kurvenverläufe von Versuch und Referenzversuch verifizieren die Eignung der alternativen DMS-Applikationsmethode.

Die Verifizierung der Methode ist auch auf einbetonierte Bewehrungsstäbe übertragbar, da die Lasteinleitung von nachträglich eingemörtelten und einbetonierten Bewehrungsstäben ähnlich ist.

Weitere Details zu diesem Thema and dem durchgeführten Versuch können [3] entnommen werden.

### Abschließende Bemerkung

Die erste Abdeckbandlage kann durch eine Epoxy-Beschichtung ersetzt werden. Die

The almost identical shapes of the curves of test and reference test verify the applicability of the alternative strain gauge installation method.

The verification of the method is valid also for cast-in reinforcing bars since the load transfer mechanism of post-installed and cast-in reinforcing bars is similar.

Further details on this topic and the test carried out can be found in [3].

### Concluding Remarks

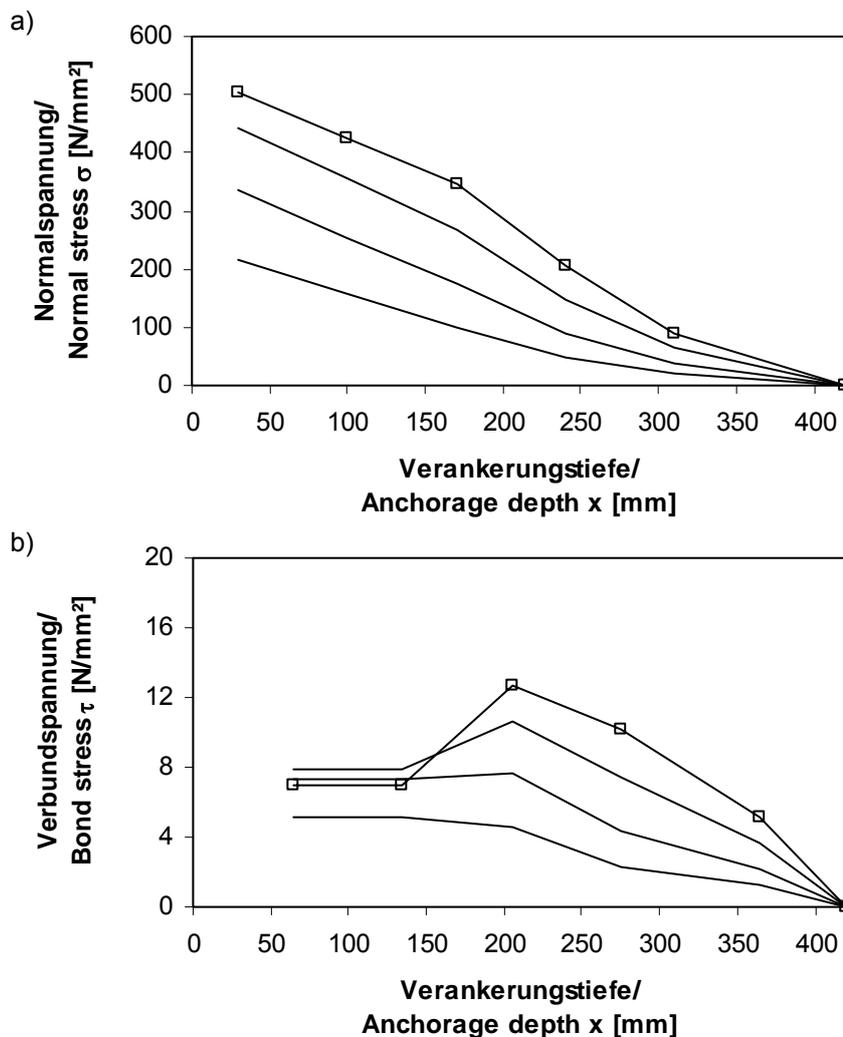
The first mastic tape layer can be substituted by an epoxy coating. The coating engulfs

Epoxy-Beschichtung umschließt das unebene Profil aus Kabel, Anschlussdraht und DMS-Trägerfolie besser als ein Abdeckband und stellt somit einen guten Korrosionsschutz sicher. Dies ist besonders wichtig, wenn der Bewehrungsstab einbetoniert und nicht nachträglich eingemörtelt wird.

Die alternative Methode wurde inzwischen umfangreich bei der Bewehrungsstahlverankerung von großmaßstäblichen Stützen-Fundament-Anschlüssen angewendet, die im Rahmen einer Kollaboration mit der University of Canterbury in Neuseeland getestet wurden.

better the uneven profile of cable, lead wire and strain gauge carrier foil and thus ensures a good protection against corrosion more reliable. This is in particular important if the reinforcing bar is cast-in but not post-installed.

The alternative method was extensively used to instrument reinforcing anchorages of large-scale column-to-foundation connections which were carried out in the context of a collaborative project with the University of Canterbury in New Zealand.



**Abbildung 6:** Beispiel Ergebnis Dehnungsmessung kontinuierlich entlang einer Verankerung ( $\ell = 420\text{mm}$ ,  $d = 25\text{mm}$ ): a) Normalspannungsverteilung und b) Verbundspannungsverteilung  
**Figure 6:** Example result of strain measurement continuously along an anchorage ( $\ell = 420\text{mm}$ ,  $d = 25\text{mm}$ ): a) normal stress distribution and b) bond stress distribution

Ein Beispiel für die aus der gemessenen Dehnung abgeleiteten Normal- und Verbundspannungsverteilung entlang der Verankerung wird in Abbildung 6 gezeigt. Die alternative Methode hat sich für einbetonierte und eingemörtelte Anschlüsse bewährt.

### Zusammenfassung

Eine einfache und effiziente Methode der DMS-Applikation wurde als eine alternative Lösung entwickelt, falls die Dehnung kontinuierlich entlang eines Bewehrungsstabes zu messen ist.

Der Versuch ergab einwandfreie Ergebnisse, weshalb die Eignung der alternativen Methode nachgewiesen werden konnte.

Deshalb wird die beschriebene Methode für Versuche empfohlen, bei denen die Dehnung kontinuierlich entlang eines Bewehrungsstabes zu messen ist und eine übliche DMS-Applikation nicht möglich ist.

An example for normal and bond stress distribution along the anchorage derived from the measured strain is given in Figure 6. The alternative method worked fine for both, cast-in and post-installed anchorages.

### Summary

A simple and effective method of strain gauge installation was developed as an alternative solution if the strain is to be measured continuously along a reinforcing bar.

The test yielded sound data and the suitability of the alternative method was verified.

Therefore, the described method is recommended for tests at which the strain has to be determined continuously and a standard strain gauge installation is not feasible.

### Literatur / References

- [1] **Chung, L.; Shah, S.P. (1989):** Effect of Loading Rate on Anchorage Bond and Beam-Column Joints. ACI Structural Journal, March-April 1989, Vol. 86, No. 2, 132-142
- [2] **Kenek, A.; Martin, P. (2001):** Faseroptische Dehnungsmessungen an einbetonierten Bewehrungsstäben. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Switzerland
- [3] **Mahrenholtz, C. (2011):** Strain Gauge Application for Measuring Strains Continuously along Reinforcing Bar, Test Report. Institut für Werkstoffe im Bauwesen University of Stuttgart, Germany
- [4] **Spieth, H. (2003):** Tragverhalten und Bemessung von eingemörtelten Bewehrungsstäben. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, University of Stuttgart, Germany

## UNTERSUCHUNG DES TRAGVERHALTENS VON ROTATIONSSTEIFEN ANKERGRUPPEN MITHILFE MEHRACHSGEREGETER SERVOHYDRAULIK INVESTIGATION ON THE BEHAVIOUR OF ROTATION-RESTRAINED ANCHOR GROUPS BY MEANS OF MULTI-AXES SERVO-HYDRAULIC CONTROL SYSTEM

von/by: Philipp Mahrenholtz

### Zusammenfassung

Seismische Versuche mit Befestigungsmitteln erfordern in der Regel einen großen Versuchsaufwand. Entweder werden die Anker zyklisch belastet, oder der Riss, in dem die Anker installiert sind, wird zyklisch geöffnet und geschlossen. Dies erfordert einen anspruchsvollen Versuchsaufbau, der oftmals mehrere Hydraulikzylinder umfasst, die mit einem leistungsfähigen Steuerungssystem betrieben werden (Abbildung 1).

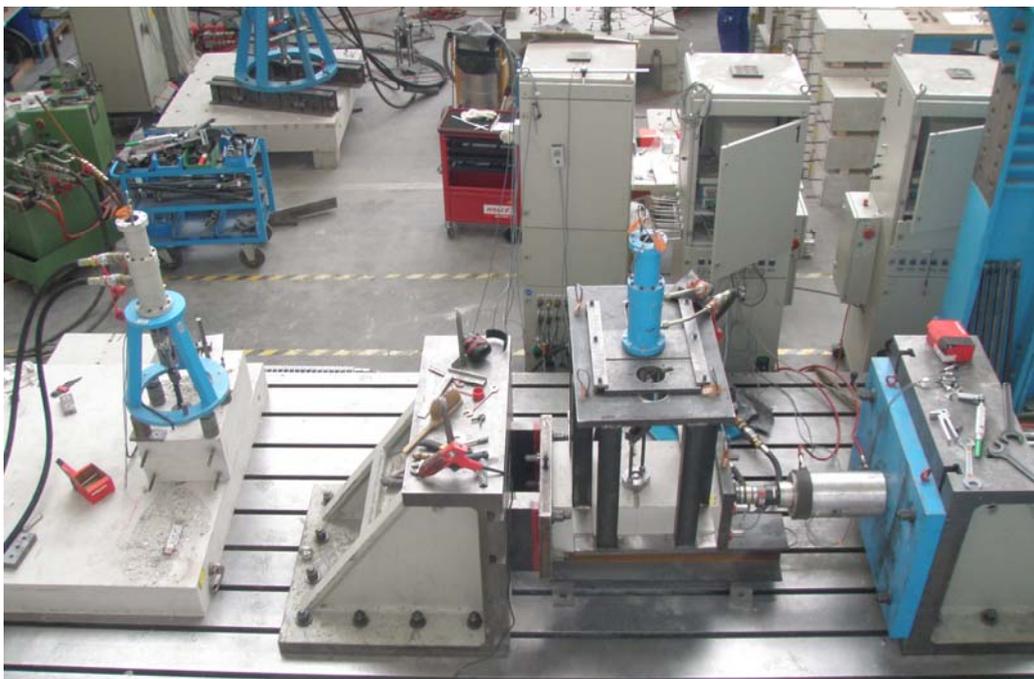
Zudem liegen bei diesen Versuchen die Anforderungen an die Genauigkeit der Steuerung bei deutlich weniger als 1kN und 10 $\mu$ m. Die Genauigkeit ist besonders wichtig für Versuche, bei denen mehrere Parameter, beispielsweise Lasten und Rissweiten, gleichzeitig Variablen eines definierten Versuchsablaufes sind.

### Abstract

Seismic testing on anchors generally involves a large scale of testing resources. Either the anchors are loaded cyclically or the width of the crack, the anchors are installed in, is cycled. This requires a sophisticated test setup often including several hydraulic actuators which are operated by a powerful servo control system (Figure 1).

Further, these tests require a control accuracy within the range less than 1kN and 10 $\mu$ m. The accuracy is in particular important in case of tests for which several parameters, such as anchor load and crack width, are simultaneously variables of a specified test regime.

This article presents tests at which the complexity of the test has been pushed to the



**Abbildung 1:** Versuchsaufbau für seismische Forschung an Ankern  
**Figure 1:** Experimental test setup for seismic research on anchors

Dieser Aufsatz stellt Versuche vor, bei denen der Versuchsaufwand an die Grenzen von dem, was technisch möglich ist getrieben wurde, um das Lastverschiebungsverhalten von drehsteif angeschlossenen Ankergruppen unter definierten Randbedingungen zu untersuchen. Soweit dem Autor bekannt, sind diese Versuche die ersten ihrer Art.

## Einleitung

In der Befestigungstechnik muss davon ausgegangen werden, dass die Anker in Rissen liegen. Wegen der zyklischen Erregung des Stahlbetontragwerks öffnen und schließen sich die Risse während eines Erdbebens. Bei jeder Rissöffnung rutscht der Anker und wird sukzessive aus dem Verankerungsgrund herausgezogen. Dadurch verringern sich die Verankerungstiefe und somit auch der Widerstand gegen Betonausbruch. Zudem können die Verschiebungen Werte erreichen, die für den Planer inakzeptabel sind.

Bei Ankergruppen ist es allerdings eine plausible Annahme, dass sich nicht alle Anker in einem Riss befinden. Somit können die Anker, die sich im ungerissenen Beton befinden, die schwächeren Anker im Riss entlasten. Dieser Gruppeneffekt wirkt sich auf die Verschiebung der Ankergruppe günstig aus.

Die Lastverteilung zwischen den Ankern hängt im Wesentlichen von der Konstruktion der Ankerplatte ab, die entweder gelenkig oder drehsteif sein kann (Abbildung 2). Eine gelenkig angeschlossene Ankerplatte lässt eine Rotation der Ankerplatte zu, was bei einer Zweifachbefestigung zu gleich großen Ankerlasten führt. Demgegenüber erfahren Anker einer drehsteif angeschlossenen Ankerplatte die gleiche Verschiebung, jedoch sind die Ankerlasten unterschiedlich groß. Die resultierende Exzentrizität erzeugt ein Biegemoment.

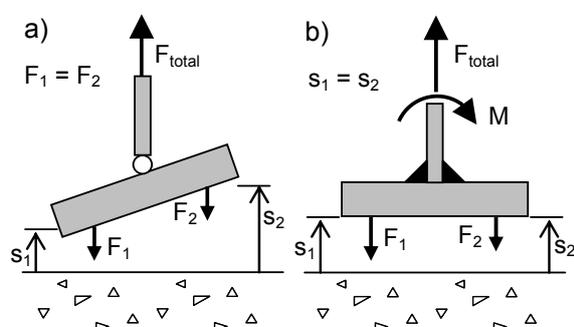
technically feasible limit to investigate the load-displacement behaviour of rotation-restrained anchor groups under defined conditions. These group tests were, to the author's knowledge, the first of its kind.

## Introduction

For anchor design, the anchors have to be assumed to be located in cracks. In case of an earthquake, the cracks open and close due to the cyclic response of the reinforced concrete structure to the earthquake. Every time when the crack opens, the anchor slips and is progressively pulled out of the base material. Thus the embedment depth and the concrete capacity are reduced. Further, the anchor displacement can reach magnitudes unacceptable for the designer.

In case of an anchor group, however, it may reasonably be assumed that not all anchors are located in cracks. Thus, the anchors located in uncracked concrete can support the weaker anchors located in a crack. This group effect is beneficial to the group displacement.

The distribution of the load among the anchors depends primarily on the design of the base plate connection. This can either be rotation-unrestrained or rotation-restrained (Figure 2). A base plate connected by a hinge allows a free rotation of the base plate. In case of a 2-anchor group, the resulting



**Abbildung 2:** Anschluss Ankerplatte: a) gelenkig; b) drehsteif

**Figure 2:** Base plate connection: a) Rotation-unrestrained; b) Rotation-restrained

Dieser Aufsatz konzentriert sich im Folgenden auf die technisch anspruchsvolleren Versuche mit drehsteifen Ankergruppen.

Tastversuche haben ergeben, dass eine Belastung von Ankergruppen mit nur einem Zylinder bei der drehsteifen Ausführung unmöglich ist: Eine direkt am Zylinder angeschlossene Ankerplatte weist einfach eine ungenügende Steifigkeit auf und kann zudem wegen der Lastexzentrizitäten den Zylinder beschädigen.

Deshalb wurden zwei Hydraulikzylinder mit einer so genannten Mehrachsregelung eingesetzt, um eine drehsteife Ankerplatte zu simulieren. Dabei werden die Verschiebungen der Anker fortlaufend gemessen und miteinander verglichen. Unter gleichzeitiger Berücksichtigung einer vorgegebenen Gesamtlast ermittelt der Rechner der Servosteuerung in Echtzeit die notwendigen Lastkorrekturen und gibt diese als Feedback an die Hydraulikzylinder weiter (Abbildung 3).

### Ankertypen und Betonprüfkörper

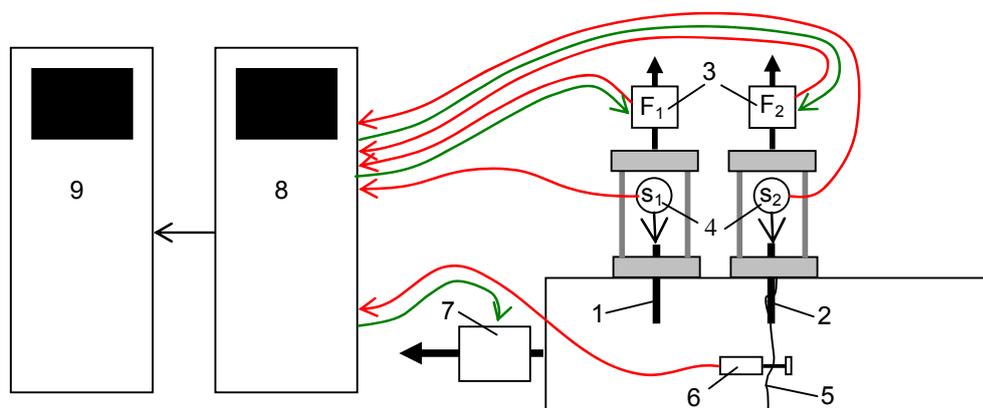
Um den Einfluss unterschiedlicher Lastverschiebungsverhalten und Versagensmodi diverser Befestigungsmittel auf das Gruppenverhalten zu untersuchen, wurden

tension forces are the same, but not the anchor displacements. Whereas a stiff connection of a rotation-restrained anchor group requires all anchors to follow the same displacement but the tension forces differ. The resulting eccentricity creates a bending moment.

This article focuses in the following on the technically more challenging tests of rotation-restrained anchor groups.

Exploratory tests showed that anchor group loading by means of a single actuator is not feasible for rotation-restrained configurations: A base plate directly connected to the actuator simply does not provide sufficient stiffness and, moreover, caused potential damages of the actuator due to load eccentricities.

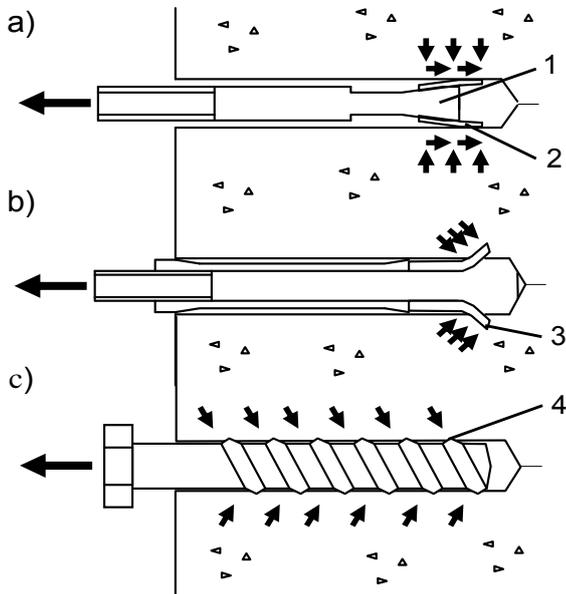
Therefore, two actuators with a so-called multi-axes control system were used to simulate a rotation-restrained base plate. The displacements of the anchors are continuously measured and compared. With simultaneous consideration of the specified total load, the servo control computer determines the required load corrections in real-time and transmits these as a feedback to the actuators (Figure 3).



**Abbildung 3:** Schema Mehrachsregelung: (1) Anker 1, (2) Anker 2, (3) Kraftmessung Anker, (4) Verschiebungsmessung Anker, (5) Riss, (6) Rissweitenmessung (beidseitig), (7) Kraftmessung zur Rissweitensteuerung, (8) Servosteuerung, (9) Messdatenerfassung

**Figure 3:** Schematic of multi-axes control system: 1) Anchor 1, (2) Anchor 2, (3) Load measurement anchors, (4) Displacement measurement anchors, (5) Crack, (6) Crack width measurement (both sides), (7) Load measurement for crack width control, (8) Servo control system, (9) Data acquisition system

verschiedene Ankertypen getestet: Ein drehmomentkontrollierter Spreizanker, Bolzentyp, M12, ein selbstschneidender Hinterschnittanker, M10 und ein Schraubanker, Ø16 (Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Getestete Ankertypen: a) Spreizanker; b) Hinterschnittanker; c) Schraubanker; (1) Konus; (2) Clip; (3) Hinterschnittelement; (4) Gewinde

**Figure 4:** Tested anchors: a) Expansion anchor; b) Undercut anchor; c) Screw anchor; (1) Cone; (2) Clip; (3) Undercut element; (4) Thread

Die Anker wurden in Betonprüfkörpern gesetzt, die der Ankergruppe und dem Versuchsaufbau genügend Platz boten (Abbildung 5). Die Prüfkörper waren 1200mm lang und wurden aus normalfestem Beton ( $f_c = 20\text{N/mm}^2$ ) hergestellt. Vier hochfeste Spannstähle wurden längs im Prüfkörper einbetoniert, die später an die Widerlager angeschlossen wurden. Rissbleche in der Prüfkörpermitte stellten sicher, dass bei Aufbringung einer entsprechenden Last ein Riss in Prüfkörpermitte erzeugt wird.

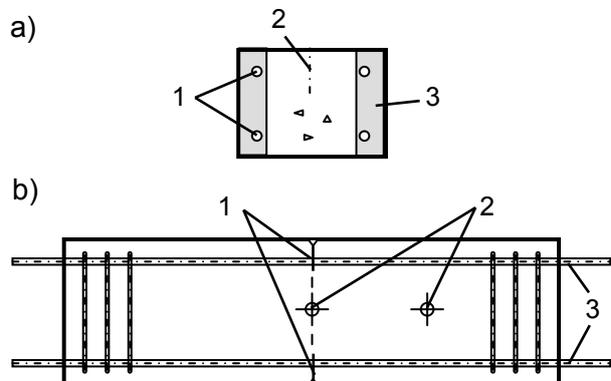
### Versuchsaufbau und -durchführung

Der Betonprüfkörper wurde zur Versuchsdurchführung horizontal zwischen zwei Widerlagern eingebaut. Auf einer Seite erzeugte ein 630kN-Hydraulikzylinder die zum Öffnen und Schließen des Risses erforderliche

### Anchor types and Concrete Test Member

In order to investigate the influence of various load-displacement behaviours and failure modes of the individual anchor on the anchor group behaviour, several types of mechanical anchors were tested: A torque-controlled expansion anchor, bolt-type, size M12, a self-cutting undercut anchor, size M10, and a screw anchor, size Ø16 (Figure 4).

The anchors were installed in concrete test members large enough to accommodate the anchor group and the test setup (Figure 5). The members were 1200mm long and made of normal strength concrete ( $f_c = 20\text{N/mm}^2$ ). Four high tension tie rods ran longitudinally through the member to be connected to the abutments later. The application of an adequate load formed one crack which was initialized in the centre of the member by means of a sheet metal crack inducer.



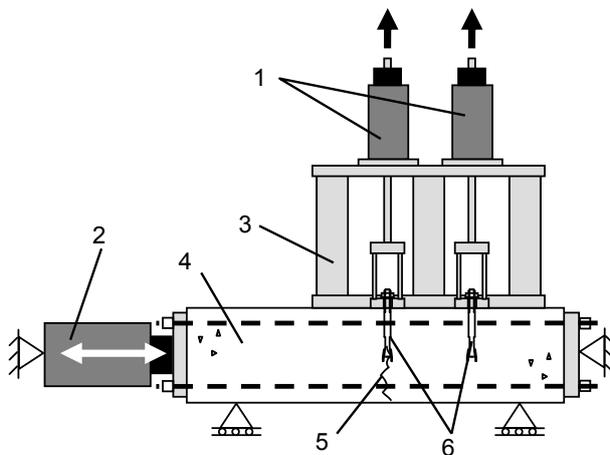
**Abbildung 5:** Betonprüfkörper: a) Querschnitt; b) Horizontalschnitt; (1) Rissbleche; (2) Anker-teststelle; (3) Spannstähle

**Figure 5:** Concrete test member: a) Cross section; b) Horizontal section: (1) Crack inducer; (2) Anchor test location; (3) Tie rods

### Test Setup and Procedure

For testing, the concrete test member was mounted horizontally in between two abutments. On one side a 630kN actuator generated the force necessary to open and close the cracks. The two 50kN actuators for the

Kraft. Die zwei 50kN-Hydraulikzylinder zur Belastung der Anker wurden auf einem Stahlbock befestigt und auf den Betonprüfkörper gesetzt (Abbildung 6). Ein Wegaufnehmerset wurde installiert, um die Verschiebungen der einzelnen Anker zu messen und ein weiteres Set, um die Rissweite zu messen und zu steuern. Die gemessenen Ankerlasten und -verschiebungen wurden als Eingangssignale von der Servosteuerung verarbeitet. Alle Messwerte wurden vom Datenerfassungssystem aufgezeichnet (Abbildung 3).

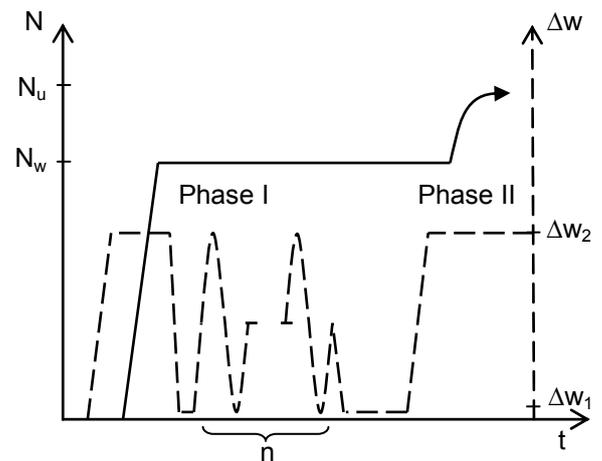


**Abbildung 6:** Seitenansicht des Versuchsaufbaus (Wegaufnehmer nicht dargestellt): (1) 50 kN-Hydraulikzylinder; (2) 630 kN-Hydraulikzylinder; (3) Stahlbock; (4) Betonprüfkörper; (5) Riss; (6) Anker

**Figure 6:** Side view of test setup (displacement transducers not shown): (1) 50 kN actuators; (2) 630 kN actuator; (3) Steel support; (4) Concrete test member; (5) Crack; (6) Anchors

Ein Anker wird im ungerissenen Beton installiert, der andere Anker im Riss, dessen Weite während des Versuchs veränderlich ist. 10 Risszyklen zwischen  $\Delta w_1 \approx 0.0\text{mm}$  und  $\Delta w_2 = 0.8\text{mm}$  wurden vorgegeben, wobei  $\Delta w_1$  als die Rissweite definiert wurde, die sich bei einer Druckbelastung einstellt, die 10% der Betondruckfestigkeit entspricht. Als Gruppenlasthöhe  $N_w$  während der Risszyklen wurde bei den meisten Versuchen zweimal 40% der mittleren Versagenslast eines Ankers ( $N_{u,\text{cracked}}$ ) gewählt, die mittels mono-

anchor load were fixed on a steel support and assembled on top of the concrete member (Figure 6). A set of displacement transducers were installed to measure the displacements of the individual anchors; and another set to measure and control the crack width. The actual anchor load and displacement data formed the input signals for the servo control. All data were recorded by a data acquisition system (Figure 3).



**Abbildung 7:** Belastungsablauf der Testphasen I und II mit  $N_w$  = Dauerlasthöhe während der Risszyklen;  $N_u$  = Höchstlast Resttragfähigkeit;  $\Delta w_1$  = Rissweite bei Riss-schließung;  $\Delta w_2$  = Rissweite bei Rissöffnung; Anzahl der Risszyklen  $n = 10$  und  $t$  = Zeit

**Figure 7:** Loading pattern of test phases I and II with  $N_w$  = permanent load during crack cycling;  $N_u$  = ultimate residual capacity;  $\Delta w_1$  = crack width at crack closure;  $\Delta w_2$  = crack width at crack opening; number of crack cycles  $n = 10$  and  $t$  = Time

One anchor is installed in the uncracked concrete and the other anchor in the crack which width is cycled during testing. 10 crack cycles between  $\Delta w_1 \approx 0.0\text{mm}$  and  $\Delta w_2 = 0.8\text{mm}$  were specified, with  $\Delta w_1$  defined as the crack width at a compression force equivalent to 10% of the concrete compression strength. The load level  $N_w$  during crack cycling was chosen for most of the tests as two times 40% of the mean ref-

tonen Auszugsversuch im konstanten Riss ermittelt wird. Der prozentuale Wert entspricht etwa der Last, für die die Befestigung in Realität bemessen werden würde. Die exakte Herleitung wird in [1] beschrieben.

Der Belastungsablauf besteht aus zwei Phasen. Phase I beginnt mit dem auseinanderziehen des Betonprüfkörpers bis der Riss auf  $\Delta w_2 = 0.8\text{mm}$  geöffnet ist. Anschließend wird die Ankergruppe bis zu der definierten Lasthöhe  $N_w$  belastet. Diese Lasthöhe wird während der 10 Risszyklen zwischen  $\Delta w_1 \approx 0.0\text{mm}$  und  $\Delta w_2 = 0.8\text{mm}$  konstant gehalten. In der anschließenden Phase II wird die Ankergruppe bis zum Versagen belastet, um die Resttragfähigkeit zu bestimmen (Abbildung 7).

## Ergebnisse

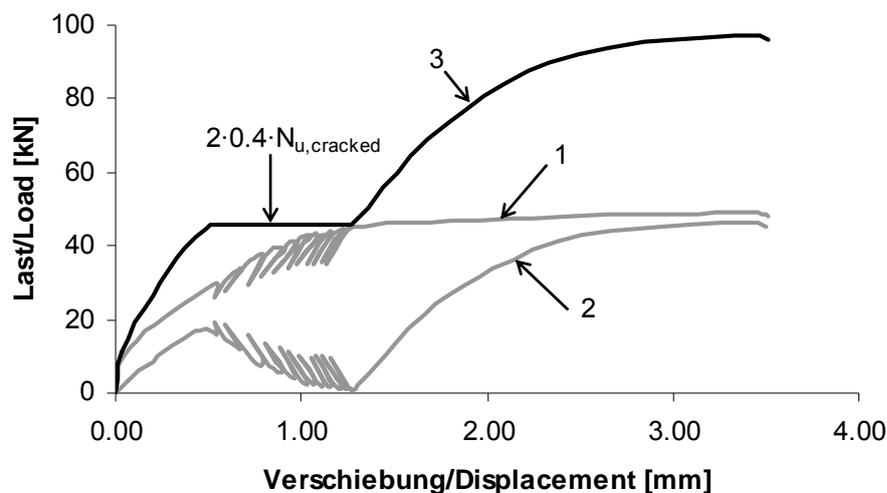
Die exemplarisch in Abbildung 8 dargestellten Lastverschiebungskurven spiegeln den Belastungsablauf wider. Die ursprüngliche Last zu Beginn von Phase I wird entsprechend den einzelnen Steifigkeiten der Anker verteilt. Demzufolge nimmt der im ungerissenen Beton gesetzte Anker (im Folgenden als Anker 1 bezeichnet) einen größeren Anteil der Last auf als der im Riss gesetzte Anker (im Folgenden als Anker 2 bezeichnet).

reference load capacity of a single anchor determined by monotonic pullout test in a static crack ( $N_{u,cracked}$ ). This percentage equals approximately the load the anchorage would be designed for in reality. Reference is made to [1] where the exact deduction of these boundary conditions is described.

The loading pattern shows the two phases of the test. Phase I begins with the expanding of the concrete member until the crack is opened by  $\Delta w_2 = 0.8\text{mm}$ . Then the anchor group is loaded up to the defined load level  $N_w$ . This level is kept constant for the course of 10 crack cycles between  $\Delta w_1 \approx 0.0\text{mm}$  and  $\Delta w_2 = 0.8\text{mm}$ . In the following Phase II, the anchor group is loaded to failure to determine the residual load capacity (Figure 7).

## Results

The measured load-displacement curves exemplary given in Figure 8 reflect the loading pattern. At the beginning of Phase I, the initial load is split up according to the individual stiffness of the anchors. Accordingly, the anchor located in the uncracked concrete (denoted Anchor 1 in the following) takes up a bigger portion of the load than the anchor located in the crack (denoted Anchor 2 in the following).



**Abbildung 8:** Beispiel für die Lastverschiebungskurven eines Gruppenversuches: 1) Anker 1; 2) Anker 2; 3) Ankergruppe mit Gruppenlast = Summe der Lasten Anker 1 und Anker 2

**Figure 8:** Example for the load-displacement curves of a group test: 1) Anchor 1; 2) Anchor 2; 3) Anchor group with group load = total of loads anchor 1 und anchor 2

Mit Beginn der Risszyklen verändern sich die Ankerlasten um jeweils den gleichen Wert aber in entgegengesetzter Richtung. Zur Bestimmung der Resttragfähigkeit in Phase II werden die Anker wegkontrolliert bis zum Versagen belastet.

Nachfolgend wird das Lastverschiebungsverhalten in Phase I näher erörtert: Sobald der Riss zugeedrückt wird, erlangt Anker 2 wieder an Steifigkeit und zieht Last an sich. Anker 1 wird um den gleichen Betrag entlastet. Wird der Riss wieder geöffnet, verliert Anker 2 seine Steifigkeit und gibt einen Teil seiner Last an Anker 1 ab. Dieser Vorgang wiederholt sich 10 Mal, in Folge dessen die Gruppenlast zu einem großen Teil zum steiferen Anker im ungerissenen Beton umgelagert wird. Die Lastverschiebungskurve von Anker 1 nähert sich der Gruppenlast an, während die Last von Anker 2 gegen Null abnimmt. Durch dieses Verhalten wird die Gesamtverschiebung der Gruppe im Vergleich zu einem Einzelanker im zyklischen Riss erheblich reduziert. Die Lastverschiebungskurve beider Anker ist achsensymmetrisch um die halbe Gruppenlasthöhe. Die Umlagerungsrate ist bei den verschiedenen Ankertypen unterschiedlich.

Die Versuchsergebnisse verdeutlichen, dass das Umlagerungsverhalten zu Beginn der Risszyklen von Anker 2 bestimmt wird. Dieser Anker neigt dazu, bei jeder Rissöffnung weiter rauszurutschen, wohingegen sich Anker 1 nahezu nicht verschiebt. Die Lastumlagerung verlangsamt sich mit zunehmender Lasthöhe des Ankers 1 und verringerter Lasthöhe des Ankers 2. Durch die progressive Entlastung von Anker 2 wird das Lastverschiebungsverhalten der Ankergruppe zunehmend von dem des Ankers 1 bestimmt. Die Ankergruppe verhält sich dann wie ein Einzelanker im ungerissenen Beton unter zyklischer Belastung. Diese Lastzyklen werden jedoch durch die Risszyklen erzeugt.

When the crack starts to cycle, both anchor loads alternate, each by the same but opposite magnitude. For the determination of the residual load capacity in Phase II, the anchors are loaded displacement-controlled to failure.

In the following, the load-displacement behaviour during Phase I is discussed in detail: Every time the crack is compressed, Anchor 2 regains its stiffness and picks up load. Anchor 1 is unloaded by the same degree. When the crack opens again, Anchor 2 loses its stiffness and dismisses part of the load that has to be taken up by Anchor 1. This behaviour recurs 10 times in which course the group load is to a large degree redistributed towards the stiffer anchor located in uncracked concrete. The load-displacement curve of Anchor 1 approaches the total group load, while the load of Anchor 2 decreases towards zero. By this behaviour, the total displacement of the group is substantially reduced if compared to that of a single anchor installed in a cycled crack. The load-displacement curves of the two anchors are axially symmetric about the load level that equals half of the group load. The rate of redistribution is different for the various anchor types.

The test results make clear that in the beginning of crack cycling, the redistribution behaviour is governed by Anchor 2. This anchor tends to slip each time the crack is opened up, whereas Anchor 1 is more or less fixed. With increasing load of Anchor 1 and decreasing load of Anchor 2, the load redistribution is slowing down. By progressive unloading of Anchor 2, the load-displacement behaviour of the group is increasingly governed by that of Anchor 1. The group behaves more like a single anchor in uncracked concrete under cyclic load. This load cycling, however, is induced by crack cycling.

## Zusammenfassung

Es wurde ein Versuchsaufbau entwickelt und erfolgreich realisiert, der erforderlich ist, um Ankergruppen seismisch unter einer einwandfreien Anordnung zu testen. Dies ermöglichte die detaillierte Untersuchung von seismischen Einwirkungen auf das Lastverschiebungsverhalten von Ankergruppen.

Ankergruppen, bei denen sich ein Anker im ungerissenen Beton und der andere Anker im zyklisch gerissenen Beton befinden, unterliegen starken Lastumlagerungen. Während der Risszyklen wird die Gruppenlast schnell zum steiferen Anker verlagert. Dies wirkt sich günstig auf die Gesamtverschiebung der Ankergruppe aus. Ankergruppen ermöglichen somit, die Verschiebungen wesentlich zu begrenzen. Die Resttragfähigkeit der Ankergruppe wird im Allgemeinen durch die Risszyklen nicht negativ beeinflusst.

Weitere Details zum theoretischen Hintergrund und eine ausführliche Besprechung der Versuchsergebnisse werden in [1] dargestellt. Dieser Artikel stellt auch ein Modell für analytische Untersuchungen der Lastumlagerung vor. Alle Versuchsergebnisse des gesamten Versuchsprogramms sind im umfassenden Versuchsbericht [2] dokumentiert.

## Literatur / References

- [1] **Mahrenholtz, P.; Eligehausen, R. (2010):** Behavior of Anchor Groups Installed in Cracked Concrete under Simulated Seismic Actions. Fracture Mechanics of Concrete Structures FraMCoS, 2010, Proceeding 816-822
- [2] **Mahrenholtz, P. (2010):** Group Tests on Expansion Anchors, Undercut Anchors and Screw Anchors – Summary Test Report. Institut für Werkstoffe im Bauwesen, University of Stuttgart, 2010

## Summary

A test setup with the infrastructure necessary to test anchor groups seismically under a clean configuration has been developed and successfully implemented. It enabled the detailed investigation of the seismic effects on the load-displacement behaviour of anchor groups.

Anchor groups with one anchor located in uncracked concrete and the other in cyclically cracked concrete, are subject to severe load redistribution. During crack cycling, the group load is quickly shifted towards the stiffer anchor. This has a beneficial effect on the total displacement behaviour of the anchor group. Thus, anchor groups can help to limit the displacement substantially. In general, the residual group capacity is not negatively affected by crack cycling.

Further details on the theoretical background and a detailed discussion of the test results can be found in [1]. Also, this paper introduces a model for an analytical investigation of the load redistribution. All test data of the complete test program are given in the comprehensive report [2].

## NUMERISCHE MODELLIERUNG DER KORROSION DES STAHLES IN BETON NUMERICAL MODELING OF STEEL CORROSION IN CONCRETE

von/by: Joško Ožbolt, Gojko Balabanić<sup>1)</sup> & Marija Kušter<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka

<sup>2)</sup> Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb

### Zusammenfassung

In dem Bericht ist ein voll gekoppeltes chemo-hygro-thermo-mechanisches Modell für die nichtstationäre Analyse der Korrosionsprozesse, vor und nach der Depassivierung des Stahles im Beton, dargestellt. Die Anwendung des Modells wird anhand von zwei numerischen Beispielen illustriert. Eine Stahlbetondecke bzw. ein Balken werden dem Chloridangriff ausgesetzt. Es werden die Prozesse vor und nach der Depassivierung des Stahles simuliert. Der Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen aus der Literatur zeigt, dass das Modell in der Lage ist die Korrosion des Stahles in Beton realistisch vorherzusagen.

### Einleitung

Die Chlorid-induzierte Korrosion des Stahles im Beton ist eine der Hauptgründe für die Abnahme der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen. Die Stahlbetonbauteile, die salzhaltigen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind, wie z.B. Bauteile in Meeresnähe, Autobahnbrücken und Parkhäuser, weisen sehr oft Schädigungen in Folge von Korrosion auf. Mit zunehmender Korrosion nimmt die Querschnittfläche des Stahles ab, der sogenannte „Pitting“ Effekt kann zu einer signifikanten Abnahme der Duktilität des Stahles führen. Weiterhin wird die Verbundfestigkeit zwischen Beton und Stahl mit fortschreitender Korrosion reduziert. Die Schädigungen können Rissbildungen und Abplatzungen der Betondeckung hervorrufen. In Folge dessen müssen die betroffenen Bauwerke instandgesetzt oder gar erneuert werden, was oft mit sehr hohen direkten und indirekten Kosten verbunden ist. Es ist sinn-

### Abstract

Coupled 3D chemo-hygro-thermo mechanical model for transient analysis of corrosion processes before and after de-passivation of steel reinforcement in concrete is presented in this paper. The application of the model is illustrated on numerical examples in which the transient 3D finite element analysis of RC specimens is carried out. The numerical results are in good agreement with the available experimental observations and with the results known from the literature, what leads to the conclusion that the model is able to realistically predict corrosion of reinforcement.

### Introduction

Chloride-induced corrosion of steel bars in reinforced concrete is one of the major causes of deterioration of reinforced concrete structures, especially those exposed to aggressive maritime environment condition and de-icing salts. Corrosion causes reduction of steel cross-section area and damage of concrete cover due to expansion of corrosion product. With advanced corrosion, ductility of reinforcement, due to the pitting effect, and bond properties can be significantly reduced.

A reliable 3D numerical model, which can realistically simulate effects of reinforcement corrosion in concrete, enables to predict service life of new or already damaged structure. Moreover, by employing such a model, it is possible to formulate simple engineering models & design rules in order to increase the durability of structure and reduce its maintenance costs.

voll ein realistisches 3D Modell zu haben, das in der Lage ist diese Schädigungen zu simulieren.

Um die Abnahme der Querschnittsfläche des Stahles und die Zunahme des Volumens der Korrosionsprodukte über die Zeit berechnen zu können, ist es notwendig die Korrosionsgeschwindigkeit zu kennen, d.h. die Dichte des elektrischen Stroms der Korrosionseinheit muss bekannt sein. Für die Berechnung der Korrosionsstromsdichte müssen die folgenden physikalischen und chemischen Vorgänge modelliert werden: (i) Transport von Wasser (Feuchte), Temperatur, Sauerstoff und Chloriden durch die Betondeckung, (ii) Immobilisierung von Chloriden im Beton, (iii) Transport von  $\text{OH}^-$  Ionen durch das Elektrolyt der Betonporen (iv) die Verbreitung der anodischen und kathodischen Flächenanteile und deren Polarisationswiderstände und (vi) die Schädigung des Betons. Die Schädigungen haben einen starken Einfluss auf die Transportprozesse im Beton und somit auch auf die Korrosion des Bewehrungsstahles. Es erweist sich als sehr schwierig, den Einfluss der Schädigung auf die Transportprozesse und die Korrosion realistisch abzubilden.

### **Nicht-mechanische Prozesse vor der Depassivierung des Stahles**

Der Transport von Kapillarwasser durch die Poren des Betons ist mit der Gleichung von Richard beschrieben [1] mit der Annahme, dass die Transportprozesse in altem Beton stattfinden:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \nabla \cdot [D_w(\theta_w) \nabla \theta_w]$$

dabei ist  $\theta_w$  die Volumenfraktion des Wassers in Beton ( $\text{m}^3$  von Wasser /  $\text{m}^3$  von Beton) und  $D_w(\theta_w)$  ist der Diffusionskoeffizient des Wassers in Beton ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), beschrieben als eine nicht-lineare Funktion der Wassermenge [2].

To estimate reduction of the reinforcement cross-section and to predict the volume increase of the corrosion product it is necessary to calculate the corrosion rate what requires modelling of the following physical, electrochemical and mechanical processes: (i) transport of capillary water, heat, oxygen and chloride through the concrete cover; (ii) immobilization of chloride in the concrete; (iii) cathodic and anodic polarization, (iv) transport of  $\text{OH}^-$  ions through electrolyte in concrete pores, (v) distribution of electrical potential and current density, (vi) transport of corrosion products through concrete pores and cracks, and (vii) damage of concrete due to mechanical and non-mechanical actions.

In the model the corrosion effects, such as corrosion products expansion or the reinforcement cross-section reduction, have an effect on the mechanical response of concrete structures. On the other hand, the mechanical properties, such as strength or fracture energy, also influence the corrosion process.

### **Non-mechanical processes before depassivation of reinforcement**

Transport of capillary water is described in terms of volume fraction of pore water in concrete by Richard's equation [1], based on the assumption that transport processes take place in aged concrete:

(1)

where  $\theta_w$  is volume fraction of pore water ( $\text{m}^3$  of water /  $\text{m}^3$  of concrete) and  $D_w(\theta_w)$  is capillary water diffusion coefficient ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) described as a strongly non-linear function of moisture content [2].

Transport of chloride ions through a non-

Der Transport von Chlorid-Ionen durch nicht-gesättigten Beton wird als Diffusion, Konvektion und als physikalische und chemische Bindung der Chloride bei der Hydratation des Zementes beschrieben [1]:

$$\theta_w \frac{\partial C_c}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta_w D_c(\theta_w, T) \nabla C_c] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_c - \frac{W_{gel}}{1000} \cdot \frac{\partial C_{cb}}{\partial t} \quad (2a)$$

$$\frac{\partial C_{cb}}{\partial t} = k_r (\alpha C_c^\beta - C_{cb}) \quad (2b)$$

dabei ist  $C_c$  die Konzentration von freien Chloriden gelöst in Porenwasser ( $\text{kg}_{\text{Cl}^-}/\text{m}^3$  des Porenwassers),  $D_c(\theta_w, T)$  ist der effektive Diffusionskoeffizient der Chloride ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) der als die Funktion der Wassermenge  $\theta_w$  und Betontemperatur  $T$  definiert ist,  $C_{cb}$  ist der Teil von gebundenen Chloriden bezogen auf die Masse des Zementgel ( $\text{g}_{\text{Cl}^-}/\text{kg}_{\text{gel}}$ ),  $k_r$  ist der s.g. Bindungskoeffizient,  $\alpha=3.57$  und  $\beta=0.38$  sind die Konstanten [6].

Mit der Annahme, dass der Sauerstoff an keiner chemischen Reaktion vor der Depassivierung des Stahles beteiligt ist, wird der Transport von Sauerstoff als ein Konvektiv-Diffusions-Problem behandelt:

$$\theta_w \frac{\partial C_o}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta_w D_o(\theta_w) \nabla C_o] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_o \quad (3)$$

dabei ist  $C_o$  die Sauerstoffkonzentration in Porenwasser ( $\text{kg}$  von Sauerstoff/ $\text{m}^3$  von Porenwasser) und  $D_o(\theta_w)$  die effektive Diffusionskoeffizient des Sauerstoffes der von der Porosität des Betons  $p_{con}$  und der Wassersättigung  $S_w$  abhängig ist.

Basierend auf dem Konstitutiven Gesetz des Wärmeflusses und der Konservierung der Energie, ist die Temperaturverteilung in Kontinuum beschrieben mit:

$$\lambda \Delta T + W(T) - C \rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

dabei ist  $\lambda$  die Leitfähigkeit ( $\text{W}/(\text{m K})$ ),  $C$  ist die spezifische thermische Kapazität ( $\text{J}/(\text{K kg})$ ),  $\rho$  ist die Dichte des Betons ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) und  $W$  ist die interne Wärmequelle ( $\text{W}/\text{m}^3$ ). Mehr über die Formulierung der starken bzw.

saturated concrete occurs as a result of convection, diffusion and physically and chemically binding by cement hydration product [1]:

where  $C_c$  is concentration of free chloride dissolved in pore water ( $\text{kg}_{\text{Cl}^-}/\text{m}^3$  pore solution),  $D_c(\theta_w, T)$  is the effective chloride diffusion coefficient ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) expressed as a function of moisture content  $\theta_w$  and concrete temperature  $T$ ,  $C_{cb}$  is content of bound chloride per mass of cement gel ( $\text{g}_{\text{Cl}^-}/\text{kg}_{\text{gel}}$ ),  $k_r$  is binding rate coefficient,  $\alpha=3.57$  and  $\beta=0.38$  are constants [6].

Assuming that oxygen does not participate in any chemical reaction before depassivation of steel, transport of oxygen through concrete is considered as a convective diffusion problem [1]:

where  $C_o$  is oxygen concentration in pore solution ( $\text{kg}$  of oxygen/ $\text{m}^3$  of pore solution) and  $D_o(\theta_w)$  is the effective oxygen diffusion coefficient, dependent on concrete porosity  $p_{con}$  and water saturation of concrete  $S_w$ .

Based on the constitutive law for heat flow and conservation of energy, the equation which describes temperature distribution in continuum reads:

where  $\lambda$  is thermal conductivity ( $\text{W}/(\text{m K})$ ),  $C$  is heat capacity per unit mass of concrete ( $\text{J}/(\text{K kg})$ ),  $\rho$  is mass density of concrete ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) and  $W$  is internal source of heating ( $\text{W}/\text{m}^3$ ).

schwachen Form der Prozesse bis zur Depassivierung des Stahles in Beton sind in [3] zu finden.

### Nicht-mechanische Prozesse nach der Depassivierung des Stahles

Die aktive Korrosion des Stahles in Beton beginnt wenn die Schicht von Eisen-Oxid an der Oberfläche des Stahles gebrochen wird (depassiviert). Dieses findet statt, wenn die Dichte von Chlorid-Ionen in Beton den kritischen Wert erreicht. Die Prozesse, die für die Korrosionsphase des Bewehrungsstahles zu kontrollieren sind: (i) Verbrauch des Sauerstoffes an der Oberfläche der Kathode und Anode, (ii) elektrischer Strom durch Porenwassers (Elektrolyt) und (iii) das kathodische und anodische Potential. Der Verbrauch des Sauerstoffes an der Kathoden- und Anodenfläche wird berechnet als [4]:

$$D_o(S_w, p_{con}) \left. \frac{\partial C_o}{\partial n} \right|_{cathode} = -k_c i_c$$

$$D_o(S_w, p_{con}) \left. \frac{\partial C_o}{\partial n} \right|_{anode} = -k_a i_a$$

Dabei ist  $n$  die Normale zu der Stahloberfläche und  $i_c$  und  $i_a$  sind die kathodische bzw. anodische Stromdichte ( $A/m^2$ ).

Nach der Butler-Volmer Kinetik wird in dem Modell die Kinetik der Reaktion an der anodischen bzw. kathodischen Fläche wie folgt gerechnet [4]:

$$i_c = i_{0c} \frac{C_o}{C_{ob}} e^{2.3(\Phi_{0c} - \Phi) / \beta_c}$$

dabei ist  $C_{ob}$  die Sauerstoffdichte ( $kg/m^3$ ) an der Betonoberfläche,  $\Phi$  ist das elektrische Potenzial des Elektrolytes an der Bewehrungsoberfläche (V),  $i_{0c}$  und  $i_{0a}$  sind die s.g. Austauschstromdichte zwischen kathodischer und anodischer Reaktion ( $A/m^2$ ),  $\Phi_{0c}$  und  $\Phi_{0a}$  sind s.g. kathodische und anodische Gleichgewichtspotenziale (V),  $\beta_c$  und  $\beta_a$  sind die Tafelsteigung der kathodischen und anodischen Reaktion (V/dec). Der elektrische Strom durch das Elektrolyt ist das

For more details related to the strong and weak formulations of the processes up to the depassivation of reinforcement see [3].

### Non-mechanical processes after depassivation of reinforcement

The active corrosion of steel will start when the surface film of ferric oxide is broken or depassivated by reaching the critical concentration of chloride ions in concrete near steel surface. The non-mechanical processes relevant for the propagation stage of steel corrosion in concrete are: (i) mass sinks of oxygen at steel surface due to cathodic and anodic reaction, (ii) the flow of electric current through pore solution and (iii) the cathodic and anodic potential equations.

The oxygen consumption at the cathodic and anodic surfaces, can be calculated as [4]:

$$k_c = 8.29 \times 10^{-8} \frac{kg}{C} \quad (5a)$$

$$k_a = 4.14 \times 10^{-8} \frac{kg}{C} \quad (5b)$$

where  $n$  is outward normal to the steel bar surface and  $i_c$  and  $i_a$  are cathodic and anodic current density ( $A/m^2$ ), respectively.

According to Butler – Volmer kinetics, in the present model kinetics of reaction at the cathodic and anodic surface can be estimated from [4]:

$$i_a = i_{0a} e^{2.3(\Phi - \Phi_{0a}) / \beta_a} \quad (6)$$

where  $C_{ob}$  is oxygen concentration on the surface of a concrete member ( $kg/m^3$ ),  $\Phi$  is electric potential in pore solution near reinforcement surface (V),  $i_{0c}$  and  $i_{0a}$  are the exchange current density of the cathodic and anodic reaction ( $A/m^2$ ),  $\Phi_{0c}$  and  $\Phi_{0a}$  are the cathodic and anodic equilibrium potential (V),  $\beta_c$  and  $\beta_a$  are the Tafel slope for cathodic and anodic reaction (V/dec), respectively.

The electric current through the electrolyte is a result of motion of charged particles and, if

Ergebnis der Bewegung der aufgeladenen Partikel und mit der Annahme der elektrischen Neutralität sowie mit der konstanten Ionendichte gilt [4]:

$$\mathbf{i} = -\sigma(S_w, p_{con})\nabla\Phi \quad (7)$$

wobei  $\sigma$  die elektrische Leitfähigkeit des Betons ist. Die Gleichung der Erhaltung der elektrischen Ladung, falls die Bedingung der elektrischen Neutralität erfüllt ist und die elektrische Leitfähigkeit des Betons konstant angenommen ist, lautet [4]:

$$\nabla^2\Phi = 0 \quad (8)$$

Um das obige System von partiellen Differentialgleichungen mit der Anwendung von finiten Elementen (FE) zu lösen, muss die starke Form der Gleichungen in die s.g. schwache Form umformuliert werden [4].

### Chemo-hygro-thermo-mechanische Kopplung

Das vorgestellte Modell wurde im Rahmen der Kontinuumsmechanik mit der Annahme der Gültigkeit der irreversiblen Thermodynamik formuliert. Im mechanischen Teil des Modells wurde das "Microplane" Modell für Beton eingesetzt [5]. In der FE Analyse werden die Risse verschmiert modelliert. Zur Vermeidung einer Netzempfindlichkeit und einer übermäßigen Lokalisierung bei der Modellierung des Betons wird die Rissband-Methode benutzt [6].

Unter der Annahme der quasi-statischen Bedingungen, wird das mechanische Verhalten des Betons mit der Gleichgewichtsgleichung beschrieben:

$$\nabla\left[D_m(u, \theta_w, T)\nabla u\right] + \rho b = 0 \quad (9)$$

dabei ist  $D_m$  der Steifigkeitstensor des Materials,  $u$  ist das Verschiebungsfeld und  $\rho b$  sind die spezifischen Volumenkräfte.

Im mechanischen Teil des Modells wird der Gesamtdehnungstensor in den mechanischen, thermischen, hygri-schen und Dehnungsteil, der aus der Expansion der Korro-

the electrical neutrality of the system and the uniform ions concentration are assumed, can be written as [4]:

where  $\sigma$  is electrical conductivity of concrete. The equation of electrical charge conservation, if the electrical neutrality is accounted for and the electrical conductivity of concrete is assumed as uniformly distributed, reads [4]:

To solve the system of partial differential equations using finite elements for domain, the strong form of these equations must be rewritten into the weak form, what is carried out by employing the Galerkin weighted residual method [4].

### Chemo-hygro-thermo-mechanical coupling

The presented model is formulated in the framework of continuum mechanics following basic principles of irreversible thermodynamics. The mechanical part of the model is based on the microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint [5]. In the finite element analysis cracks are treated in a weak discontinuity, i.e. so called smeared crack approach is employed. To assure the objectivity of the results with respect to the size of the finite elements, the crack band method is used [6].

The governing equation for the mechanical behaviour of a continuous body in the case of static loading condition reads:

where  $D_m$  is material stiffness tensor,  $\rho b$  is specific volume load and  $u$  is displacement field.

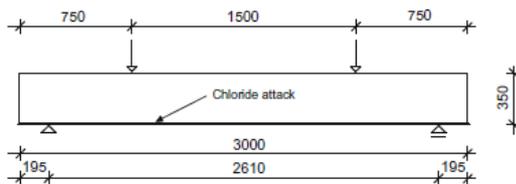
In the mechanical part of the model the total strain tensor is decomposed as mechanical strain, thermal strain, hygro strain (swelling-shrinking) and strain due to expansion of

sionsprodukte entsteht, zerlegt.

Die Transportprozesse in Beton sind von der Schädigung des Betons abhängig. Aus dem Grund wird der Diffusionskoeffizient des Wassers von der Rissbreite abhängig [3].

### Numerisches Beispiel: Prozesse vor der Depassivierung der Bewehrung

Im ersten numerischen Beispiel wird der Einfluss von Schädigung des Betons auf die Depassivierung der Bewehrung untersucht [3]. Eine Stahlbetondecke wurde zuerst durch die mechanischer Belastung beschädigt und anschließend aggressiven Einfluss von Meereswasser ausgesetzt (siehe Abb. 1).

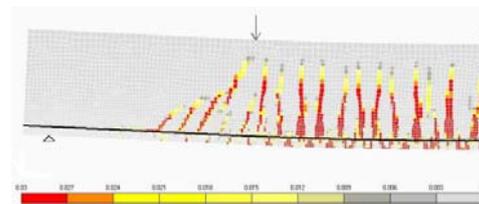


corrosion product.

The transport processes in concrete depend on damages in concrete. Therefore, water diffusivity, as relevant parameter, is employed in the model as a function of crack width [3].

### Numerical example: processes before depassivation of reinforcement

The aim of first numerical example is to demonstrate the influence of cracks in concrete on transport processes and on depassivation time [3]. Simply supported reinforced concrete slab was first damaged by external load and subsequently exposed to aggressive influence of seawater at the bottom side (Fig. 1).



**Abbildung 1:** Querschnitt der Stahlbetondecke mit Deckung von 30 mm (links) und FE Diskretisierung und die Rissverteilung (rechts)

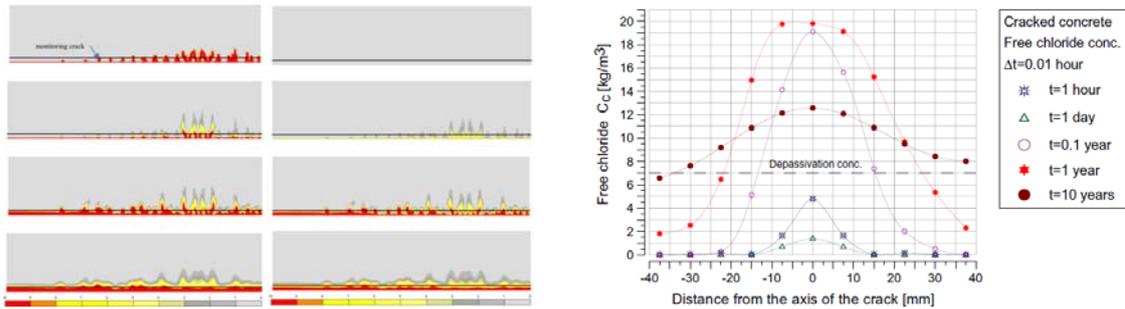
**Figure 1:** Cross-section geometry of investigated reinforced concrete slab with concrete cover of 30 mm (left) and FE discretization and distribution of cracks in the slab (right)

Die Verteilung von freien und gebundenen Chloriden ist in Abb. 2 (links) dargestellt. Es zeigt sich, dass im gerissenen Teil der Platte die Depassivierung (Dichte der freien Chloride im Porenwasser von  $7.0 \text{ kg/m}^3$ ) gleich nach der Rissbildung stattfindet. Im Gegenteil dazu wird im ungerissenen Teil der Platte die Depassivierung sogar nach 10 Jahren noch nicht erreicht.

Aus dem Vergleich der Verteilung von Chloriden bei verschiedenen Zeitpunkten (Abb. 2, recht) wird ersichtlich, dass sich mit der Zeit die Chloride zwischen den Rissen ausbreiten. Aus dem Grund nimmt die maximale Dichte der Chloride in den Rissen mit der Zeit ab. Eine ähnliche Tendenz wurde auch in den experimentellen Untersuchungen festgestellt [7].

The distribution of free and bounded chloride, in time sequences between 1 hour and 10 years, is shown in Fig. 2 (left). The analysis predicts depassivation time of reinforcement (concentration of free chloride:  $7.0 \text{ kg/m}^3$  of pore water) in the cracked zone immediately after the crack formation. On the contrary to this, for the un-cracked part of the slab depassivation time is not reached even after 10 years.

Comparing the distribution of the chlorides at different times (Fig. 2, right), it can be seen that the free chlorides penetrate in the region between the cracks (horizontal direction). Therefore, there is a slight decrease of their concentration in the crack, i.e. with increase of time chlorides tend to be smeared-out into the horizontal direction. A similar result was observed in experiments [7].



**Abbildung 2:** Die Verteilung von freien und gebundenen Chl. nach: eine Stunde, einem Tag & zehn Jahre (links) und die Verteilung von freien Chl. (Bewehrungsebene, Riss) (rechts)  
**Figure 2:** Distribution of free and bond chlorides after 1 hour, 1 day, 1 year and 10 years (left) and distribution of free chlorides at the level of reinforcement, left and right of the crack (right)

### Numerisches Beispiel: Prozesse nach der Depassivierung der Bewehrung

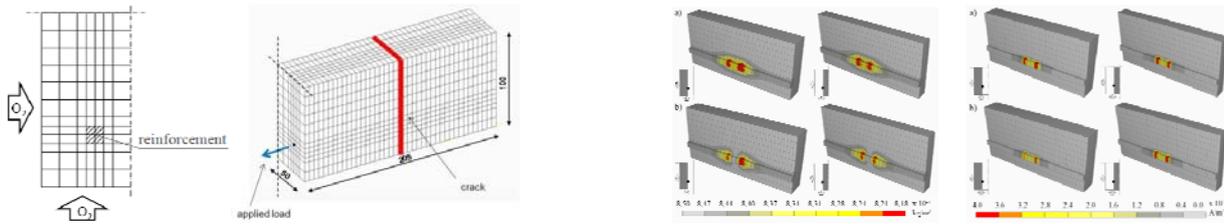
Im zweiten Beispiel wurden die Prozesse nach der Depassivierung der Bewehrung simuliert [4]. Die 3D FE Untersuchung wurde an Stahlbetonbalken durchgeführt. Der Balken wurde beschädigt bzw. unbeschädigt der s.g. „Splash“ Zone ausgesetzt. Das Ziel war den Einfluss von Betonqualität, die Wassersättigung des Betons und den Einfluss des Risses auf die Korrosionsrate zu untersuchen (Abb. 3).

Der maximale Verbrauch des Sauerstoffes wurde in der Übergangszone zwischen Kathode und Anode vorhergesagt (siehe Abb. 4). Die Verteilung des Sauerstoffes in gerissenem und ungerissenem Beton ist sehr ähnlich. Der Unterschied ist nur direkt im Riss vorhanden wo eine Versorgung mit Sauerstoff wie an der Oberfläche des Balkens stattfindet. Mit Zunahme der Wassersättigung nimmt der Verbrauch des Sauerstoffes zu (siehe Abb. 4, unten). Der Verbrauch des Sauerstoffes ist im guten Beton ( $w/c = 0.4$ ) deutlich schneller als im schlechten ( $w/c = 0.7$ ). In dem guten Beton beträgt die kritische Wassersättigung, bei der die Dichte des Sauerstoffes an der Kathode einen kleinen aber noch positiven Wert erreicht und die Simulation immer noch stabil ist, etwa 70%.

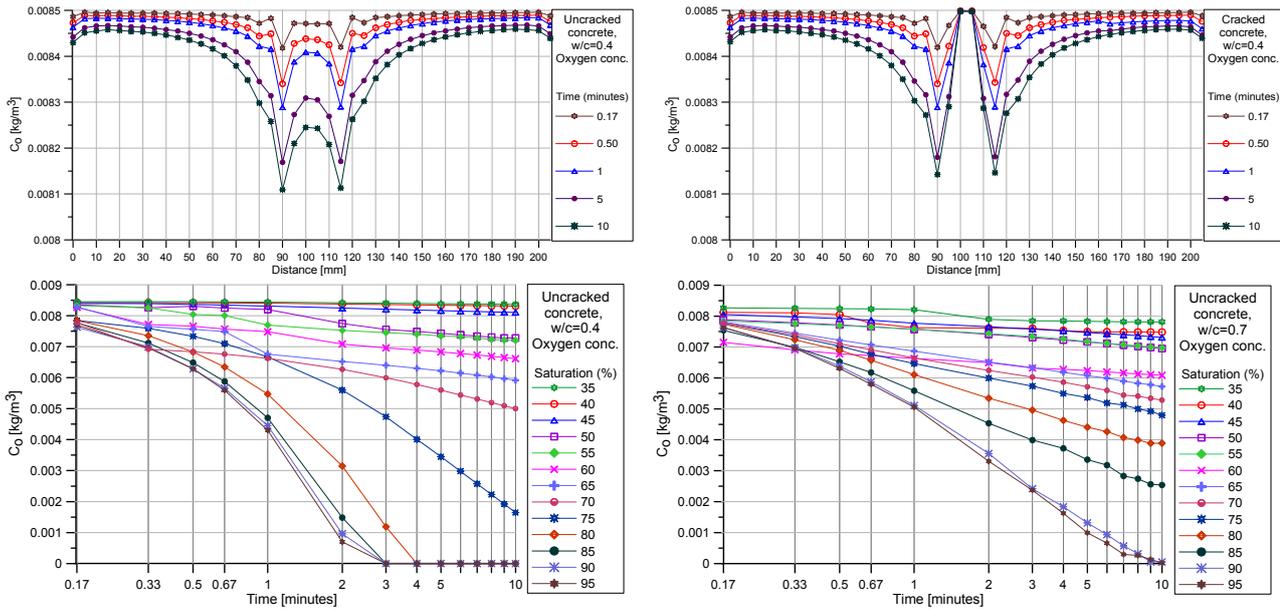
### Numerical example: processes after depassivation of reinforcement

In second numerical example processes after depassivation of reinforcement are analysed [4]. The study is performed for a concrete beam, cracked under axial tensile loading and exposed to splash zone. The aim of the study was to demonstrate the influence of concrete quality, water saturation and cracks in concrete on corrosion current density of a macro cell (Fig. 3).

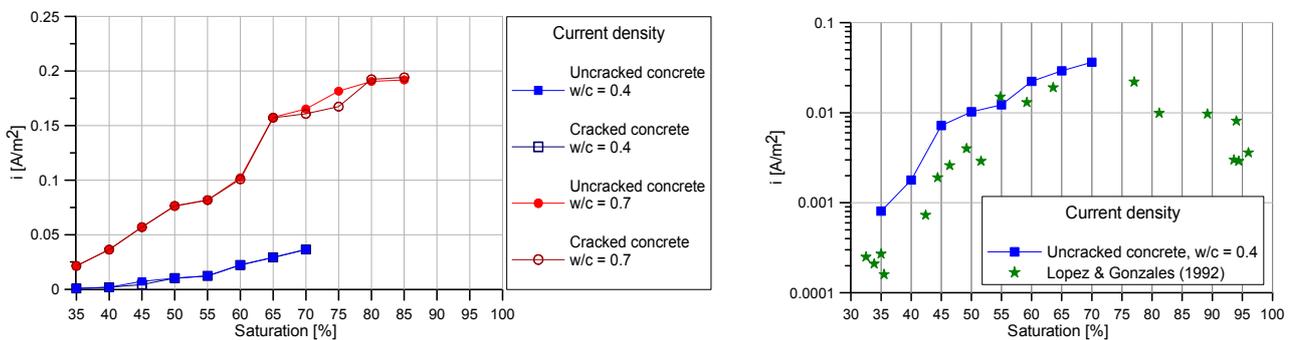
Maximal consumption of oxygen is predicted in the transition zone between anode and cathode (Fig. 4, upper row). The oxygen distribution in cracked and un-cracked concrete is very similar. The only difference is noticed in the vertical row of elements representing crack. There is almost no consumption of oxygen because of a continuous oxygen supply in the crack. The consumption of oxygen increases with increase of water saturation (Fig. 4, bottom row). Furthermore, the consumption of oxygen is much faster in a good quality concrete. In the good quality concrete the critical water saturation, at which the concentration of oxygen at cathodic site reaches a small positive value and simulation is still stable, is approximately 70%.



**Abbildung 3:** Geometrie des Modells (links), die Verteilung des Sauerstoffes und der Stromdichte ( $w/c=0.4$ ,  $S_w=45\%$ ,  $t_{corr}=10$  min) für ungerissenen und gerissenen Beton (rechts)  
**Figure 3:** Geometry of the model (left), distribution of oxygen and current density ( $w/c=0.4$ ,  $S_w=45\%$ ,  $t_{corr}=10$  min) for un-cracked and cracked concrete (right)



**Abbildung 4:** Sauerstoffdichte: (i) im ungerissenen (oben links) und gerissenen guten Beton (oben rechts) an der Bewehrungsebene; (ii) Als Zeitfunktion für verschiedene Wassersättigungen für guten (unten links) und schlechten (unten rechts) Beton  
**Figure 4:** Oxygen concentration: (i) At the level of reinforcement in un-cracked (upper row left) and cracked (upper row right) good quality concrete; (ii) As function of time for different water saturation in transition anode-cathode zone for un-cracked, good (bottom row left) and poor (bottom row right) quality concrete



**Abbildung 5:** Die Stromdichte als Funktion der Wassersättigung in der Übergangzone: Für alle berechneten Fälle (links) und der Vergleich mit den Versuchsergebnissen [8] (rechts).  
**Figure 5:** Relation between saturation and current density measured at the anode-cathode transition zone: for all calculated cases (left) and comparison with experiments [8] (right)

Bei schlechtem Beton liegt dieser Wert bei etwa 85%. Wie erwartet ist die Korrosionsrate im schlechten Beton deutlich grösser als im guten Beton. Außerdem zeigt sich, dass der Riss keinen großen Einfluss auf die maximale Korrosionsrate aufweist (Abb. 5, links). Die numerischen Ergebnisse für die berechnete Stromdichte für ungerissenen guten Beton sind in sehr guter Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen [8] (siehe Abb. 5, rechts).

### Zusammenfassung

Ein 3D gekoppeltes chemo-hygro-thermo-mechanisches Modell für die nichtstationäre Analyse von den Korrosionsprozessen vor bzw. nach der Depassivierung des Stahles in Beton ist formuliert und in das 3D FE Programm implementiert.

Die dargestellten numerischen Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Untersuchungen. Dieses bestätigt, dass das Modell in der Lage ist, die Korrosion realistisch vorherzusagen.

Die Schädigung des Betons reduziert die Depassivierungszeit deutlich, jedoch haben die Risse praktisch keinen Einfluss auf die Korrosionsrate. Es wurde gezeigt, dass die Korrosionsrate im schlechten Beton höher ist als im guten Beton.

Mit der Modellierung des Transports von Korrosionsprodukten in Beton und deren mechanische Wirkung auf Beton wird derzeit das Modell weiterentwickelt.

### Literatur / References

- [1] **Bear, J.; Bachmat, Y. (1991):** Introduction to Modelling of Transport Phenomena in Porous Media. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991
- [2] **Leech, C.; Lockington, D.; Dux, P. (2003):** Unsaturated Diffusivity Functions for Concrete Derived from NMR Images. In: *Materials and Structures* 36 (2003), S. 413-418
- [3] **Ožbolt, J.; Balabanić, G.; Periškić, G.; Kušter, M. (2010):** Modelling the effect of damage on transport processes in concrete. In: *Construction and Building Materials* 24 (2010), S. 1638-1648

Similar results can be observed for poor quality concrete; however, the oxygen consumption is much slower and the critical water saturation is 85%.

The corrosion rate is higher in poor than in good quality concrete and crack does not have significant influence on the maximal current density (Fig. 5, left). Numerical results of current density for un-cracked, good quality concrete are in good agreement with the experimental results (Fig. 5, right).

### Summary

Coupled 3D chemo-hygro-thermo-mechanical model for transient analysis of corrosion processes before and after depassivation of steel reinforcement in concrete is developed and implemented into 3D FE code.

The numerical results are in good agreement with the available experimental observations, what leads to the conclusion that the model is able to realistically predict corrosion of reinforcement.

Damage of concrete significantly reduces depassivation time; however, for assumed conditions crack does not significantly influences corrosion rate. Corrosion rate is much higher in poor than in good quality concrete.

Further development of the model is in progress, current task is modelling of transport of corrosion products through concrete pores and cracks.

- [4] **Ožbolt, J.; Balabanić, G.; Kušter, M. (2011):** 3D Numerical modelling of steel corrosion in concrete structures. In: Corrosion Science (Submitted for possible publication)
- [5] **Ožbolt, J.; Li Y-J.; Kožar, I. (2001):** Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint. In: International Journal of Solids and Structures 38 (2001), S. 2683-2711
- [6] **Bažant, J.; Oh, B.H. (1983):** Crack band theory for fracture of concrete. In: Rilem 93 (1983), S. 155–177.
- [7] **Marsavina, L.; Audenaert, K.; De Schutter, G.; Faur, N.; Marsavina, D. (2008):** Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete. In: Construction and Building Materials 23 (2008), S. 264-274
- [8] **López, J.A.; González, K. (1993):** Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement. In Cement and Concrete Research 23 (1993), S. 368–376

# NUMERISCHE SIMULATION DES BETONVERHALTENS BEI ERHÖHTEN TEMPERATUREN-SCHÄDIGUNG UND EXPLOSIVE ABPLATZUNGEN

## NUMERICAL SIMULATION OF CONCRETE EXPOSED TO HIGH TEMPERATURE – DAMAGE AND EXPLOSIVE SPALLING

von/by: Josko Ozbolt, Josipa Bosnjak, Goran Periskic, Christian Grosse<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Techn. Univ. München

### Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wird ein voll gekoppeltes 3D thermo-hygro-mechanisches Modell für Beton und Anwendungsbeispiele in numerischen Simulationen dargestellt. Anhand von drei Beispielen wurde gezeigt, dass das Modell in der Lage ist das Verhalten von Beton realistisch vorherzusagen.

### Einleitung

Obwohl das Betonverhalten unter erhöhten Temperaturen gut dokumentiert ist, [1] und [2], sind weitere experimentelle und theoretische Studien notwendig um die Interaktion zwischen hygro-thermischen und mechanischen Eigenschaften zu erklären. Numerische Untersuchungen tragen dazu bei, dass das Verhalten besser erklärt wird und der Anzahl der aufwendigen Versuchen vermindert wird.

Im vorliegenden Bericht ist ein 3D „1-Phasen“ phänomenologisches Modell dargestellt. Das Modell basiert auf einer thermo-hygro-mechanischer Kopplung zwischen thermischen, hygrischen und mechanischen Eigenschaften von Beton. Das temperaturabhängige Microplane-Modell dient als konstitutives Gesetz für Beton. Das Modell ist in einen 3D Finite Elemente Code implementiert.

### THERMO-HYGRO-MECHANISCHES (THM) MODEL

Das hier dargestellte „1-Phasen“ phänomenologische Modell für Beton ist ein thermo-hygro-mechanisches Modell. Es wurde im Rahmen der Kontinuumsmechanik unter der

### Abstract

In the present paper a fully coupled three-dimensional thermo-hygro-mechanical model for concrete is discussed and used in the numerical studies. The application of the model is demonstrated on three numerical examples and it was shown that the model is capable of predicting the concrete behaviour.

### Introduction

Although the behaviour of concrete at high temperature is in the literature well documented, [1] and [2], further experimental and theoretical studies are necessary to clarify the interaction between hygro-thermal and mechanical properties. To better understand the behaviour of concrete at high temperature and to support the experiments, numerical analysis can be useful.

In the present paper a three-dimensional (3D) single phase phenomenological model, which is based on the thermo-hygro-mechanical coupling between thermal (temperature), hygral (moisture and pore pressure) and mechanical properties of concrete is briefly discussed. The temperature dependent microplane model is used as a constitutive law for concrete. The model is implemented into a 3D finite element (FE) code.

### THERMO-HYGRO-MECHANICAL (THM) MODEL

The here presented single phase phenomenological model for concrete is a thermo-hygro-mechanical. It is formulated in the framework of continuum mechanics under

Annahme der Gültigkeit der irreversiblen Thermodynamik formuliert [3]. Das Modell ist mit den folgenden Variablen kontrolliert: Temperatur, Porendruck (Feuchte), Spannungen und Dehnungen. In dem Modell sind die Temperatur, Feuchte und Porendruck mit Spannungen und Dehnungen miteinander gekoppelt. Weiterhin sind die relevanten mechanischen Eigenschaften des Betons (E Modul, Zugfestigkeit, Druckfestigkeit und Bruchenergie) temperaturabhängig.

### Kopplung der Wärme und Feuchte in Beton

Die allgemeine Lösung für gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport in porösen Festkörpern, wie z.B. Beton, sind in Rahmen der irreversiblen Thermodynamik bekannt. Allerdings muss das Modell für die praktische Anwendung etwas vereinfacht werden. Nach der Vereinfachung und Annahme, dass der Feuchtigkeits- ( $\mathbf{J}$ ) und der Wärmeflussdichte ( $\mathbf{q}$ ) dehnungs- und spannungsunabhängig sind, gilt:

$$\mathbf{J} = -\frac{a_p}{g} \text{grad } p \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = -b \text{grad } T \quad (2)$$

wobei  $p$  = Porendruck,  $T$  = Temperatur,  $b$  = Wärmeleitfähigkeit,  $a = a_p/g$  = Permeabilität, die in diesem Modell als eine Funktion der Temperatur nach dem Vorschlag von Bažant und Thonguthai [4] angenommen ist. Dabei gilt:  $g$  = Gravitationskonstante.

Die Massenerhaltung wird in Gleichung (3) erfasst, wobei  $w$  = Wassergehalt,  $t$  = Zeit und  $w_d$  = Masse des freien Wassers, das durch die Dehydratation in die Poren freigesetzt wird. Im vorliegenden Modell ist  $w_d$  vernachlässigt. Die Wärmeerhaltung ist in Gleichung (4) dargestellt, wobei  $C$  = Massedichte und isobarische Wärmekapazität des Betons,  $C_a$  = Sorptionswärme des freien Wassers und  $C_w$  = Wärmekapazität des Wassers. Im Modell wird  $C_w$  vernachlässigt.

the assumption of validity of irreversible thermodynamic [3]. The response of the model is controlled by the following state variables: temperature, pore pressure (moisture), stresses and strains. In the numerical model temperature, moisture and pore pressure are coupled with stresses and strains. Moreover, the relevant macroscopic mechanical properties of concrete (Young's modulus, tensile strength, compressive strength and fracture energy) are temperature dependent.

### Coupled heat and moisture in concrete

The general approach for the solution of the problem of coupled heat and mass transfer in a porous solid, such as concrete, is within the framework of irreversible thermodynamic well known. However, for the practical applications the model must be simplified. After introducing simplifications and assuming for a moment that the moisture flux ( $\mathbf{J}$ ) and heat flux ( $\mathbf{q}$ ) in concrete are independent of the stress and strain, the following is valid [6]:

with  $p$  = pore pressure,  $T$  = temperature,  $b$  = heat conductivity,  $a = a_p/g$  = permeability, which is in the present model taken as a function of temperature according to the proposal of Bažant and Thonguthai [4], with  $g$  = gravity constant.

The governing equation for mass conservation is written in Eq. (3), where  $w$  = water content,  $t$  = time and  $w_d$  = total mass of water released into the pore by dehydration. In the present model dehydration is not accounted for. The balance of heat is given by Eq. (4), where  $C$  = mass density and isobaric heat capacity of concrete,  $C_a$  = heat sorption of free water and  $C_w$  = heat capacity of water, which is in the present model neglected.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\text{div } \mathbf{J} + \frac{\partial w_d}{\partial t} \quad (3)$$

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} - C_a \frac{\partial w}{\partial t} - C_w \frac{\partial T}{\partial t} \mathbf{J} \text{ grad } T = -\text{div } \mathbf{q} \quad (4)$$

Die Randbedingungen an der Betonoberfläche werden wie folgt definiert:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = \alpha_w (p_0 - p_E) \quad (5)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \alpha_G (T_0 - T_E) \quad (6)$$

Wobei  $\alpha_w$  = Feuchteübergangsfaktor,  $\alpha_G$  = Wärmeübergangsfaktor,  $T_0$  und  $p_0$  sind Temperatur und Porendruck an der Betonoberfläche und  $T_E$  und  $p_E$  sind Temperatur und Porendruck der Umgebung.

Das konstitutive Gesetz für  $p, w$  und  $T$  folgt dem vereinfachten Vorschlag von Bažant und Thonguthai [4] nach. Um das Verhalten des Porenwassers in Beton zu beschreiben, müssen drei Zustände betrachtet werden: (i) nicht gesättigter Beton (ii) gesättigter Beton und (iii) der Übergang vom nicht gesättigten zum gesättigten Beton. Für eine detaillierte Beschreibung siehe [3] und [5].

Das Modell wurde in ein 3D FE Programm (MASA) unter Verwendung der direkten Integrationsmethode implementiert. Da die Parameter des Modells gekoppelt sind, müssen lineare Differenzgleichungen (3) und (4) iterativ gelöst werden.

### Thermo-hygro-mechanische Kopplung

Um den Einfluss der Temperatur auf die Entwicklung der Dehnungen im Beton zu berücksichtigen, wird der Gesamtdehnungstensor  $\boldsymbol{\varepsilon}$  wie folgt zerlegt [3]:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^m(T, \boldsymbol{\sigma}) + \boldsymbol{\varepsilon}^{ft}(T) + \boldsymbol{\varepsilon}^{tm}(T, \boldsymbol{\sigma}) + \boldsymbol{\varepsilon}^c(T, \boldsymbol{\sigma}) \quad (7)$$

Wobei  $\boldsymbol{\varepsilon}^m$  = mechanischer Dehnungstensor,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{ft}$  = freier thermischer Dehnungstensor,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{tm}$  = thermo-mechanischer Dehnungstensor und  $\boldsymbol{\varepsilon}^c$  = Dehnungen infolge temperaturabhängiges Kriechens des Betons. Für eine detaillierte Beschreibung siehe [3] und [5].

Der mechanische Dehnungstensor  $\boldsymbol{\varepsilon}^m$  wird

Boundary conditions at concrete surface can be defined as:

where  $\alpha_w$  = surface emissivity of water,  $\alpha_G$  = surface emissivity of heat,  $T_0$  and  $p_0$  are temperature and pore pressure at concrete surface and  $T_E$  and  $p_E$  are temperature and pore pressure of environment.

The constitutive laws for  $p$ ,  $w$  and  $T$  follow simplified suggestions proposed by Bažant and Thonguthai [4]. To describe the state of pore water in concrete, one has to distinguish between three different states: (i) non-saturated concrete, (ii) saturated concrete and (iii) transition from non-saturated to saturated concrete. For more detail, see also [3] and [5].

The model is implemented into a 3D FE programme (MASA) using direct integration scheme. Since the controlling parameters are coupled, the linear differential equations (3) and (4) have to be solved iteratively.

### Thermo-hygro-mechanical coupling

To account for the influence of temperature on the strain development in concrete, the total strain tensor  $\boldsymbol{\varepsilon}$  for stressed concrete exposed to high temperature is decomposed as [3]:

where  $\boldsymbol{\varepsilon}^m$  = mechanical strain tensor,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{ft}$  = free thermal strain tensor,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{tm}$  = thermo-mechanical strain tensor and  $\boldsymbol{\varepsilon}^c$  are strains due to the temperature dependent creep of concrete. For more detail see [3] and [5].

The mechanical strain tensor  $\boldsymbol{\varepsilon}^m$  is calculated as  $\boldsymbol{\varepsilon}^m = \boldsymbol{\varepsilon} - (\boldsymbol{\varepsilon}^{ft} + \boldsymbol{\varepsilon}^{tm} + \boldsymbol{\varepsilon}^c)$ . The mechanical

wie folgt berechnet:  $\boldsymbol{\varepsilon}^m = \boldsymbol{\varepsilon} - (\boldsymbol{\varepsilon}^{ft} + \boldsymbol{\varepsilon}^{tm} + \boldsymbol{\varepsilon}^c)$ . Die mechanischen Dehnungen werden dann weiter für die Berechnung der effektiven Spannungszinkremente  $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$  (Spannung in der Festphase der Betonmatrix) und der makroskopischen Spannungszinkremente  $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$  des Microplane-Modells verwendet [3] und [5]:

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{D} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^m + \dot{\boldsymbol{\sigma}}^p \quad (8)$$

mit  $\mathbf{D}$  = tangentialer Materialsteifigkeitstensor des Microplane-Modells,  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^m$  = Inkrement der mechanischen Dehnung und  $\dot{\boldsymbol{\sigma}}^p$  = Inkrement der Spannungen infolge des Porendruckes, der anhand des Inkrements des volumetrischen Porendrucks berechnet wird:  $\dot{\boldsymbol{\sigma}}^v = n \cdot \dot{p}$ , mit  $\dot{p}$  = Inkrement des volumetrischen Porendrucks. Die internen Parameter des Microplane-Modells sind so ausgewählt, dass die Modellantwort mit den temperaturabhängigen mechanischen Eigenschaften des Betons übereinstimmt [5].

Die Permeabilität und Porosität sind Parameter, die die Transportprozesse in Beton steuern und die von der Schädigung stark abhängig sind. Um dies im Modell zu berücksichtigen, werden diese Parameter als dehnungsabhängig angenommen [3].

Um die finiten Dehnungen zu berücksichtigen, werden der Cauchy'sche Spannungstensor und die Green-Lagrange-Formulierung des Dehnungstensors im Microplane-Modell eingesetzt. Die Formulierung der finiten Dehnungen ist notwendig, um den Einfluss der geometrischen Instabilitäten (Stauchung) der oberflächennahen Schicht auf die explosive Abplatzungen der Betondeckung zu untersuchen. Die Objektivität des mechanischen Teils der Analyse ist durch die Anwendung der Rissband-Methode gewährleistet.

In der FE Analyse sind die mechanischen und nichtmechanischen Teile des Modells getrennt behandelt, jedoch sind in jedem

strains are then used to calculate the effective stresses increments  $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$  (stress in solid phase of concrete matrix) and macroscopic stresses increments  $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$  from the microplane constitutive law [3] and [5]:

$$(8)$$

in which  $\mathbf{D}$  = tangent material stiffness tensor obtained from the microplane model,  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^m$  = increment of the mechanical strain tensor and  $\dot{\boldsymbol{\sigma}}^p$  = increment of pore pressure, which is calculated from the increment of volumetric pore pressure  $\dot{\boldsymbol{\sigma}}^v = n \cdot \dot{p}$ , with  $\dot{p}$  = increment of pore pressure. The internal parameters of the microplane model are modified such that the macroscopic response of the model fits temperature dependent mechanical properties of concrete [5].

It is known that permeability and porosity of concrete are relevant parameters that control transport processes in concrete. On the other hand, both porosity and permeability increase for a higher level of damage. To account for this, permeability and porosity of concrete are assumed to be strain dependent [3].

To account for finite strains the co-rotational stress tensor together with Green-Lagrange finite strain tensor are used in the formulation of microplane model. The finite strain formulation is needed in order to investigate the influence of the geometrical instabilities (buckling) of a concrete layer on the explosive type of spalling of concrete cover. The objectivity of the mechanical part of the analysis with respect to size of the finite element is assured by the crack band method.

In the finite element analysis the mechanical and non-mechanical parts of the model are treated separately, however, in every time

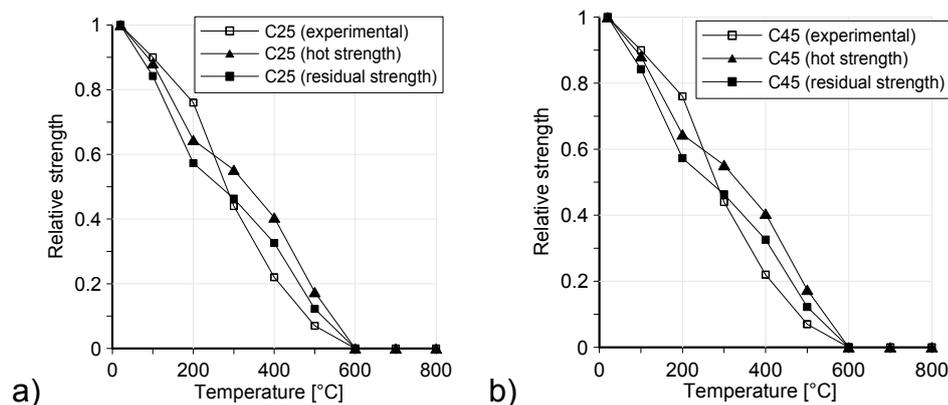
Zeit-/Lastschritt die relevanten Variablen, die die Modellantwort beeinflussen, kontinuierlich aktualisiert. Auf diese Weise ist die Kopplung der beiden Teile des Modells gewährleistet.

## ANWENDUNGSBEISPIELE

### Biegezugfestigkeit des Betons

Das oben beschriebene Modell wurde für die Untersuchung des Einflusses der Temperatur auf die Biegezugfestigkeit angewendet. Die numerischen Ergebnisse wurden mit den Versuchsergebnissen [6] verglichen.

Die Balken (500x100x100 mm) wurden als Proben verwendet. Die Betonklassen C25 bis C45 wurden untersucht. Die Proben wurden von 100 °C bis auf 600 °C in 100 °C-Schritten geheizt. Biegezugfestigkeit wurde bei jeder Temperaturstufe sowohl an heißen („hot“ strength) als auch an abgekühlten Proben („residual“ strength) ermittelt. Abbildung 1. zeigt den Abfall der Biegezugfestigkeit mit der Temperatur. Es ist ersichtlich, dass die numerischen Ergebnisse mit den Versuchsergebnissen gut übereinstimmen.



**Fig. 1:** Temperature dependent flexural of concrete beams: (a) C25 and (b) C45

**Abb. 1:** Temperaturabhängige Biegezugfestigkeit der Betonbalken: (a) C25 und (b) C45

### Bewehrte Betonbalken

Die Versuche [7] an einfach gelagerten bewehrten Biegebalken sind numerisch nachgerechnet. In Abbildung 2. sind Versuchsaufbau, Geometrie und Belastung dargestellt. Die folgenden Betoneigenschaften wurden

(load) step the relevant state variables that control model response are continuously updated. In this way the interaction between both parts of the model is implicitly accounted for.

## APPLICATIONS OF THE MODEL

### Flexural strength of plain concrete beam

Loss of flexural strength of concrete due to exposure to elevated temperatures is investigated using the above discussed model. The numerical results are compared with experimental data [6].

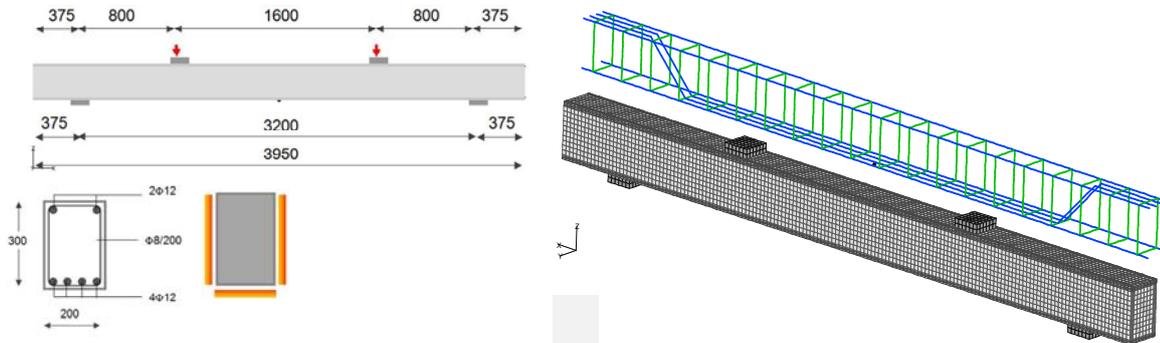
Simply supported beams (500x100x100 mm) are used as specimens. Concrete grades ranging from C25 to C45 were used. The specimens were heated from 100°C to 600°C in steps of 100°C. Flexural strength for each temperature range is investigated on both hot specimens (“hot” strength) and specimens cooled down to room temperature (“residual” strength). The decrease of flexural strength as a function of temperature for two concrete qualities is summarized in Figure 1. The numerical prediction is in good agreement with experimental data.

### Reinforced concrete beams

The experiments performed by Kumar and Kumar [7] on simply supported RC beams are numerically simulated. The test setup of the investigated beams, geometry and loading are shown in Figure 2. The concrete

angenommen:  $E=19600$  MPa,  $f_{c,cyl}=17.1$  MPa,  $f_t= 2.0$  MPa and  $G_f= 0.10$  N/mm. Die Streckgrenze der Bewehrung wurde mit 480 MPa und die Festigkeit mit 550 MPa angenommen. Die Proben wurden einer 3-seitigen Temperaturbeanspruchung nach ISO 834 ausgesetzt.

properties are:  $E=19600$  MPa,  $f_{c,cyl}=17.1$  MPa,  $f_t= 2.0$  MPa and  $G_f= 0.10$  N/mm. The reinforcement yield stress and strength are 480 MPa and 550 MPa, respectively. Fire tests are performed on the beams by subjecting them to three sided temperature loads according to the ISO 834 curve.



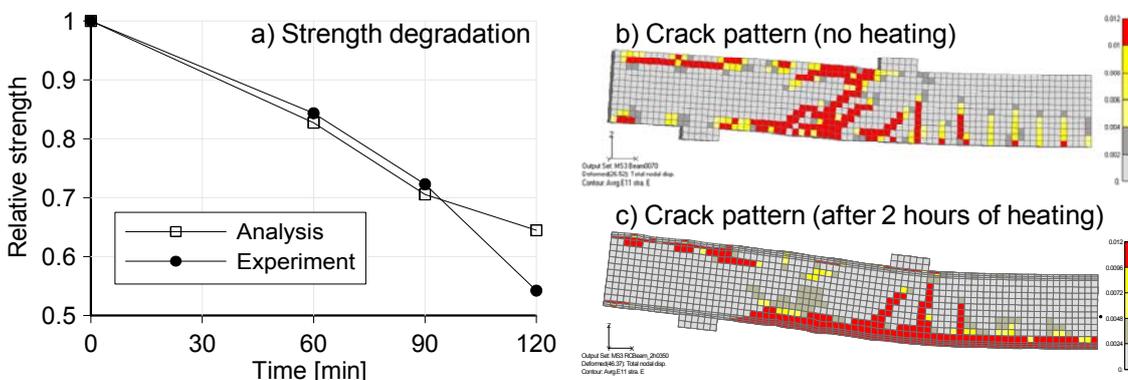
**Fig. 2:** Geometry of the test specimen, FE discretization and heating condition  
**Abb. 2:** Geometrie der Proben, FE Diskretisierung und Temperaturbeanspruchung

Es wurden jeweils unterschiedliche Proben nach 1, 1.5 und 2 Stunden Temperaturbeanspruchung abgekühlt und durch die 4-Punkt-Biegung belastet.

Different specimens are tested after 1 hour, 1.5 hours and 2 hours of fire exposure. The heated specimens are cooled and loaded in four point bending.

Die Rissbildung und der Abfall des Widerstands sind in Abbildung 3. dargestellt. Die temperaturbeanspruchten Proben weisen Schädigungen in der Bewehrung-Beton Kontaktzone, wodurch der Widerstand des Balkens beeinträchtigt wird. Die numerisch berechneten Widerstände stimmen mit den Versuchsergebnissen gut überein. Nach 2 Stunden Temperaturbeanspruchung ist der Widerstand des Balkens um ca. 40% vermindert.

The crack patterns and ultimate load reduction are shown in Figure 3. In case of failure of heated beam there is damage in the reinforcement-concrete interface, which significantly reduces shear capacity of the beam. There is good agreement between numerical and experimental residual resistance. The beam shear capacity after exposure of 2 hours is reduced by approximately 40%.



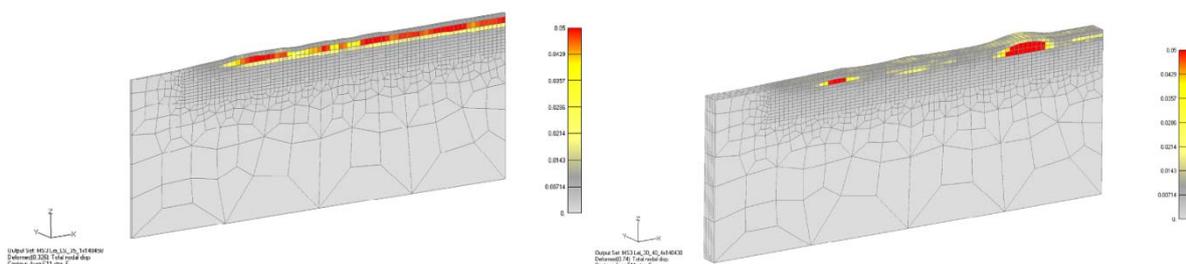
**Fig. 3:** Degradation of resistance and failure modes – no thermal load (up), after 2 hours of heating (down)  
**Abb. 3:** Abfall des Widerstands und Versagensmechanismen – ohne thermische Beanspruchung (oben), nach 2 Stunden der thermischen Beanspruchung (unten)

## Explosive Abplatzungen des Hochleistungsbetons (HSC)

In Rahmen des DFG Forschungsprojekts [8] wurden experimentelle und numerische Untersuchungen über explosive Abplatzungen von Hochleistungsbeton mit und ohne Zugabe von Polypropylenfasern durchgeführt. Das oben beschriebene Modell wurde für die numerischen Simulationen des Verhaltens verwendet und es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den numerischen und experimentellen Ergebnissen.

Hier wurde nur auf den Einfluss der unterschiedlichen Inhomogenitäten auf das explosive Verhalten eingegangen. Explosive Abplatzungen stellen lokale Phänomene dar und deswegen müssen die lokalen geometrischen, Material- und Beanspruchungseigenschaften und deren Variation als relevant betrachtet werden. Folgende Einflüsse wurden untersucht: (i) Homogenität des Materials und des Temperaturfeldes, (ii) Homogenität des Materials und Inhomogenität des Temperaturfeldes, (iii) Inhomogenität des diskret modellierten Materials mit einer uniformen Temperaturbeanspruchung an der Oberfläche, (iv) wie (iii) mit einer unterschiedlichen Anordnung der Zuschlagkörner.

Abbildung 4. gibt die explosionsartigen Versagensmechanismen in Bezug auf die max. Hauptzugdehnungen wieder: (i) Die Schädigung über die ganze Oberfläche - nicht realistisch. (ii) Die Abplatzungen an den Stellen der erhöhten Temperatur. (iii) und (iv) Der Kontakt Zuschlag-Zementstein versagt. Ein deutlicher Einfluss der Inhomogenitäten auf das explosionsartige Verhalten ist zu erkennen.

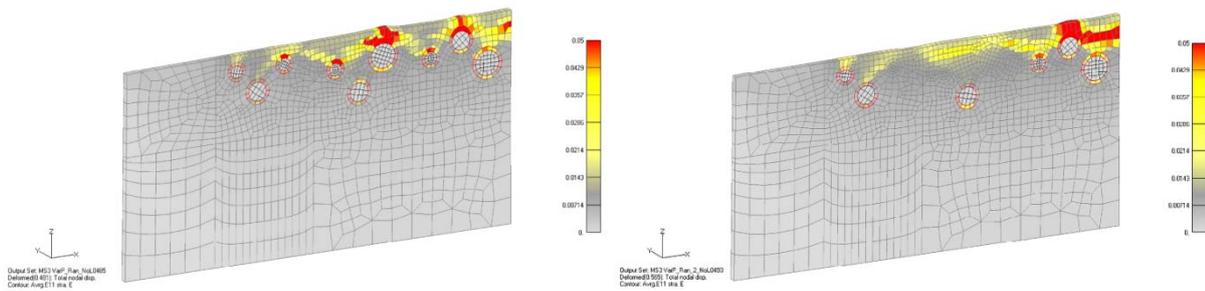


## Explosive spalling of high strength concrete (HSC)

In the framework of DFG research project [8] the experimental and numerical studies of explosive spalling of HSC with and without addition of polypropylene are carried out. The above discussed model was used for numerical simulation of these experiments. Numerical results confirm experimental results.

Here are discussed only results related to the influence of different kind of inhomogenities on explosive spalling. It is important to note that explosive spalling of concrete is a local phenomena and therefore local material, geometrical and loading (heating) properties, i.e. their variation in space, must be relevant. Here are elaborated results of the following cases: (i) homogeneity of the material and heating field; (ii) homogeneity of the material and inhomogeneity of heating field; (iii) inhomogeneity of the material which is modeled in discrete sense. Heating field at the surface of the specimen is assumed to be uniform; (iv) The same as (iii) accept with different distribution of aggregate pieces.

Figure 4. provides spalling failure modes in terms of maximal principal strains. In case (i) splitting crack localizes over the entire heated surface of the specimen, what is not realistic. In case (ii) the explosive spalling localizes only on the domain of the surface with slightly higher surface heating. In cases (iii) and (iv) spalling initiates on the aggregate-mortar interface. Obviously, the results indicate strong influence of local conditions on explosive spalling.



**Fig. 4:** Spalling failure modes in terms of maximal principal strain  
**Abb. 4:** Explosive Versagensmechanismen in Bezug auf Hauptzugdehnungen

### Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass das dargestellte thermo-hygro-mechanische Modell den Abfall des Widerstands infolge erhöhter Temperaturen realistisch vorhersagen kann.

Die explosionsartigen Abplatzungen sind lokale Phänomene, und deshalb stellt die Variation der lokalen Eigenschaften (Material, Geometrie, Temperatur) einen wichtigen Einfluss auf das explosive Verhalten dar.

Die Einflüsse der Inhomogenitäten müssen in Zukunft in Detail untersucht werden.

### Summary

It is demonstrated that the presented thermo-hygro-mechanical model is able to realistically predict degradation of resistance of concrete beams exposed to high temperature.

The explosive spalling of concrete is a local phenomenon, and therefore the variation of local material, geometrical and loading (heating) properties must have significant effect on the explosive spalling.

The effects of inhomogeneity should be in future investigated in more detail.

### Literatur / References

- [1] **Schneider, U.(1986):** Properties of Materials at High Temperatures, Concrete, 2nd. Edition, RILEM Technical Comitee 44-PHT, Technical University of Kassel, Kassel, 1986.
- [2] **Bazant, Z.P. and Kaplan, M.F.(1996):** Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models, Harlow, Longman,1996.
- [3] **Ožbolt, J., Periškić, G., Reinhardt, H.-W. and Eligehausen, R.,** 'Numerical analysis of spalling of concrete cover at high temperature', Computers and Concrete, **5**(4) (2008) 279-293.
- [4] **Bazant, Z.P. and Thonguthai W.,** 'Pore pressure and drying concrete at high temperature', ASCE J. of Eng. Mech., **104** (1978) 1059-1079.
- [5] **Ožbolt, J., Kožar, I., Eligehausen, R. and Periškić, G.,** 'Three-dimensional FE analysis of headed stud anchors exposed to fire', Comp. and Conc., **2**( 4) (2005) 249-266.
- [6] **Yaragal, S.C., Narayan, K. S. B., Venkataramana, K., Kulkarni, K.S., Gowda, H C C, Reddy, G R and Sharma, A.,** 'Studies on Normal Strength Concrete Cubes Subjected to Elevated Temperatures', Journal of Structural Fire Engineering, **1**(4) (2010) 249-262.
- [7] **Kumar, A. and Kumar, V.,** 'Behaviour of RCC Beams after Exposure to Elevated Temperatures', IEI Journal, 84 (2003) 165-170.
- [8] **DFG project (2010),** Explosive Abplatzung von Beton unter Brandbeanspruchung, AOBJ: 575356, (2010).

## MODELLIERUNG DES VERSAGENS VON BETON BEI HOHEN BELASTUNGSRATEN UND IMPACT

### MODELING OF CONCRETE FAILURE AT HIGH LOADING RATES AND IMPACT

von/by: Joško Ožbolt, Akanshu Sharma<sup>1)</sup>, Vanja Travaš<sup>2)</sup> & Hans-Wolf Reinhardt

<sup>1)</sup>BARC Bhaba Atomic Research Center, Mumbai

<sup>2)</sup>Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka

#### Zusammenfassung

Beton verhält sich bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten anders als bei quasi-statischen Belastungen [1]. Zum einen gibt es den Einfluss von Dehnungsraten auf die Festigkeit, Steifigkeit und Duktilität und zum anderen werden die Trägheitskräfte aktiviert. Die beiden Effekte können in den Versuchen klar identifiziert werden. Der Schwerpunkt in dem vorliegenden Bericht ist die numerische Simulation. Als konstitutives Gesetz wird das s.g. "Microplane" Modell (MPM) eingesetzt. Der Einfluss von Dehnungsraten wird im Rahmen der Theorie der Energieaktivierung bei der Rissbildung formuliert. Die Trägheitskräfte werden automatisch durch die dynamische Analyse berücksichtigt. Anhand von drei Beispielen wird gezeigt, dass der Widerstand, die Bruchart und die Rissgeschwindigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit abhängen.

#### Einleitung

Die Belastungsgeschwindigkeit beeinflusst das Bauteilverhalten durch drei Effekte [2,3]: (1) Aufgrund des zeitabhängigen Wachstums von Mikrorissen, (2) durch das viskose Verhalten des Betons zwischen den Rissen und (3) aufgrund von Trägheitskräften. Prinzipiell sind diese drei Effekte immer vorhanden, jedoch ist in Abhängigkeit vom Werkstoff und der Belastungsgeschwindigkeit der erste, zweite oder der dritte Einfluss vorherrschend. Die ersten zwei Einflüsse können mit dem Konstitutiven Gesetz berücksichtigt werden. Der dritte Einfluss soll in dynamischer Analyse durch die Interaktion zwischen dem konstitutiven Gesetz und den

#### Abstract

Concrete acts on impact loading in a different way as compared with static loading [1]. First, there is a strain-rate influence on strength, stiffness, and ductility, and, second, there are inertia forces activated. Both influences are clearly demonstrated in experiments. The paper focuses on finite-element simulations. The microplane model is used as a constitutive law for concrete. The strain-rate influence is captured by the activation energy theory. Inertia forces are implicitly accounted for through dynamic finite element analysis. Three examples demonstrate the impact behavior and are discussed. It is shown that the resistance, failure mode and crack propagation depend on loading rate.

#### Introduction

The response of structures depends on time dependent loading through three different effects [2,3]: (1) through the rate dependency of the growing microcracks (influence of inertia at the micro-crack level), (2) through the viscous behavior of the bulk material between the cracks (creep of concrete or viscosity due to the water content) and (3) through the influence of structural inertia forces, which can significantly change the state of stresses and strains of the material. The first two effects can be accounted for by the constitutive law and the third effect should be principally automatically accounted for through dynamic analysis where

Trägheitskräften automatisch berücksichtigt werden. Im Fall von Beton, als quasi-sprödes Material, dominieren die erste zwei Einflüsse für mittlere und hohe Belastungsgeschwindigkeiten. Der Einfluss der Trägheitskräfte dominiert bei sehr schnellen, explosionsartigen Belastungen [2,3].

Die experimentellen, theoretischen und numerischen Untersuchungen zeigen, dass sich bei extrem schnellen Belastungen (z.B. Explosion) nicht nur das mechanische Verhalten des Betons, sondern auch die Versagensart ändert [2,3]. Diesbezüglich gibt es zwei Phänomene: Erstens die maximale Rissgeschwindigkeit (Rayleigh-Wellen Geschwindigkeit) kann in der Praxis nicht erreicht werden [2,3,4,5]. Die numerischen Untersuchungen zeigen, dass in normalfestem Beton maximale Rissgeschwindigkeiten von rd. 600 m/s erreicht werden können. Nach dem Erreichen dieser kritischen Geschwindigkeit tritt die Verzweigung des Risses auf und die Rissgeschwindigkeit nimmt ab. Das zweite Phänomen, das durch die experimentellen und numerischen Untersuchungen bestätigt wurde, ist die Tatsache, dass sich bei verschiedenen Problemen (z.B. einachsiger Zug, Biegung oder Ausziehen von Kopfbolzen aus Beton) mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit die Mode-I Bruchart in die Schubbruchart ändert. Der Grund für die beiden Phänomene ist in den Trägheitskräften begründet [3].

### **Das Verhalten von Bauteilen aus Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten**

Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Bruchverhalten von Betonbauteilen ist an Hand von drei Beispielen illustriert: (1) sog. „Compact Tension Specimen“ (CTS), (2) Dreipunktbiegebalken und (3) Eindringen von Bolzen in einen Betonblock. In der numerischen FE Untersuchung werden der Green-Lagrangesche Dehnungstensor und der sog. „co-rotational“ Spannungstensor

the constitutive law interacts with structural inertia forces. Depending on the material type and the loading rate, the first, second or third effect may dominate. For quasi-brittle materials, such as concrete, which exhibit cracking and damage phenomena, the first two effects are important for relatively low and medium strain rates. However, for higher strain rates (impact) the last effect dominates [2,3].

Theoretical, experimental and numerical studies show that the failure mode, crack pattern and velocity of the crack propagation are influenced by loading rate [2,3,4,5]. Principally, with increase of loading rate failure mode tends to change from mode-I to mixed mode. Responsible for this are inertia forces which homogenize material in the impact zone and force damage (crack) to move away from the zone of high inertia forces. Therefore, there is a change of mode-I fracture to mixed mode. Moreover, when crack starts to propagate relatively fast, inertia forces at the crack tip tends to prevent crack propagation. Consequently, single crack split into two inclined cracks (branching). This happens when crack velocity reaches the critical velocity of approximately 500 to 600 m/s. It is interesting to observe that after crack branches, the crack speed drops down and theoretical Rayleigh wave speed cannot be reached [3].

### **Behavior of concrete members under impact load**

The influence of loading rate on failure load and failure mode is here demonstrated on three numerical examples: (1) Compact tension specimen, (2) Plain concrete beam and (3) Penetration of steel-nail into a concrete block. In numerical finite element analysis as a strain measure Green-Lagrange strain tensor and co-rotational stress tensor are used. As a constitutive law rate dependent

benutzt. Als konstitutives Gesetz wurde das Microplane Model eingesetzt [6]. Der Einfluss von Dehnungsraten wird im Rahmen der Theorie der Energieaktivierung formuliert [7]. In dem ersten Beispiel wird in der FE Analyse die "Total Lagrange" Formulierung benutzt. In den letzten zwei Beispielen wird die „Update Lagrange“ Methode mit der Berücksichtigung vom Kontakt zwischen dem Balken und Hammer bzw. dem Bolzen und Betonblock eingesetzt. In der Analyse werden vier-knotige räumliche FE benutzt.

### CTS Versuchskörper

CTS Versuchskörper werden in Materialwissenschaft oft benutzt um Brucheigenschaften des Betons zu bestimmen. Zur Untersuchung des Verhaltens der CTS Proben aus normalfesten Beton bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten wurde eine 3D FE Analyse durchgeführt [3]. Die Geometrie, Randbedingungen und FE Netz sind in Abb. 1a dargestellt. Die Belastung wird durch die Kontrolle der Verschiebung an der Kerbe aufgebracht. Zuerst wurde die quasi-statische Analyse durchgeführt. Anschließend wurde die dynamische Analyse mit den folgenden Verschiebungsraten:  $\Delta/dt = 10, 100, 500, 1000, 2500, 5000$  und  $10000$  mm/s durchgeführt.

Das Bild 1b zeigt die Abhängigkeit zwischen der maximalen Last und der Belastungsgeschwindigkeit. Bis zur Belastungsgeschwindigkeit von etwa 10 mm/sec zeigt sich eine moderate Zunahme der Tragfähigkeit. Für die höheren Belastungsgeschwindigkeiten deutet sich eine progressive Zunahme des Widerstandes an. Der Grund dafür sind die Trägheitskräfte die bei höheren Verschiebungsgeschwindigkeiten das Verhalten des Probekörpers bestimmen. Um das zu bestätigen wurden zwei Reihen der Berechnungen durchgeführt: (i) Dehnungsraten abhängige statische Analyse und (ii) Dehnungsraten unabhängige dynamische Analyse. Die Er-

microplane model for concrete is used [6]. The rate dependency at the constitutive level is accounted for using rate process theory [7]. In the first example the total Lagrange formulation is used. The last two examples are calculated based on the Update Lagrange formulation with accounting for the contact between two solids, beam-hammer and nail-concrete block, respectively. The analysis is carried out by the use of four-node solid finite elements.

### Compact tension specimen

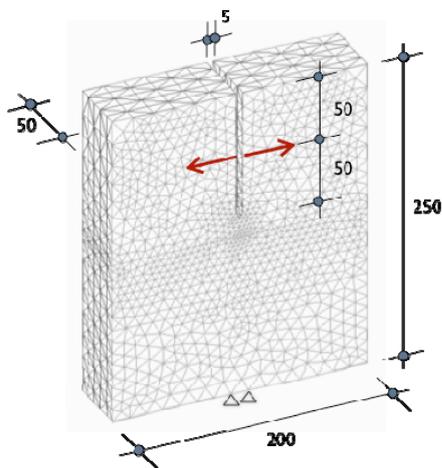
Compact tension specimen is frequently used in the material science to measure fracture properties of concrete and other materials. To demonstrate the effects of loading rate, 3D transient finite element analysis is carried out for normal strength concrete [3]. The geometry, boundary conditions and FE mesh of the specimen are shown in Fig. 1a. The load is applied by controlling horizontal displacement of the notch. The specimen is first analyzed assuming quasi-static loading condition. Subsequently, dynamic analysis is carried out with the following displacement rates:  $\Delta/dt = 10, 100, 500, 1000, 2500, 5000$  and  $10000$  mm/s.

Peak load measured relative to the quasi-static resistance is plotted as a function of displacement rate in Fig. 1b. Up to the displacement rate of 10 mm/sec there is relatively low increase of resistance with increase of displacement rate. However, for higher displacement rates there is progressive increase of resistance. This is due to structural inertia forces, which have in case of higher displacement rates a major influence on structural resistance. To confirm this, two additional series of analysis are carried out, i.e. static analysis with rate sensitivity and dynamic analysis without rate sensitivity. The results are summarized in Fig. 1b for displacement rate up to 2.5

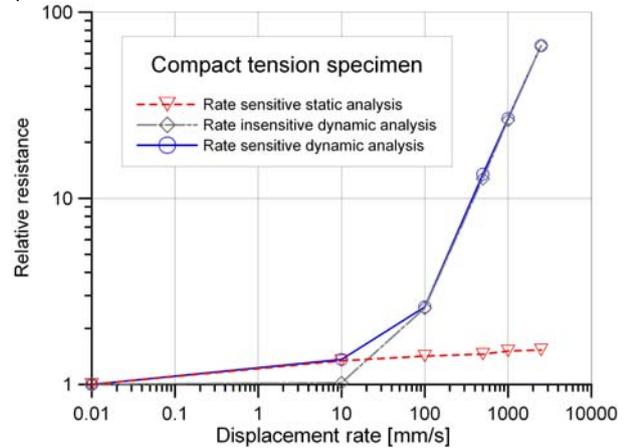
gebnisse sind auch in Abb. 1b dargestellt. Wie aus dem Bild 1b zu entnehmen ist, kontrolliert bei moderaten Belastungsgeschwindigkeiten die Dehnungsrate den Widerstand, und der Einfluss von den Trägheitskräften ist vernachlässigbar. Bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten dominieren Trägheitskräfte. Es zeigt sich, dass im log-log Maßstab der Widerstand linear mit zunehmender Dehnungsrate steigt.

m/sec. The comparison of results shows that for displacement rate up to 10 mm/sec strain rate controls the response, however, for higher displacement rates structural inertia dominates and strain rate has much less influence on the total resistance. The results of static rate sensitive analysis show that the resistance increases as a linear function of displacement rate (log-log scale).

(a)



(b)

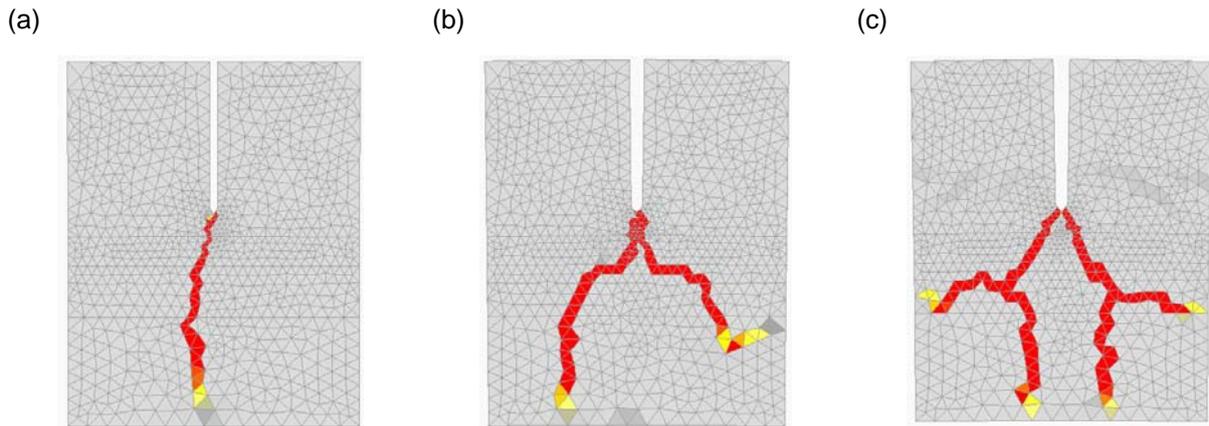


**Abbildung 1:** (a) Geometrie des CTS Probekörper (in mm), FE Diskretisierung und Randbedingungen (b) Die relative Tragfähigkeit als Funktion der Belastungsgeschwindigkeit

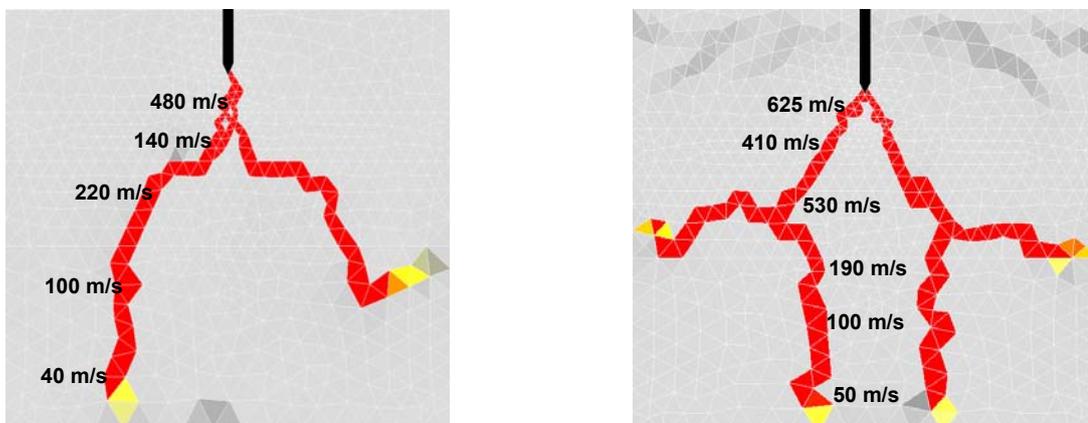
**Figure 1:** (a) Geometry of the compact tension specimen (in mm), finite element mesh, loading (displacement control) and boundary conditions (b) Relative resistance as a function of loading rate

In Abb. 2 sind für drei Verschiebungsgeschwindigkeiten die Risse (Hauptzugdehnungen) dargestellt. Für quasistatische Belastung sowie für moderate Verschiebungsgeschwindigkeiten bis etwa 100 mm/s zeigt sich nur ein Mode-I Riss. Jedoch zeigt sich bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten ( $\Delta/dt > 0.5$  m/s) das Phänomen der Rissverzweigung mit der komplexen Mixed-Mode Bruchart. Der Grund für die Änderung der Rissbildung sind die Trägheitskräfte. Falls die kritische Rissgeschwindigkeit von etwa 500 bis 600 m/s erreicht wird gibt es die Rissverzweigung (siehe Bild. 3). Die theoretische Rayleigh-Wellen Geschwindigkeit kann nicht erreicht werden.

In Fig. 2 are shown predicted crack patterns in terms of maximal principal strains. It can be seen that for quasi-static load and for relatively low displacement rates (up to 100 mm/s) there is a single mode-I crack. However, for higher displacement rates ( $\Delta/dt > 0.5$  m/s) there is a branching of the crack and multiple cracking. Obviously, for higher displacement rate there is a cluster of multiple cracks with rather complex mixed failure mode. Responsible for the change of the failure mode are structural inertia forces. When crack velocity reaches the critical velocity of approximately 500 to 600 m/s crack branching is observed (see Fig. 3). The theoretical Rayleigh wave speed cannot be reached.



**Abbildung 2:** Brucharten: (a) quasi-statische Analyse (b)  $\Delta/dt = 1.0$  m/s (c)  $\Delta/dt = 2.5$  m/s  
**Figure 2:** Failure modes: (a) quasi static analysis (b)  $\Delta/dt = 1.0$  m/s (c)  $\Delta/dt = 2.5$  m/s



**Abbildung 3:** Rissgeschwindigkeit für: (a)  $\Delta/dt = 1.0$  m/s (b)  $\Delta/dt = 2.5$  m/s  
**Figure 3:** Crack speed for different displacement rates: (a)  $\Delta/dt = 1.0$  m/s (b)  $\Delta/dt = 2.5$  m/s

### Biegebalken aus Beton

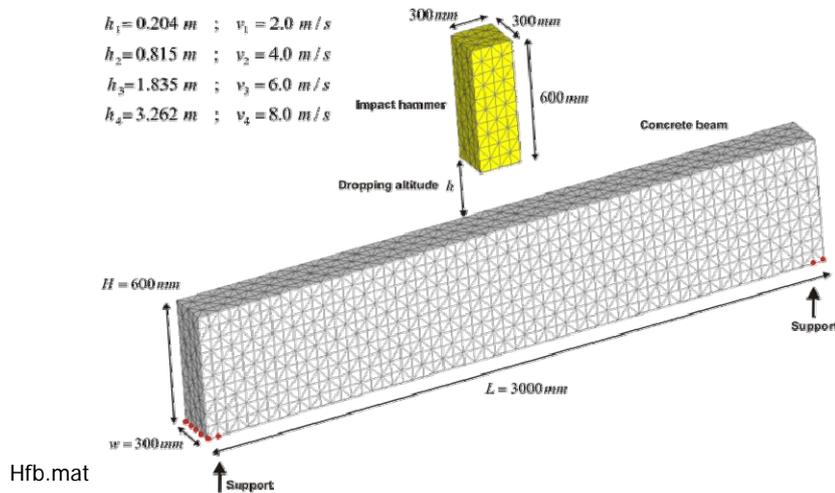
Die Versuche an Biegebalken aus Beton unter Drei-Punkt Biegebelastung zeigen, dass die Tragfähigkeit und Sprödigkeit des Balkens mit zunehmender Aufprallgeschwindigkeit zunehmen. Weiterhin ändert sich mit zunehmender Aufprallgeschwindigkeit die Versagensart von Biege- zur Schub-Versagensart. Das Verhalten von Biegebalken aus normal festen Beton wurde untersucht [5]. Die Mitte des Balkens ist mit dem freifallenden Hammer belastet. Die Geometrie und FE Netz ist in Bild 4 dargestellt. Das Verhalten des Hammers ist als linear-elastisch angenommen. An der Balken-Hammer Kontaktfläche ist ein Reibungskoeffizient von  $\mu = 0.5$  eingesetzt. Die quasi-statische und dynamische FE Analyse wurde durchgeführt.

### Plain concrete beam

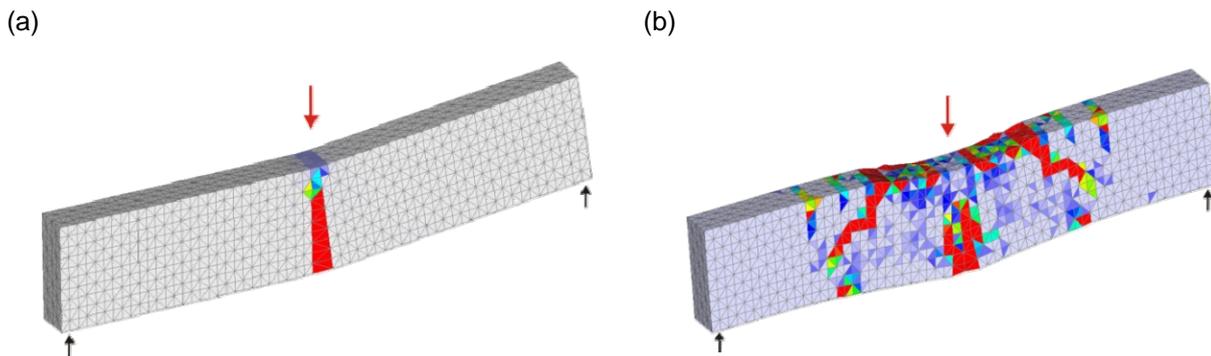
Experimental tests on plain and reinforced concrete beams loaded by three-point bending showed that resistance and brittleness of beams increase with the increase in loading rate. It was shown that for relatively low loading rate the failure is due to bending (mode-I fracture). With increase in loading rate there is a transition of the failure mode from bending to shear. Here is discussed the behavior of a plain concrete beam (normal strength concrete) which is loaded by impact hammer at the mid-span [5]. The geometry and FE mesh is shown in Fig. 4. The behavior of hammer is assumed to be linear elastic. At the beam-hammer contact surface the frictional coefficient  $\mu = 0.5$  is assumed. The numerical analysis is performed for quasi-

In dynamischer Analyse wurden die Aufprallgeschwindigkeit von 2, 4, 6, und 8 m/s eingesetzt.

static loading and for impact loading velocities of 2, 4, 6 and 8 m/s.



**Abbildung 4:** Geometrie des Betonbalkens und Einschlaghammer  
**Figure 4:** Geometry of the plain concrete beam and impact hammer



**Abbildung 5:** Brucharten: (a) Statische Belastung (b) Einschlaggeschwindigkeit 8 m/s  
**Figure 5:** Failure modes for: (a) quasi static loading (b) impact velocity of 8 m/s

Bild 5 zeigt die berechneten Rissbildungen (Hauptzugdehnung). Für quasi-statische Belastungen sowie für Aufprallgeschwindigkeiten bis zu 6 m/s zeigt sich das Biegeversagen. Für höhere Aufprallgeschwindigkeiten geht das Biegeversagen (siehe Abb. 5a) in Schubversagen über (siehe Abb. 5b). Diese Ergebnisse werden auch in den experimentellen Untersuchungen bestätigt.

Figure 5 shows predicted crack pattern in terms of maximal principal strains. For quasi-static load and impact velocities up to 6 m/s mode-I fracture (bending failure) is predicted (see Fig. 5a). However, for higher impact velocities there is shear failure mode (see Fig. 5b). Similar results were obtained by experimental investigations.

### Eindringen des Bolzens in Betonblock

In dem dritten Beispiel wird die Simulation des Eindringens eines Bolzens in einen Betonblock simuliert. Im Vergleich zu den ers-

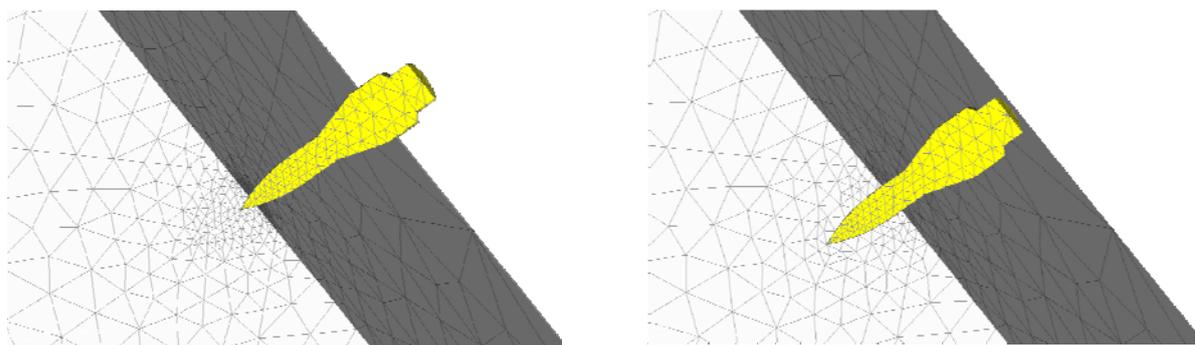
### Steel-nail penetration into concrete

In the third numerical example it is demonstrated the problem of penetration of steel-nail into a concrete block. In contrast to the

ten zwei Beispielen ist hier die Aufprallgeschwindigkeit relativ groß. Aus dem Grund wird der Einfluss der Dehnungsraten relativ gering, da in solchen Fällen die Trägheitskräfte das Verhalten bestimmen. Außerdem wird in diesem Beispiel sowohl der Kontakt zwischen dem eindringenden Bolzen und dem Beton als auch die ständige Anpassung des FE Netzes an die Geometrie („remeshing“) durchgeführt. Die Analyse wurde an dem Betonblock mit Abmessungen von 500 x 500 x 500 mm durchgeführt. Die Belastung wurde durch die kinetische Energie des Bolzens mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 150 m/s aufgebracht. Das Verhalten des Bolzens ist linear-elastisch angenommen. Bild 6 zeigt zwei Zustände des Eindringens des Bolzens in den Betonblock. In Vergleich zu den ersten zwei Beispielen, lokalisiert sich hier die Schädigung des Betons in relativ engem Bereich um den Bolzen. Aus dem Grund ist der Einfluss der Dehnungsrate auf das Materialverhalten im Vergleich zum Einfluss der Trägheitskräfte und der Reibung zwischen Beton und Bolzen vernachlässigbar.

previous examples, here is the impact velocity relatively high. Consequently, the effect of strain rate is less important because inertia forces dominate. From the numerical point of view, besides solving the contact between steel-nail and concrete block, continuous remeshing is required. The analysis is performed for a concrete block of dimensions 500 x 500 x 500 mm. The load is applied through the kinetic energy of anchor. The mechanical behavior of anchor is assumed to be linear elastic. On the concrete block-anchor contact surface, the frictional coefficient  $\mu = 0.5$  is assumed. The numerical analysis is carried out for nail impact velocity of 150 m/s.

Figure 6 shows two sequences of the anchor penetration history. In contrast to previous two examples, in the penetration problem damage is localized in a relative small volume of the material. Consequently, rate sensitivity at the material constitutive level is much less important than inertia and contact forces.



**Abbildung 6:** Zustände des Eindringens des Stahlbolzens in einen Betonblock  
**Figure 6:** Sequences of steal anchor penetration into a concrete block

### Zusammenfassung

Die numerischen Beispiele zeigen, dass das am IWB entwickelte 3D Modell, das auf Dehnungsraten abhängigen Microplane Modell basiert, in der Lage ist das Belastungs-

### Summary

The numerical examples have shown that the used 3D model, which is based on the rate sensitive microplane model, can capture the rate dependent behavior of concrete very

geschwindigkeit abhängige Verhalten des Betons realistisch vorherzusagen. In Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit gibt es Mode-I Rissbildung (moderate Belastungsgeschwindigkeit) oder Schubversagen (sehr schnelle Belastung).

Falls die Belastungsgeschwindigkeit sehr hoch ist (Eindringen des Bolzens in Betonblock) dominieren die Trägheitskräfte. Bei moderaten Belastungsgeschwindigkeiten bestimmt das Dehnungsraten abhängige Verhalten des Betons das Verhalten.

Es wurde gezeigt, dass die theoretische Rissgeschwindigkeit (Rayleigh-Wellen Geschwindigkeit) nicht erreicht werden kann. Wenn die Rissgeschwindigkeit die kritische Geschwindigkeit von etwa 500 bis 600 m/s erreicht findet die Rissverzweigung statt.

well. Depending on the loading rate, the cracks develop either in a mode-I type (moderate loading rate) or they modify to a mixed mode type (high loading rate).

When the loading rate is very high (steel-nail penetration) the inertia influences the result at most while, with moderate loading rate, the strain-rate influence dominates.

It is demonstrated that the theoretical speed of crack propagation (Rayleigh wave) cannot be reached. Instead, if the velocity of crack propagation reaches the critical speed of approximately 500 to 600 m/s there is crack branching.

#### Literatur / References

- [1] **Bischoff, P. and Perry, S. (1991):** Compressive behavior of concrete at high strain rates, *Mat. and Struct.*, 24, S. 425-450.
- [2] **Ožbolt, J., Rah, K. K. and Mestrovic, D. (2006):** Influence of loading rate on concrete cone failure, *International Journal of Fracture* 139, S. 239–252.
- [3] **Ožbolt, J., Sharma, A., and Reinhardt, H. W., (2011):** Dynamic fracture of concrete – compact tension specimen, *International Journal of Solids and Structures*, 48, S. 1534-1543.
- [4] **Freund, L. B. (1972):** Crack Propagation in an Elastic Solid Subjected to General Loading-I. Constant Rate of Extension, *J. Mech. Phys. Solids*, 20, S. 129-140.
- [5] **Travaš, V., Ožbolt, J., Kožar, I. (2009):** Failure of plain concrete beam at impact load: 3D finite element analysis, *International Journal of Fracture*, 160, S. 31-41.
- [6] **Ožbolt, J., Li, Y. and Kožar, I. (2001):** Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint, *International Journal of Solid and Structures*, 38, S. 2683-2711.
- [7] **Krausz, A. S. and Krausz, K. (1988):** *Fracture kinetics of crack growth*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.

## VERHALTEN VON BEFESTIGUNGEN UNTER ZUGLAST UND BRANDBEANSPRUCHUNG BEHAVIOR OF FASTENINGS UNDER TENSILE LOAD AND FIRE

von/by: Goran Periškić & Joško Ožbolt

### Zusammenfassung

Im vorliegenden Aufsatz werden Ergebnisse der 3D FE Untersuchung von Kopfbolzen unter Brandeinfluss dargestellt. Das Verhalten von Beton unter Brandbedingungen wird mit einem thermo-mechanischen Modell simuliert [4,5,6]. In der parametrischen FE-Analyse der Kopfbolzen unter Zuglast werden Verankerungstiefe, Branddauer, Randeinfluss und Anzahl der erhitzten Oberflächen variiert. Bei Gruppenbefestigungen wird der Einfluss der Verankerungstiefe, des Ankerabstandes und der Branddauer untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass bei Einzelbefestigungen die relative Resttragfähigkeit der Befestigung hauptsächlich von der Verankerungstiefe und der Brandbeanspruchungszeit abhängt - z.B. können Kopfbolzen mit einer kleinen Verankerungstiefe unter Gebrauchslast bereits vor 90 Min. Branddauer versagen. Bei kleinen Randabständen und mehrseitiger Erhitzung hängt die Tragfähigkeit zusätzlich vom Randabstand.

### Einleitung

Obwohl Beton nicht brennt, verändern sich seine Eigenschaften, wie Festigkeit, Elastizitätsmodul und Bruchenergie, wesentlich bei der Erhitzung. Bei hohen Temperaturen führen die großen Temperaturgradienten in Betonbauteilen zu last-induzierten Spannungen. Weiterhin spielen das durch die hohen Temperaturen verursachte Kriechen und die Relaxation des Betons eine wichtige Rolle. Der Hauptgrund für das komplexe Verhalten des Betons unter hoher Temperaturbeanspruchung ist die Tatsache, dass der Beton Wasser enthält, dessen Aggregatzustand sich bei erhöhten Temperaturen ändert.

### Abstract

In the present paper the results of 3D FE investigation on headed studs at elevated temperatures are presented. For modeling of concrete under fire conditions a thermo-mechanical model [4,5,6] is used. In the parametric FE analysis of single headed stud anchors loaded in tension, the influence of embedment depth, heating time, edge distance and number of surfaces exposed to heating was investigated. In case of anchor groups the influence of embedment depth, anchor spacing and heating time was examined. The results of the FE analysis show that the resistance of single anchors and anchor groups with large edge distance under fire conditions are primarily dominated by embedment depth. Anchors with small embedment depth are very sensitive to fire and may even fail under design load. In case of small edge distance and multiple sides heating of the concrete body the anchor resistance is additionally affected by edge distance.

### Introduction

Concrete mechanical properties, such as strength, elasticity modulus and fracture energy, are at high temperatures rather different than for concrete at normal temperature. At high temperature large temperature gradients lead in concrete structures to temperature induced stresses which cause damage. Furthermore, creep and relaxation of concrete due to high temperature play also important role. The main reason for the complexity of the behavior of concrete at high temperature is due to the fact that concrete contains water, which changes its aggregate state. Moreover, the aggregate can

Auch im Zuschlag kann es zu Strukturveränderungen kommen oder sein Gewicht kann wegen der Emission von CO<sub>2</sub> reduziert werden (z. B. Kalkstein).

Alle diese Veränderungen der Struktur und der Materialeigenschaften des Betons beeinflussen stark die Tragfähigkeit von den Befestigungen im Beton. Schließt man Stahlversagen durch die Verwendung vom feuerbeständigen Stahl (wie z.B A4- oder HCR-Stahl) aus, erfolgt das Versagen im Beton – entweder durch kegelförmigen Betonausbruch oder durch Herausziehen [2]. Herausziehen des Befestigungsmittels wird hauptsächlich durch die Risse im Beton verursacht, die die Reibung zwischen des Betons und der Befestigung abmindern. Unter Brandbedingungen verursachen große thermische Dehnungen Druckspannungen senkrecht zur Bolzenachse im oberflächennahen Beton, die die Tragfähigkeit auf Herausziehen positiv beeinflussen, daher wird diese Versagensart nicht als kritisch angesehen. Bei großen Verformungen des als Verankerungsgrundes dienenden Bauteils (z.B. Biegung des Balkens) könnte allerdings wegen der fortgeschrittenen Rissentstehung Herausziehen auftreten. Die typische Versagensart bei zugbeanspruchten Befestigungen ist Betonausbruch, der die optimale Ausnutzung des Ankergrundes darstellt. In den bisherigen Versuchen wurde diese Versagensart meistens durch die Auswahl großer Verankerungstiefen ausgeschlossen. Erst die Forschungsversuche [7] haben gezeigt, dass auch Betonausbruch häufig auftreten kann.

Um die Versagensart Betonausbruch unter Brandeinfluss und Zugbelastung näher zu untersuchen kann die numerische Analyse angewendet werden. Somit können komplizierte und vor allem teure Versuche ersetzt werden. Dafür sind jedoch Modelle notwendig, die das Verhalten des Betons unter hohen Temperaturen realistisch beschreiben.

change its structure or it can lose its weight through the emission of CO<sub>2</sub>, such as calcium based stones.

The described changes in material structure and reduction of concrete properties under high temperature have a strong influence on the resistance of fasteners. If steel failure is eliminated by using fire-resistant steel (as for instance A4- or HCR-steel), the failure of the fastener will take place in concrete – either concrete cone or pull-out failure will occur [2]. Pull-out failure of a fastener is mainly caused by cracks in concrete, which reduce the horizontal expansion stresses and consequently the friction between concrete and fastener. Under fire conditions large thermal strains on the surface of the concrete member induce horizontal compressive stresses in concrete, which can positively influence the pull-out resistance. Pull-out failure is therefore mostly critical only when large structural deformations under fire cause appearance of very large cracks. Typical failure mode under tensile load is concrete cone, which optimally exploits concrete tensile capacity. However, this failure mode was eliminated in most fire tests by using large fastener embedment depths or by choosing narrow constrains of the concrete body. The scientific fire tests performed by Reick [7], where practical conditions were realistically simulated, show that concrete failure often can be the critical failure mode.

To investigate the concrete cone failure under tension loading and fire conditions in more detail, numerical analysis can be employed in order to avoid performing complicated and cost-expensive experiments. However, numerical models which are able to realistically describe the behavior of concrete and steel at high temperatures are necessary.

### Numerische Analyse von Kopfbolzen unter hoher Temperatur

In der FE Analyse wurden drei Fälle untersucht: Einzelbefestigungen ohne Randeinfluss (minimaler Randabstand  $c \geq 10h_{ef}$ ), Einzelbefestigungen mit Randeinfluss und Gruppenbefestigungen ohne Randeinfluss. Jeder dieser Fälle wurde mit vier unterschiedlichen Verankerungstiefen berechnet:  $h_{ef} = 50, 100, 150$  und  $200$  mm. Die Anker wurden am Anfang bei normaler Temperatur ( $20^\circ\text{C}$ ) mit der zulässigen Last belastet (Gl. 1). Anschließend wurde auf einer oder mehreren Bauteilseiten Brandfall simuliert. Die Erhitzung erfolgte nach der ETK-Kurve (ISO 833, Gl. 2). Falls kein Versagen der Anker stattfand, wurden die Anker unter Beibehaltung der erreichten Temperatur bis zum Bruch belastet. Folgende Branddauer wurden untersucht: (i) 30 Minuten ETK, (ii) 90 Minuten ETK und (iii) 120 Minuten ETK. Außerdem wurde eine Vergleichsrechnung ohne Brandeinfluss durchgeführt. Detaillierte Beschreibung der FE Diskretisierung sowie der verwendeten Materialeigenschaften kann aus [6] entnommen werden.

Das in der numerischen Analyse verwendete Finite Elemente Modell basiert auf der thermo-mechanischen Kopplung der mechanischen Materialeigenschaften von Beton und der Temperatur. Als konstitutives Gesetz für den Beton wird das „Microplane“ Modell [3] verwendet. Die Modellparameter des ansonsten isothermischen „Microplane“ Modells wurden in Abhängigkeit von der Temperatur formuliert und in ein 3D FE Programm implementiert. Das Kalibrieren des Modells sowie die Überprüfung der Implementierung erfolgten durch Versuchsnachrechnungen. Die Finite Elemente Analyse verläuft in zwei Schritten: zunächst wird für vorgegebene Randbedingungen (Lufttemperatur in der Umgebung und/oder Temperatur auf der Bauteiloberfläche) die Verteilung der Temperatur im Bauteil berechnet; anschlie-

### Numerical analysis of headed studs at high temperature

In the FE analysis three different cases are investigated: single anchors without edge influence (edge distance  $c \geq 10h_{ef}$ ), single anchors close to an edge and anchor groups without edge influence. For each case different embedment depths are analyzed:  $h_{ef} = 50, 100, 150$  and  $200$  mm. The anchors are first loaded with admissible load assuming room temperature of  $20^\circ\text{C}$  (Eq. 1). In the next step the fire at the anchor side of the specimen is simulated. The air heating temperature at the upper specimen side is taken according to ISO 833 (equivalent to DIN 4102 part 2, Eq. 8). If no failure occurs during heating, the anchor is subsequently pulled out from the concrete block for the following load histories: (i) 30 minutes after start of heating, (ii) 90 minutes after start of heating and (iii) 120 minutes after start of heating. For comparison reasons a calculation without heating is also performed. More detailed description of the finite element discretization and used material properties can be found in [6].

$$F_{adm.} = 8 \cdot I \cdot \sqrt{f_{cc}} \cdot h_{ef}^{1.5} / 2.5 \quad (1)$$

$$T_{Air}(t) - T_{Air}(t_0) = 345 \log(8t + 1) \quad (2)$$

Finite element model used in the analysis is based on the thermo-mechanical coupling between mechanical properties of concrete and temperature. The microplane model [3] is used as isothermal constitutive law for concrete whose model parameters are made temperature dependent. The model is implemented into a three-dimensional finite element code and its performance is first compared with experimental results known from the literature. The finite element analysis is performed in two steps. For given temperature boundary conditions (air temperature and/or concrete surface temperature) calculated distribution of temperature is cal-

ßend wird die statische Belastung unter Berücksichtigung der berechneten Temperatur aufgebracht. Eine detaillierte Modellbeschreibung kann in [6] gefunden werden.

### Einzelbefestigungen ohne Randeinfluss

Die Ergebnisse der Untersuchung der Einzelbefestigungen ohne Randeinfluss zeigen, dass die Betonausbruchtragfähigkeit unter Brandeinfluss wesentlich reduziert werden kann. Mit zunehmender Temperatur nehmen Höchstlast sowie Steifigkeit der Befestigung ab. Außerdem nimmt die Bruchverschiebung deutlich zu. Vergleicht man die Ergebnisse mit und ohne Brandeinfluss findet man die höchste Abnahme der Tragfähigkeit für die kleinste Verankerungstiefe und für die Branddauer von 90 Minuten. In diesem Fall entspricht die Höchstlast nach der Erhitzung in etwa der zulässigen Last.

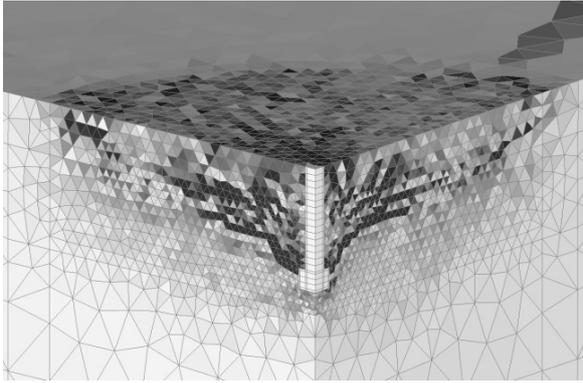
Die Abbildungen 1 und 2 zeigen das Versagen der Befestigung nach 90 Min. Erhitzung mit einer kleinen Verankerungstiefe von  $h_{ef} = 50$  mm und einer großen Verankerungstiefe von  $h_{ef} = 150$  mm. Dargestellt sind die Hauptzugdehnungen, die so skaliert sind, dass dunkle Bereiche die kritische Rissbreite von 0.1 mm zeigen. Der Ausbruchkegel ist deutlich zu erkennen. Außerdem ist zu erkennen, dass bei kleinen Verankerungstiefen der gesamte Ausbruchkegel im Bereich sehr hoher Temperatur liegt, in dem der Beton nahezu vollständig zerstört ist. Der Extremfall wird für die Verankerungstiefe von  $h_{ef} = 50$  mm und für die Erhitzung von 120 Min. beobachtet: hier ist die Betonausbruchtragfähigkeit niedriger als die zulässige Last, d.h. der Anker versagt während der Erhitzung. Der Hauptgrund für das Versagen ist die starke Abnahme der mechanischen Betoneigenschaften im Bereich um den Ankerkopf sowie die thermisch induzierte Rissbildung im Beton.

culated. In the second step the required load history is applied with taking into account the influence of temperature on the concrete mechanical properties. Detailed model description can be found in [6].

### Single anchors without edge influence

In case of single anchors without edge influence the results show that due to damage caused by thermal loading the concrete cone resistance of the headed stud anchors is significantly reduced. With increase of temperature (heating time) the peak load and stiffness of the anchors decrease. Moreover, displacement at peak load significantly increases if the concrete member is exposed to fire. Compared to the initial resistance at  $t = 0$  and  $T_{\text{Air}} = 20^{\circ}\text{C}$ , the largest reduction of the ultimate load is obtained for the smallest embedment depth ( $h_{ef} = 50$  mm) and for the second thermal loading history (90 min. heating). In this case the calculated ultimate load almost equals to the anchor's admissible load.

Typical crack patterns for anchors with small ( $h_{ef} = 50$  mm) and large ( $h_{ef} = 150$  mm) embedment depth are shown in Figures 2 and 3, respectively. The dark zone (maximal mechanical principal strain) shows localization of damage. It can be seen that for relatively small embedment depth the anchor lies over the entire length in the zone of very high temperature in which the concrete is almost completely destroyed. Extreme case is observed for embedment depth of  $h_{ef} = 50$  mm and for the third loading history (120 min. of heating). For this case the ultimate concrete cone capacity is even smaller than the initially applied admissible load i.e. the anchor fails during heating. The main reason for the failure is strong degradation of concrete mechanical properties in the area close to the stud head as well as thermal induced cracking in concrete member.



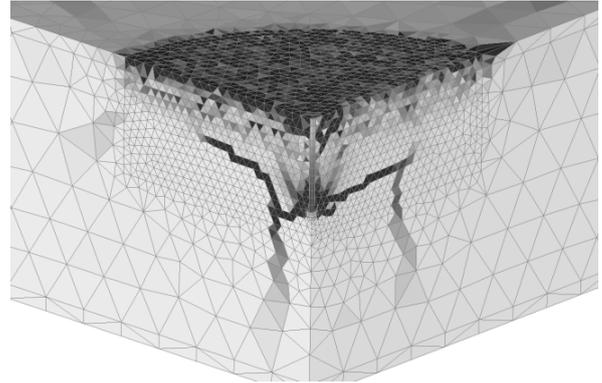
**Figure 1:** Typical crack pattern for anchors with small embedment depth –  $h_{ef} = 50$  mm,  $t = 90$  min

**Abbildung 1:** Typisches Versagen für Anker mit kleiner Verankerungstiefe –  $h_{ef} = 50$  mm,  $t = 90$  min

Bei größeren Verankerungstiefen liegt der Ankerkopf im Bereich niedriger Temperatur. In diesem Bereich ist der Beton weniger beschädigt, daher ist auch die Abnahme der Betonausbruchtragfähigkeit nicht so groß.

Abbildung 3 zeigt die relative Resttragfähigkeit, definiert als die Resttragfähigkeit nach einer bestimmten Erhitzungszeit  $F_u(t)$  dividiert mit der Tragfähigkeit ohne Brandeinfluss  $F_u(t=0)$ , als Funktion der Erhitzungszeit für unterschiedliche Verankerungstiefen. Wie bereits erwähnt versagt der Anker mit einer Verankerungstiefe von  $h_{ef} = 50$  mm kurz nach 90 Minuten Erhitzung. Die Resttragfähigkeit nach 120 Min. Erhitzung ist daher niedriger als die zulässige Last, was in der Abbildung entsprechend berücksichtigt wird. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Verankerungstiefe sowie die Erhitzungszeit die Betonausbruchtragfähigkeit am stärksten beeinflussen. Mit zunehmender Erhitzungszeit nimmt die Tragfähigkeit der Anker ab. Dieser Einfluss ist bei größeren Verankerungstiefen allerdings wesentlich kleiner als bei kleinen Verankerungstiefen.

In Abbildung 4 ist die berechnete relative Resttragfähigkeit  $F_u(t) / F_u(t=0)$  als Funktion der Verankerungstiefe dargestellt. In der gleichen Abbildung sind die Ergebnisse der Brandversuche von Reick [7] für die Veran-



**Figure 2:** Typical crack pattern for anchors with large embedment depth –  $h_{ef} = 150$  mm,  $t = 90$  min

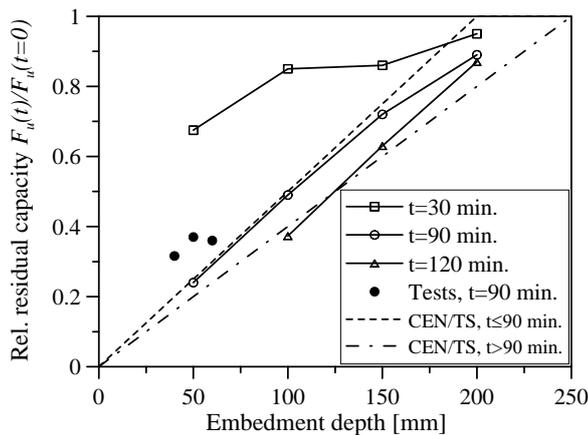
**Abbildung 2:** Typisches Versagen für Anker mit großer Verankerungstiefe –  $h_{ef} = 150$  mm,  $t = 90$  min

For larger anchors and in case when the embedment depth is large compared to the thickness of a concrete member, the head of the stud lies in the zone of lower temperature. In this zone the concrete is less damaged. Consequently smaller ultimate load reduction is observed.

In Figure 3 relative residual anchor capacity, defined as a ratio between the residual capacity at certain temperature  $F_u(T)$  and the ultimate capacity without fire influence (at 20°C)  $F_u$ , is plotted as a function of heating time for different embedment depths. In case of  $h_{ef} = 50$  mm and  $t = 120$  min. the anchor fails during heating. It can be clearly seen that embedment depth and heating time have dominant effects on the anchor capacity. With increasing heating time anchor capacity decreases. However, in case of large embedment depth the reduction of the anchor resistance is significantly lower (up to 10 % after  $t = 120$  min.) than in case of small embedment depths.

In Figure 4 calculated relative residual anchor capacity  $F_u(t)/F_u$  is plotted as a function of embedment depth. In the same figure experimental results from Reick [7] for embedment depths of  $h_{ef} = 40$  mm,  $h_{ef} = 50$  mm and  $h_{ef} = 60$  mm after 90 min. of heating as well as predicted anchor capacity according to

kerungstiefen  $h_{ef} = 40 \text{ mm}$ ,  $h_{ef} = 50 \text{ mm}$  und  $h_{ef} = 60 \text{ mm}$  nach 90 Minuten Erhitzung nach ETK sowie die Tragfähigkeiten nach der aktuellen Bemessungsrichtlinie CEN/TS [1] mit abgebildet. Die Ergebnisse der FE-Analyse für  $t = 90 \text{ Min.}$  und  $t = 120 \text{ Min.}$  zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit der Bemessungsrichtlinie. Im Fall der 30-minütigen Erhitzung ist die Bemessung etwas konservativ.



**Figure 4:** Relative residual capacity for single anchors without edge influence under fire as a function of embedment depth

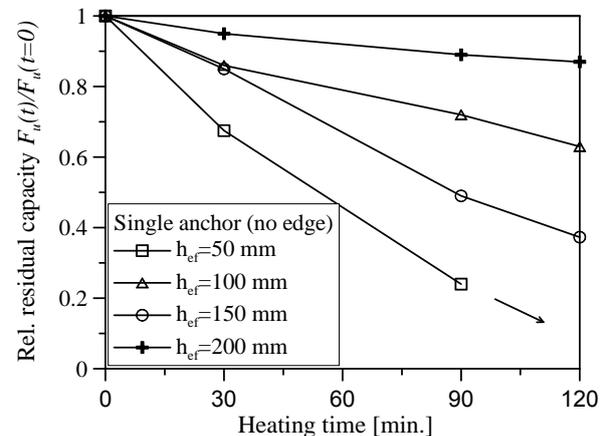
**Abbildung 4:** Relative Resttragfähigkeit der Einzelanker ohne Randeinfluss unter Brandeinwirkung als Funktion der Verankerungstiefe

**Einzelbefestigungen mit Randeinfluss**

Bei Einzelbefestigungen mit Randeinfluss ist im wesentlichen zwischen zwei möglichen Brandbelastungsfällen zu unterscheiden: i) eine Betonoberfläche wird dem Brand ausgesetzt, während die übrigen Betonoberflächen auf irgendeine Art und Weise vom direkten Brandeinfluss geschützt sind (z.B. eine Betonplatte) und ii) zwei oder mehr Betonoberflächen sind im direkten Kontakt mit offenem Feuer (z.B. ein Betonbalken). Beide Fälle wurden hier numerisch untersucht, mit Randabständen von jeweils  $2 h_{ef}$ ,  $1 h_{ef}$  und  $0.5 h_{ef}$ . Weiterhin wurde die gleiche Diskretisierung wie im Fall ohne Randeinfluss angewendet.

Die Hauptfrage bei den Befestigungen unter

the current design code CEN/TS [1] are shown. It can be seen, that the FE results for  $t = 90 \text{ min.}$  and  $t = 120 \text{ min.}$  show very good agreement with the design code. In case of 30 min. of heating the design code is clearly too conservative.



**Figure 3:** Relative residual capacity for single anchors without edge influence under fire as a function of heating time

**Abbildung 3:** Relative Resttragfähigkeit der Einzelanker ohne Randeinfluss unter Brandeinwirkung als Funktion der Erhitzungszeit

**Single anchors with edge influence**

In case of anchors installed close to a concrete edge there are two possible configurations: i) single concrete surface is exposed to fire, such as in case of a slab and ii) 2 or more concrete surfaces are exposed to fire, as it would be the case for anchors installed in a column. Both cases were subject of FE investigation. Investigated geometry is similar to the case of anchors without edge influence, with edge distance on one side being reduced to  $2 h_{ef}$ ,  $1 h_{ef}$  and  $0.5 h_{ef}$ . Furthermore, the same discretization as in the previous case is employed.

The main question in case of single anchors with edge influence was whether the concrete capacity method (CC-Method), which describes the influence of a concrete edge on concrete cone capacity and was developed for fastenings under normal temperature, can be used for fasteners under fire

Brandeinwirkung mit Randeinfluss ist, ob und wie stark sich der charakteristische Randabstand unter Brandeinfluss ändert bzw. ob sich der auf die Tragfähigkeit negativ auswirkende Randeinfluss auch unter Brandeinfluss mit der CC-Methode ausreichend genau berücksichtigen lässt. Die Ergebnisse der FE-Analyse zeigen, dass im Fall einer einflächiger Erhitzung der charakteristische Randabstand unverändert bleibt. Ähnlich wie bei den Ankern ohne Randeinfluss ist die Abnahme der Tragfähigkeit am stärksten für kleine Verankerungstiefen ausgeprägt und nimmt mit zunehmender Verankerungstiefe ab. Die Haupteinflussparameter sind Verankerungstiefe und Erhitzungszeit, der Randabstand hat keinen zusätzlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit.

Bei mehrflächiger Branderhitzung wurde unterschiedliches Verhalten beobachtet. Wendet man die Branderhitzung auf die Anbauteilseite sowie auf die randnahe Seite an, wird ein zusätzlicher Einfluss des Randabstandes beobachtet. In Abbildung 5 ist die relative Resttragfähigkeit eines Ankers mit einer Erhitzungszeit  $t$  und einem Randabstand  $c$ ,  $F_u(t, c_1)$  dividiert mit der Tragfähigkeit des Ankers ohne Randeinfluss bei  $t = 0$  als Funktion von  $c_1$  für unterschiedliche Verankerungstiefen dargestellt. Die dazugehörige zulässige Last ist mit angezeigt. Es ist zu erkennen, dass bei Randabständen unter 100 mm das Versagen häufig unter zulässiger Last während der Erhitzung erfolgt, bevor 90 Minuten Erhitzung erreicht werden. Das Versagen tritt hier gleichermaßen bei kleinen wie bei großen Verankerungstiefen. Mit zunehmendem Randabstand steigt die Resttragfähigkeit der Anker an. Dieses Verhalten kann dadurch erklärt werden, dass bei kleinen Randabständen aufgrund der seitlichen Erhitzung der Anker mit der gesamten Länge im Bereich hoher Temperatur liegt. Ähnlich wie bei den Ankern mit kleinen Verankerungstiefen ist hier die Abnahme der mechanischen Betoneigenschaften sowie

influence as well. In case of single concrete surface fire exposure, the results from the FE analysis confirm this assumption. As for single anchors without edge influence, the anchor capacity reduction is large for small anchors and decreases with increasing anchor size. The main influencing parameter is embedment depth, anchor edge distance has no additional influence on the anchor capacity. Furthermore, even the characteristic edge distance  $c_{cr,n}$  seems not to change in case of fire and remains  $1.5 h_{ef}$  as in case of normal temperature conditions.

Different behavior can be observed in case of multiple sides heating. In the present paper the case with heating from the "fastening side" and from the "closest edge side" is considered. In Figure 5 the ratio of the anchor residual resistance for certain heating time and edge distance  $F_u(t, c_1)$  and ultimate resistance at "large" edge distance ( $c_1 = 2h_{ef} > c_{cr}$ ) for  $t = 0$  is plotted as a function of  $c_1$  for different embedment depths. Corresponding relative admissible load is shown as well. It can be seen that for edge distances smaller than 100 mm anchors fail under admissible load before reaching 90 minutes of heating, even in the case of relative large embedment depth such as  $h_{ef} = 150$  mm. With increasing edge distance relative residual resistance increases. The reason for this behavior is the fact that anchors close to the heated edge lie in the area of very high temperature, similar to anchors with small embedment depth in case of single side heating. Mechanical properties degradation as well as thermal induced cracking have negative influence on the capacity of such anchors.

According to the current design code [1], in case of spatial heating the minimal edge distance must be at least  $c_{min} = 300$  mm or  $c_{min} = 0.5h_{ef}$ . The presented numerical results show that the minimal edge distance could be reduced to 100 mm. However, experimental results are needed to confirm this

die thermisch induzierte Rissbildung besonders stark ausgeprägt, was zu einer wesentlichen Abnahme der Betonausbruchstragfähigkeit führt.

In der aktuellen Bemessungsrichtlinie [1] wird im Fall einer räumlichen Erhitzung ein minimaler Randabstand von  $c_{min} = 300$  mm bzw.  $c_{min} = 0.5h_{ef}$  gefordert. Die dargestellten numerischen Ergebnisse deuten allerdings darauf hin, dass unabhängig von der Verankerungstiefe der Befestigung der minimale Randabstand auf 100 mm reduziert werden könnte. Die Ergebnisse sollten allerdings von den Versuchen bestätigt werden.

### Gruppenbefestigungen ohne Randeinfluss

Bei der Untersuchung der Ankergruppen wurde zunächst nur der Fall einer symmetrischen 4-fach Befestigung ohne Randeinfluss betrachtet. Die Erhitzung wurde von der Anbauteilseite angebracht.

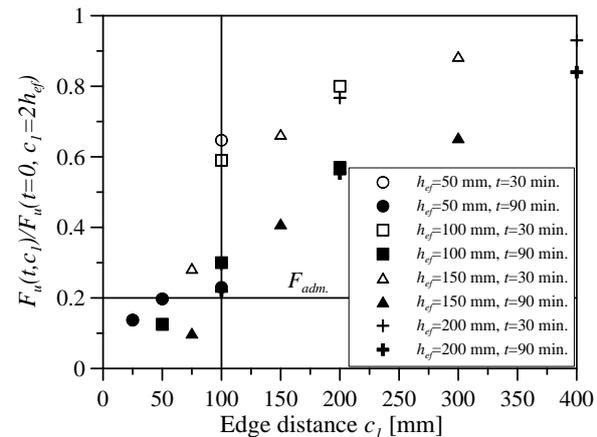
Wie erwartet zeigen die numerischen Ergebnisse ein ähnliches Verhalten wie bei den Einzelbefestigungen. Die Haupteinflussfaktoren sind Verankerungstiefe und Erhitzungszeit. Die Abnahme der Resttragfähigkeit ist stark für kleine Verankerungstiefen und nimmt mit zunehmender Verankerungstiefe ab. Detaillierte Beschreibung der Untersuchung von Gruppenbefestigungen unter Brandeinwirkung kann in [6] gefunden werden.

Der kritische Achsabstand unter Brandeinwirkung scheint unverändert zu bleiben. Der in der aktuellen Bemessungsrichtlinie [1] angenommene Wert von  $s_{cr} = 4 h_{ef}$  ist konservativ.

### Zusammenfassung

Im vorliegenden Aufsatz wurde der Brandeinfluss auf die Betonausbruchstragfähigkeit von Einzel- sowie Gruppenbefestigungen mit Kopfbolzen numerisch untersucht. Die FE-Analyse wurde mit der Verwendung des

observation.



**Figure 5:** Relative residual capacity with reference to the case  $c_1 = 2h_{ef}$  and  $t = 0$  for single anchors with edge influence and multiple-side heating as a function of edge distance  $c_1$

**Abbildung 5:** Resttragfähigkeit der Anker relativ zum Fall mit  $c_1 = 2h_{ef}$  und  $t = 0$  für Befestigungen mit Randeinfluss und mehrflächiger Erhitzung

### Anchor groups without edge influence

In the anchor group investigation under fire the focus is set on the group of 4 anchors. The heating is applied on one side only, since it is assumed that anchors are placed far from the concrete edge.

As expected, the results for anchor groups are similar to those of single anchors. The main influencing factors are embedment depth and heating time. The reduction of the anchor capacity is strong for small embedment depths and decreases with increasing  $h_{ef}$ . Detailed report of the investigation of anchor groups under fire conditions can be found in [6].

The critical anchor spacing under fire doesn't seem to be different than at normal temperature. The value of  $4 h_{ef}$ , as assumed in the current design code [1], is conservative.

### Summary

In the present paper the influence of fire on concrete cone capacity of single and multiple headed stud anchors is numerically investigated. The FE analysis is performed by the

phänomenologischen thermo-mechanischen Modells durchgeführt, dass auf einem temperaturabhängigen Microplane Modell des Betons basiert [4,5,6].

Im Fall der Einzelbefestigungen ohne Randeinfluss hängt die relative Resttragfähigkeit der Befestigung hauptsächlich von der Verankerungstiefe und der Erhitzungszeit ab. Bei kleinen Verankerungstiefen wird eine starke Abnahme beobachtet, da sich der ausbildende Bruchkegel im Bereich hoher Temperaturen befindet. Mit zunehmender Verankerungstiefe nimmt der Einfluss der hohen Temperaturen ab. Weiterhin nimmt mit zunehmender Erhitzungszeit die Tragfähigkeit der Befestigungen stark ab. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass bei Kopfbolzen mit einer Verankerungstiefe von  $h_{ef} = 50$  mm das Versagen bereits unter der zulässigen Gebrauchslast für den kalten Zustand kurz nach 90 Min. Branddauer auftritt. Bei Verankerungen mit  $h_{ef} = 200$  mm wird nach 90 Min. Erhitzungsdauer nahezu die Tragfähigkeit der Befestigung bei normaler Temperatur erreicht.

Im Fall der Einzelanker am Rand und einer einseitiger Brandbelastung (Anbauteilseite, keine räumliche Temperaturverteilung) nimmt die relative Betonausbruchtragfähigkeit mit zunehmender Branddauer ab. Die Größe der Abnahme ist ähnlich wie bei den Einzelbefestigungen ohne Randeinfluss. Im Fall der Einzelanker mit zweiflächiger Brandbelastung (Anbauteilseite plus randnahe Seite) hat der Randabstand einen wichtigen Einfluss auf die Tragfähigkeit. Die Ergebnisse der FE-Analyse zeigen, dass ein Versagen unter zulässiger Belastung unabhängig von der Verankerungstiefe bereits nach kurzer Branddauer erfolgen kann, wenn der Randabstand kleiner als 100 mm beträgt. Mit zunehmendem Randabstand nimmt der Randeinfluss ab und das Verhalten wird ähnlich wie bei einer einflächigen Erhitzung.

Ankergruppen ohne Randeinfluss verhalten

use of phenomenological thermo-mechanical model for concrete that is based on the temperature dependant microplane model [4,5,6].

In case of single anchors without influence of concrete edge the relative anchor resistance at high temperature is mainly controlled by embedment depth and heating time. For small embedment depths the relative anchor resistance is strongly reduced, since the whole anchor is placed in the area of high temperature. With increasing embedment depth the influence of temperature decreases. Furthermore, the relative anchor resistance decreases with heating time. The results show that headed studs under admissible load with 50 mm embedment depth fail shortly after 90 minutes of heating. For anchors with 200 mm embedment depth no significant influence of high temperature after 90 minutes of heating is observed.

In case of anchors close to a concrete edge and heating from one side ("fastening side", no spatial heat flux) the relative anchor resistance decreases with increasing temperature. The magnitude of the reduction is similar to the case for anchors without influence of concrete edge. In case of single anchors and two-side heating ("fastening side" and "closest edge side") the edge distance has a significant influence on anchor resistance. The FE calculations show, that fastenings fail under admissible load, independent on their embedment depth, if edge distance is smaller than 100 mm. With increasing edge distance the influence of two-side heating decreases and becomes similar to the case with one-side heating.

Anchor groups without concrete edge influence behave similarly to single anchors without edge influence. The main influencing parameters are embedment depth and heating time.

Finally, it can be concluded that fastenings exhibit significant capacity reduction in case of fire. The main influencing factors on the

sich unter Brandeinwirkung ähnlich wie Einzelbefestigungen. Die Hauptparameter sind Verankerungstiefe und Branddauer.

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass die Tragfähigkeit der Befestigungen unter Brandeinwirkung stark reduziert werden kann. Die Haupteinflussparameter sind Verankerungstiefe und Branddauer. Die Tragfähigkeiten nach der aktuellen Bemessungsrichtlinie stimmen mit den numerisch berechneten Tragfähigkeiten gut überein, nur in manchen Fällen ist sie konservativ. Um das Verhalten unter Brandeinwirkung detaillierter zu untersuchen sowie die darliegenden Ergebnisse zu verifizieren, werden dringend Forschungsversuche benötigt.

ultimate anchor capacity are embedment depth, heating time and in some cases edge distance. The current design code is generally able to predict fastening capacity under high temperature, but in some cases it is conservative. To verify the fastenings behavior in case of fire in more detail and to confirm presented numerical results experimental investigations should be performed.

#### Literatur / References

- [1] **Comité Européen de Normalisation – CEN (Europäisches Komitee für Normung, 2009):** Design of fastenings for use in concrete – CEN/TS 1992-4-1, Technical Specification. Comité Européen de Normalisation, Brussels.
- [2] **Eligehausen, R.; Mallee, R.; Silva, J.F. (2006):** Anchorage in Concrete Construction. Ernst & Sohn, Berlin.
- [3] **Ožbolt, J.; Li, Y.-J.; Kožar, I. (2001):** Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint. In: International Journal of Solids and Structures 38 (2001), S. 2683-2711.
- [4] **Ožbolt, J.; Kožar, I.; Eligehausen, R.; Periškić, G. (2005):** Three-dimensional FE analysis of headed stud anchors exposed to fire. In: Computers and Concrete 2 (2005), S. 249-266.
- [5] **Ožbolt, J.; Periškić, G.; Reinhardt, H.-W.; Eligehausen, R. (2008):** Numerical analysis of spalling of concrete cover at high temperature. In: Computers and Concrete 5 (2008), S. 279-293.
- [6] **Periškić, G. (2010):** Entwicklung eines 3D thermo-hygro-mechanischen Modells für Beton unter Brandbeanspruchung und Anwendung auf Befestigungen unter Zuglasten, Dissertation. Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- [7] **Reick, M. (2001):** Brandverhalten von Befestigungen mit großem Randabstand in Beton bei zentrischer Zugbeanspruchung, Dissertation. Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, Stuttgart.

**NACHHALTIG BAUEN MIT BETON - DAS ONLINE- INFORMATIONSSYSTEM  
NBB-INFO  
SUSTAINABLE CONCRETE CONSTRUCTION - THE ONLINE INFORMATION  
PLATFORM NBB-INFO**

von/by: Christian Piehl

### **Zusammenfassung**

Das BMBF Verbundvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“ unter Koordination des DAfStb bestand aus den sechs Teilprojekten A-F, wobei die verschiedenen Teilprojekte an unterschiedlichen Standorten bearbeitet wurden. Um einen Austausch der benötigten Daten zwischen den verschiedenen Teilprojekten zu ermöglichen, eine einheitliche Terminologie zu gewährleisten und die gewonnenen Ergebnisse später zu präsentieren, wurde im Rahmen des Teilprojekt F das Onlineinformationssystem „NBB-Info“ erstellt.

### **Einleitung**

Die Konkretisierung und praktische Umsetzung aktueller Nachhaltigkeitsstrategien ist ein komplexer Prozess, in dem eine Vielzahl von Einzelinformationen und Daten beachtet werden müssen. Das Projekt „Nachhaltig Bauen mit Beton“ diente der Bearbeitung dieses Prozesses für Nachhaltigkeitsfragen, die im Zusammenhang mit Entscheidungen stehen, die im Zuge des Entwurfs, der Planung, der Ausführung und der Nutzung von Beton- und Stahlbetonbauwerken auftreten. Im Rahmen dieses Projekts wurde daher innerhalb des Teilprojektes F ein Online-Informationssystem entwickelt, das die notwendige Strukturierung, Verwaltung und Bereitstellung aller benötigten Informationen unterstützt. Das entstandene System ist innerhalb der Webseite <http://www.nbb-forschung.de> unter dem Namen „NBB-Info“ erreichbar.

### **Abstract**

The BMBF joint research project “Sustainable concrete construction”, coordinated by DAfStb, consisted of six subprojects A-F, which were situated in different places. The online information system “NBB-Info” was developed by subproject F to allow exchange of information between the subprojects, to ensure a consistent terminology and to present the results.

### **Introduction**

The concretion and implementation of actual sustainability strategies is a complex process, in which a lot of individual information and data has to be concerned. The project “sustainable concrete construction” was meant for the adaptation of this process in case of sustainability issues associated with decisions to be made while the designing phase, planning stage, construction and usage of concrete and reinforced concrete buildings.

Therefore an online information system, supporting the required job design, administration and allocation of all needed information, was developed by subproject F as part of the main venture. The new system named “NBB-Info” can be found on the website <http://www.nbb-forschung.de>

### **Arbeitsweise und Funktionen von NBB-Info**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“ wurde am IWB die zentrale Onlineplattform „NBB-Info“ entwickelt. Dabei handelt es sich um ein dynamisches, webbasiertes Informationssystem, welches mittels HTML, PHP, SQL und Java Script erstellt wurde. Es dient hauptsächlich dem Austausch von Daten zwischen den verschiedenen Teilprojekten und zur Präsentation der Ergebnisse. Das komplette System besteht zum Projektende aus 29 SQL Tabellen mit ca. 27000 Datensätzen und 51 Programmmodulen, welche auf die Tabellen zugreifen. Hauptbestandteile des Gesamtsystems sind die Dokumentenliste, eine Datenbank und ein Thesaurus, auf deren Funktionen jeder Nutzer, in Abhängigkeit von den an ihn vom Administrator vergebenen Nutzerrechten, in unterschiedlichem Maße zugreifen kann. Das Onlineinformationssystem bietet diverse Funktionen, wobei die drei wichtigsten hier kurz vorgestellt werden sollen:

Die Dokumentenliste stellt eine Datenbank mit zum Thema passenden Dokumenten dar. Hier lassen sich zum Beispiel Bauproduktzertifizierungen, Umweltdeklarationen oder andere Dokumente schnell auffinden. Jeder registrierte User von NBB-Info kann solche Dokumente über seinen Account in die Dokumentenliste laden und somit Anderen zur Verfügung stellen. Dabei kann das betreffende Dokument direkt, z.B. als .pdf hochgeladen und auf dem Server gespeichert werden, oder es besteht die Möglichkeit, die URL eines sich schon an anderer Stelle online befindlichen Dokuments zu hinterlegen und somit von der Dokumentenliste auf dieses zu verweisen. Zur Verwaltung der Dokumentenliste werden zu jedem Dokument Titel, Beschreibung, URL (die des eigenen Servers oder Fremd-URL), ID der Person, die es hochgeladen hat und der

### **Mode of operation and functions of NBB-Info**

The central online platform “NBB-Info” was developed as part of the joint research project “Sustainable concrete construction”. It is a dynamic, webbased information system which was created using HTML, PHP, SQL and Java Script. Its main use is the exchange of data between the different subprojects and the presentation of the results. The whole system consists of 29 SQL tables containing about 27.000 data sets and 51 program modules accessing the tables. Main parts of the system are the document list, a database and a thesaurus, which functions may be accessed to varying degrees by any user according to the user rights assigned by the administrator. The online information system provides several different functions; the three most important ones are described in this article.

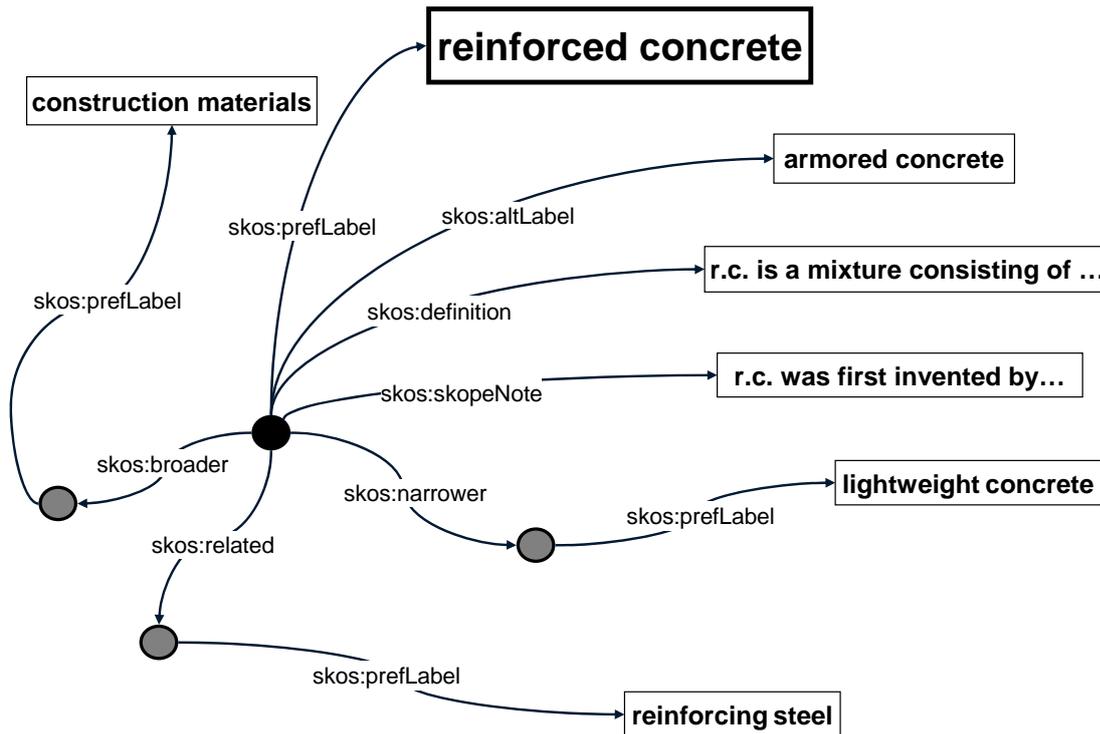
The document list represents a data base containing documents matching the theme. For example, building product certificates, environment declarations or other documents can be found easily in this list. Any registered user of NBB-Info is able to upload such documents via his account into the document list and therefore provide them to others. Thereby the concerning document may be uploaded and saved directly to the server, e.g. as .pdf or .doc file, or there is the possibility to deposit the URL of a document already online and therefore refer to it via the document list. For the administration of the document list, the title, description, URL (of the document on the own server or foreign URL), ID of the person who uploaded the document and time of the upload are saved for any document in a SQL table.

Zeitpunkt des Hochladens in einer SQL Tabelle gespeichert. Als weitere Funktion kann ein User einem selbst hochgeladenen Dokument nach Bedarf auch eine bestimmte Nutzergruppe zuweisen. Damit wird das Dokument dann nur für Mitglieder der betreffenden Nutzergruppe zugänglich. Dies kann zum Einen dazu dienen, die Übersicht zu verbessern, indem nicht alle wirklich vorhandenen Dokumente auch angezeigt werden, sondern nur für den betreffenden User auch relevante, zum Anderen können somit Nutzungsrechte für einzelne Dokumente verwirklicht werden. Dies geschieht über drei weitere SQL Tabellen. Die erste enthält die existierenden Nutzergruppen, die zweite weist die Nutzer einer der Nutzergruppen zu und die dritte weist entsprechenden Dokumenten einer der Nutzergruppen zu. Die Aufnahme von Usern in Nutzergruppen wird dabei vom Administrator vorgenommen.

Zum Projektende wird ein Grundlagenpapier (GruNaBau) zum nachhaltigen Bauen mit Beton veröffentlicht. Um hierbei während der Erstellung ein einheitliches Vokabular zwischen den einzelnen Teilprojekten zu gewährleisten und später die Verständlichkeit von GruNaBau zu erleichtern, wurde ein zugehöriges Glossar erstellt. Hierzu wurde entschieden, einen Thesaurus in „NBB-Info“ zu implementieren, welcher die wichtigsten Begriffe des Dokumentes in eine hierarchische Struktur bringt und die Definitionen und Verwandtschaften der Einzelbegriffe liefert. Zu jedem Begriff lassen sich so einfach Vorgänger, Nachfolger, Verwandtschaftsbeziehungen, Synonyme und die Definition und deren Quelle finden. Bei Erstellung des Thesaurus wurde darauf geachtet, dass ein Begriff, dessen Definition einen anderen Begriff aus dem Thesaurus enthält auch in der Hierarchie dessen Nachfolger ist. Auf diese Weise stehen eher allgemeine Begriffe höher in der Hierarchie, spezielle Begriffe eher niedriger. Sind in einer Definition mehrere Begriffe aus dem Thesaurus enthalten, wird

As another feature, users are able to assign their uploaded documents to special user groups if necessary. By doing this, the concerning document is only available for members of this special user group. This feature on the one hand may be used to improve the general view, as not all actual documents are shown for every user, but only those which in fact are relevant for the concerning user in his group, on the other hand usage rights for single documents can be put into effect. This is done via three further SQL tables. The first one contains all existing user groups, the second one allocates the different users to some user group and the third one allocates all concerning documents to the user groups. The admission of users in some user group is done by the administrator.

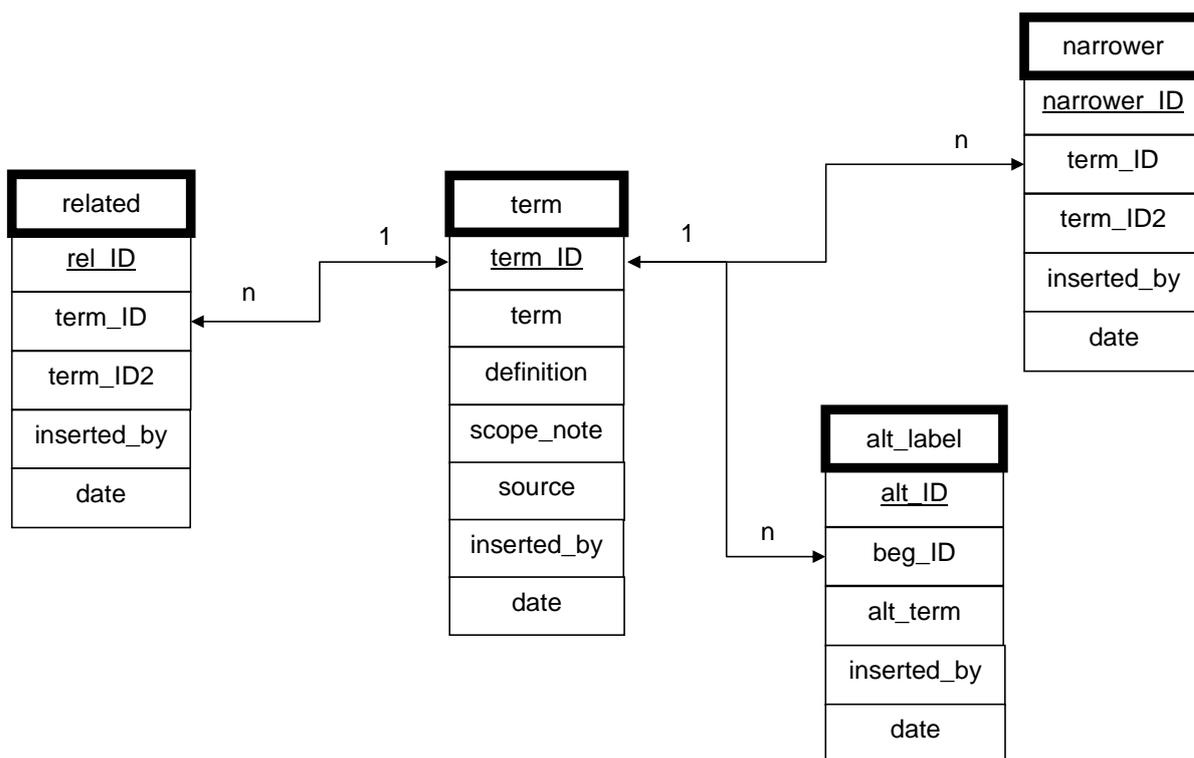
At the end of the project, a guideline for sustainable concrete construction, the “axioms of sustainable concrete constructions” (GruNaBau) is published. To ensure a consistent terminology in the different chapters of GruNaBau composed by the single sub-projects and to ease comprehensibility of GruNaBau, some appending glossary had to be created. Therefore it was decided, to implement a thesaurus into “NBB-Info“, which offers definitions and relations of the most important terms used in GruNaBau and sorts them in some hierarchical structure. For the hierarchical structure the term “broader”, “narrower”, and “related” are used. While creating the thesaurus, a term “X”, which was used in the definition of some other term “Y” in the thesaurus, was marked as broader of “Y”. In this example, X is broader of Y, Y is narrower of X. By doing so, rather general terms are situated somewhere at the top of the hierarchy, whereas specific terms are situated on lower levels. If a definition contains more than one other term, the most important one becomes broader, while all



**Abbildung 1: SKOS**  
**Figure 1: SKOS**

der wichtigste als Vorgänger eingetragen, die anderen als „verwandt“. Hierbei wurden die aktuellen RDF [1] / SKOS [2] Standards eingehalten, um so nach Bedarf den Thesaurus auch in diese gängigen Formate exportieren zu können. Dies ist in Abbildung 1 Dargestellt. Die Punkte stehen hierbei für Einträge im Thesaurus, die Pfeile für zugewiesene Attribute nach SKOS: `prefLabel` ist somit der Hauptbezeichner des Eintrags, `altLabel` ein Synonym, `definition` die Definition, `skopeNote` eine Zusatzinformation, `narrower` ein Nachfolger, `broader` der Vorgänger und `related` stellt eine Verwandtschaft dar. Hier ist beispielhaft der Begriff „Stahlbeton“ mit Vorgänger „Baumaterialien“, Nachfolger „Konstruktionsleichtbeton“ und Verwandtschaft zu „Betonstahl“ dargestellt. Um die zyklensfreie Struktur der Hierarchie zu wahren, ist zu beachten, dass jeder Begriff nur einen Vorgänger haben kann. Die Anzahl der Nachfolger und Verwandtschaften ist jedoch beliebig. Die Begriffe und ihre

others become related. The actual RDF [1] and SKOS [2] standards were observed, to ensure the exportability of the thesaurus in those common formats. This is shown in figure 1. It shows exemplary the term “reinforced concrete” with its broader “construction materials”, narrower “lightweight concrete” and related “reinforcing steel”. The circles represent one entry in the thesaurus, the arrows the allocated attributes according to SKOS: “`prefLabel`” is the preferred term of the entry, “`altLabel`” is a synonym, “`definition`” the definition, “`skopeNote`” an additional information, “`narrower`” a narrower in hierarchy, “`broader`” the parent in hierarchy and “`related`” means some relationship between the terms. To keep the hierarchical structure free of cycles, any term can only have one single broader. The number of narrowers and related terms however is arbitrary. The terms and their relations are saved in four SQL tables (see figure 2). Table “`term`” contains the term itself, its ID, definition,



**Abbildung 2:** ER-Modell des Thesaurus (vereinfacht)  
**Figure 2:** Entity relationship model of the thesaurus (simplified)

Beziehungen sind dabei in vier SQL Tabellen gespeichert (siehe Abbildung 2). Tabelle „term“ enthält den Begriff selbst, seine ID, die Definition, die scopeNote, die Quelle und zur besseren Verwaltung auch das Eintragstag, bestehend aus der ID der eintragenden Person und dem Datum des Eintrags. Tabelle „related“ enthält die VerwandtschaftsID, die beiden IDs der verwandten Begriffe und wieder Eintragstag. Tabelle „narrower“ enthält die narrowerID, die IDs des Begriffs und seines Nachfolgers und das Eintragstag. Tabelle „alt\_label“ enthält die alternativeID, die BegriffsID, das Synonym und das Eintragstag.

Bei Erstellung des Thesaurus war es den Mitgliedern der einzelnen Teilprojekte möglich, selbst Begriffsvorschläge für den Thesaurus einzutragen und die Begriffsvorschläge anderer Mitglieder in Form einer Liste einzusehen. Die Erstellung und Verwaltung des Thesaurus erfolgt über eine eigens hierfür programmierten Eingabemaske, welche jegliche Eingaben automatisch auf In-

scopeNote, source and, for better administration, an entry tag consisting of the ID of the person who inserted the term, and the date of entry. Table “related” contains the ID of the relation, both IDs of the related terms and, again, the entry tag. Table “narrowers” contains the narrower ID, the ID of the term and it’s narrower and the entry-tag. Table “alt\_label” contains the alternative ID, the ID of the term, the synonym and the entry tag.

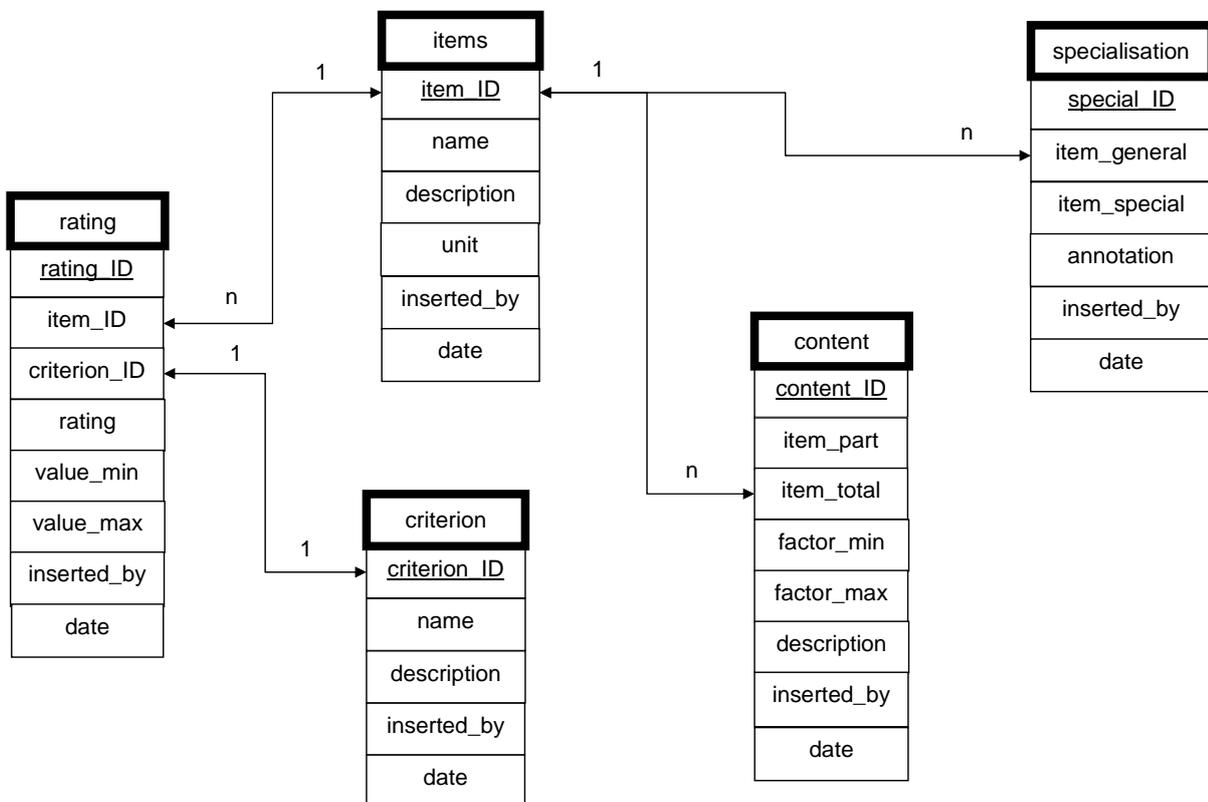
When the thesaurus was created, all members of the single subprojects were able to insert suggestions for terms into the thesaurus and to see the suggestions of the other members in a list. The administration of the thesaurus is done via a specially programmed input mask, which automatically checks for inconsistency, redundancy and violation of the referential integrity, thus help-

konsistenzen, Redundanzen und Verletzungen der referentiellen Integrität überprüft und somit hilft, Fehler im Datenbestand oder der Datenbankstruktur der relationalen Datenbank zu vermeiden.

Kernstück der Onlinplattform „NBB-Info“ ist eine SQL-Datenbank, welche die Ergebnisse der Teilprojekte und andere relevante Daten des Forschungsprojektes enthält. Die Datenbank bietet dynamische Tabellen mit den Werten für alle untersuchten Materialien. Enthalten sind die Werte für die 5 Ökokriterien Versauerungspotential, Treibhauspotential, Überdüngungspotential, Sommersmogpotential und Ozonabbaupotential und weitere 10 Kriterien für die verschiedenen Kosten und Energieaufwände zum Erzeugen und Entsorgen der Materialien. Hierfür musste zuerst eine passende Datenbankstruktur entworfen, und alle relevanten Daten identifiziert und erfasst werden. Vereinfacht besteht die Datenbank aus den 4 Tabellen „items“, „rating“, „specialisation“ und

ing to avoid failures in the data pool or the structure of the data base.

Main part of the online platform “NBB-Info“ is a SQL data base, which contains the results of the subprojects and other relevant data for the research project. The database offers dynamic tables with all analysed materials and their determined values. There are values for 5 environmental criteria: acidification potential, global warming potential, eutrophication potential, photocyclic ozone creating potential, ozone depletion potential and 10 criteria for different sorts of costs and amounts of energy used to create and recycle the material. Therefore some adequate structure of the data base had to be developed and all relevant data had to be identified and collected. Simplified, the database consists of the four tables “items”, “rating”, “specialisation”, and “content”, as shown in



**Abbildung 3: ER-Modell der Datenbank (vereinfacht)**  
**Figure 3: Entity relationship model of the data base (simplified)**

„criterion“, wie in Abbildung 3 gezeigt. In der Tabelle „item“ wird jedem Begriff eine „item\_ID“, der „name“, die „description“, „unit“ und der zuvor erwähnte Eintragstag zugewiesen. „rating“ enthält die „rating\_ID“, die „Gegenstands und Kriteriums ID“, das „rating“ mit Minimal- und Maximalwert und das Eintragstag. „criterion“ enthält „criterion\_ID“, „name“, „description“ und Eintragstag. „specialisation“ enthält die ID, Überbegriff und Spezialisierungen, eine „annotation“ und das Eintragstag. Über die Spezialisierungen enthält die Datenbank eine Art Hierarchie. Auf diese Weise wird ersichtlich, welche Stoffe Spezialisierungen anderer Werkstoffe sind. Mittels der Tabelle „content“, bestehend aus „content\_ID“, „item\_part“, „item\_total“, „factor\_min“, „factor\_max“, „description“ und dem Eintragstag, lassen sich Inhaltsstoffe inklusive der Menge pro Einheit angeben. Auf diese Weise erkennt man auch in der Datenbank schnell, dass z.B. „Leichtbeton“ eine Spezialisierung von „Normalbeton“ darstellt und aus den Inhaltsstoffen „Zement“, „Leichtzuschlag“, „Sand“ und „Wasser“ besteht. Auch die ungefähren Dosierungen pro Einheit sind sofort ersichtlich. Über die Schaltfläche „Beurteilungen“ erhält man dann die Ökodaten zu den verschiedenen Kriterien. Es ist zudem möglich, Datensätze direkt mit den zugehörigen Dokumenten in der Dokumentenliste zu verlinken, um so einfach und schnell Hintergrundinformationen zu den gelieferten Zahlenwerten zu erhalten.

### Literatur / References

- [1] <http://www.w3.org/RDF/>
- [2] <http://www.w3.org/2004/02/skos/>

figure 3. In table “item”, any entry is allocated to an “item\_ID”, a “name”, “description”, “unit” and an entry tag, as mentioned before, is allocated to any entry automatically. “rating” contains the “rating\_ID”, the “item\_ID”, “criterion\_ID”, “rating” with minimum and maximum value and the entry tag. “criterion” contains “criterion\_ID”, “name”, “description” and entry tag. “specialisation” contains the ID, general and special material, an “annotation” and the entry tag. Again, due to the specialisations there is some sort of hierarchy in the data base. This way it can be seen easily, which material is a specialisation of another basic material. Via the table “content”, containing “content\_ID”, “item\_part”, “item\_total”, “factor\_min”, “factor\_max”, “description” and the entry tag, ingredients including their quantity can be declared. By doing so, you can select for example “concrete” in the database and get the information, that “lightweight concrete” is a specialisation of “normal weight concrete” consisting of cement, lightweight aggregate, sand and water. Masses of the different ingredients can also be found by using the “ingredients” button. By clicking the “criteria” button, values for the 15 criteria are given. It is possible to link items directly with concerning documents in the document list to offer background information to the displayed values fast and simple.

## DER INSTRUMENTIERTE AUSBREITISCH ZUR BESTIMMUNG DER SELBSTVERDICHTUNG

### THE INSTRUMENTED FLOW TABLE AS INDICATOR FOR SELF-COMPACTIBILITY

von/by: A. Huß <sup>1)</sup>, H.-W. Reinhardt

<sup>1)</sup> Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart - Otto-Graf-Institut (FMIPA)

#### Zusammenfassung

Der Beitrag berichtet über die Untersuchung des Fließverhaltens von Selbstverdichtendem Beton mit gebrochenen Zuschlägen. Dazu wurde ein mit Sensoren bestückter Ausbreittisch verwendet. Aus den Signalen während des Setzfließversuchs konnten zwei charakteristische Parameter abgeleitet werden, die das Fließverhalten gut beschreiben. Die Korrelation mit Messungen in einem Beton-Rheometer ist als signifikant zu bezeichnen.

#### Einleitung

Zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (SVB) wurden mit einem instrumentierten Ausbreittisch mit eingebetteten Sensoren die Fließkurven beim Setzfließversuch aufgezeichnet. Da beim manuellen Anheben des Setztrichters immer gewisse Schwankungen auftreten, wurde im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen das Fließverhalten erst ab Erreichen eines Setzfließdurchmessers von 400 mm betrachtet.

Abb. 1 zeigt den Ausbreittisch mit den Sensoren, die auf zwei rechtwinklig zueinander stehenden Diagonalen angebracht sind. Wenn der Beton einen Sensor überstreicht, wird ein Zeit- und Ortssignal ausgelöst. Die vier gemittelten Signale dienen mit den unten angegebenen Formeln der weiteren Auswertung. In den Abb. 2 und 3 sind die Fließkurven der untersuchten SVB dargestellt.

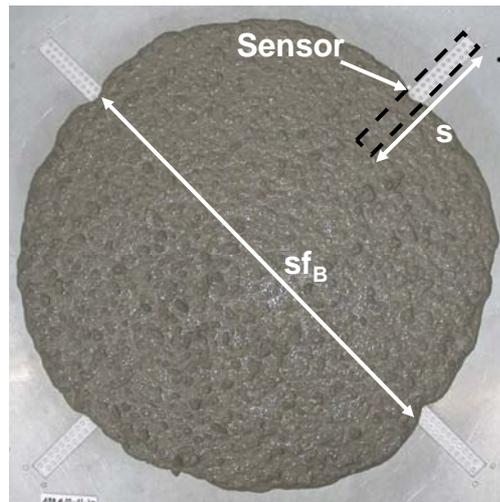
#### Abstract

The contribution reports on the investigation of the flow behavior of Self-Compacting concrete with crushed aggregates. To this end, a flow table with embedded sensors has been used. The signals from the slump-flow test allowed to derive two parameters which characterize the flow behavior accurately. The correlation with measurements in a concrete rheometer was significant.

#### Introduction

For a more accurate description of the rheological properties of Self-compacting Concrete (SCC), flow curves were recorded during a slump-flow test performed on an automatic flow table with embedded sensors. Since certain fluctuations invariably occur during manual lifting of the slump funnel, the flow behavior was considered only from the point when a slump diameter of 400 mm was reached.

Fig.1 shows the flow table with the sensors, which are located on two orthogonal diagonals. When the concrete passes a sensor a time and space signal is generated. The four averaged signals serve as the basis for the analysis with the formulas given below. Figs. 2 and 3 show the flow curves of the SCCs tested.

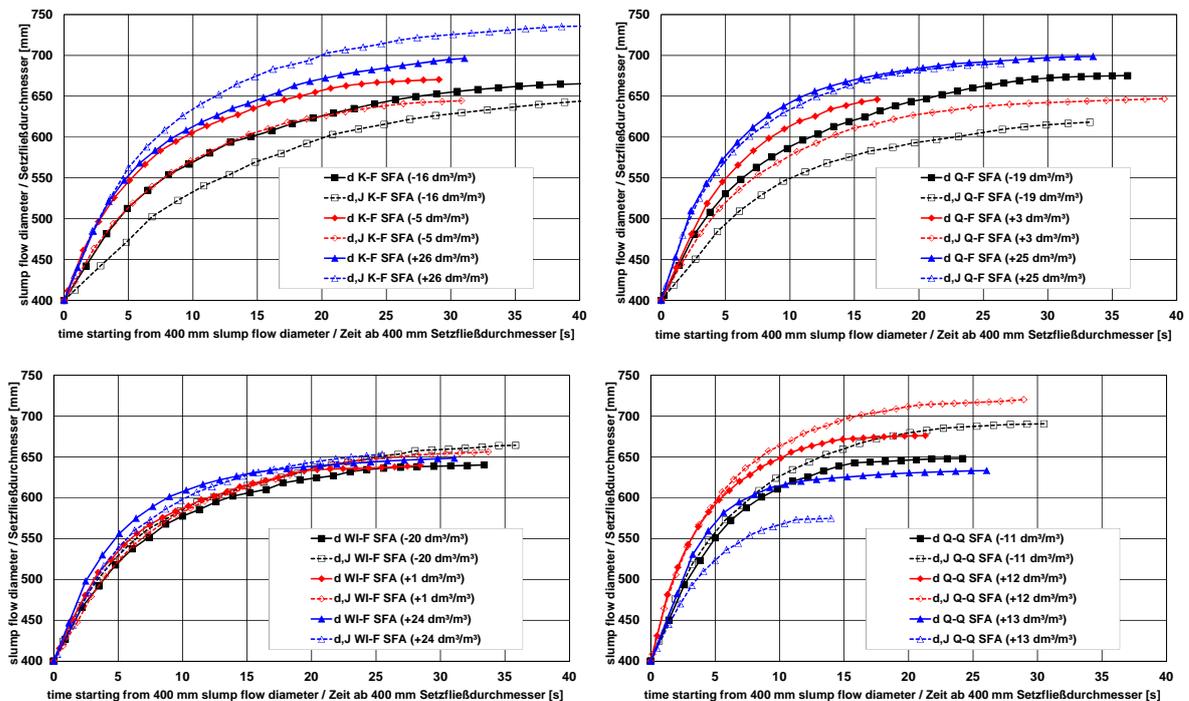


**Abbildung 1:** Instrumentierter Ausbreitisch

Messbereich: Setzfließdurchmesser  $sf_B = 400$  bis  $800$  mm; Fließweg  $s = 0$  bis  $200$  mm

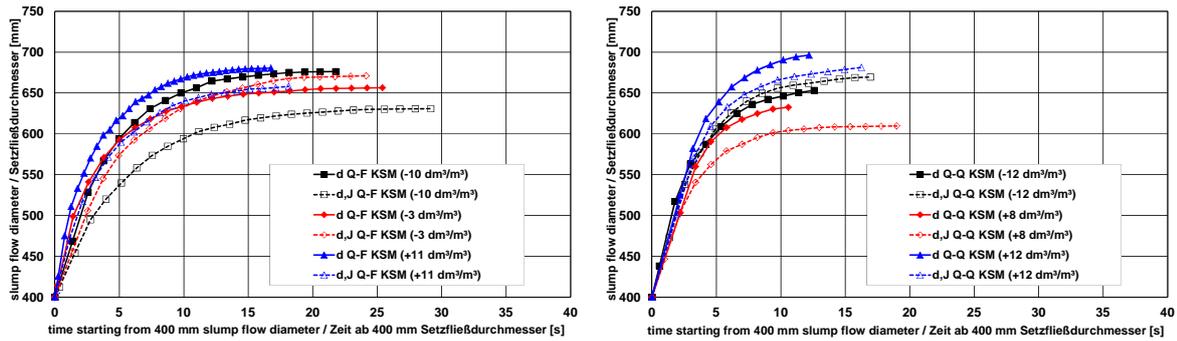
**Figure 1:** Automatic flow table

Measuring range: slump flow diameter  $sf_B = 400$  to  $800$  mm; flow path  $s = 0$  to  $200$  mm



**Abbildung 2:** Fließkurven beim Setzfließversuch nach SVB-Richtlinie [1] der SVB mit Kies/Flusssand (K-F), Quarzporphyr-Splitt/Flusssand (Q-F), Muschelkalk-Splitt/Flusssand (WI-F) und Quarzporphyr-Splitt/Brechsand (Q-Q) bei Variation der Leimmenge ohne (d) und mit Blockierring (d,J). Die Zeitmessung beginnt mit Erreichen des Setzfließdurchmessers von  $400$  mm. Betonzusatzstoff: Steinkohlenflugasche (SFA).

**Figure 2:** Flow curves recorded during the slump-flow test in accordance with the SCC Guideline [1] for the SCCs with gravel/fluvial sand (K-F), quartz porphyry chippings/fluvial sand (Q-F), shell limestone/fluvial sand (WI-F) and quartz porphyry chippings/crushed sand (Q-Q) when varying the paste volume with (d,J) and without (d) blocking ring. Time recording started when the slump diameter reached  $400$  mm. Concrete addition: Hard coal flyash (CFA).



**Abbildung 3:** Fließkurven beim Setzfließversuch nach SVB-Richtlinie [1] der SVB mit Quarzporphyr-Splitt/Flusssand (Q-F) und Quarzporphyr-Splitt/Brechsand (Q-Q) bei Variation der Leimmenge ohne (d) und mit Blockierring (d,J). Die Zeitmessung beginnt mit Erreichen des Setzfließdurchmessers von 400 mm. Betonzusatzstoff: Kalksteinmehl (KSM).

**Figure 3:** Flow curves recorded during the slump test in accordance with the SCC Guideline [1] for the SCCs with quartz porphyry chippings/fluvial sand (Q-F) and quartz porphyry chippings/crushed sand (Q-Q) when varying the paste volume with (d,J) and without (d) blocking ring. Time recording started when the slump diameter reached 400 mm. Concrete additive: Limestone dust (LSD).

**Auswertung der Setzfließkurven**

Die mit dem instrumentierten Ausbreittisch gemessenen Setzfließkurven lassen sich in sehr guter Näherung (Bestimmtheitsmaß  $\geq 99\%$ ) durch Gleichung (1) approximieren. Dabei beschreibt der Fließweg  $s(t)$  die Ausbreitung des Betons in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  nach Erreichen des Radius  $r$  von 200 mm.

$$s(t) = \alpha \cdot (1 - \exp(-t/\beta)) \tag{1}$$

mit

- $t$  [s] = Zeit ab  $r = 200$  mm,
- $s$  [mm] = Fließweg ab  $r = 200$  mm,
- $\alpha = 1/2 \cdot (sf - 400)$  [mm],
- $sf$  [mm] = Setzfließmaß beim Setzfließversuch nach [1] ohne Blockierring
- $\beta$  [s] = Setzfließkoeffizient zur Beschreibung der Dämpfung der Fließkurve.

Bei vereinfachter Betrachtung von SVB als Bingham-Medium wird an dem Modell und der Beziehung zwischen Schergeschwindigkeit  $d\gamma/dt$  und Fließspannung  $\tau$  in Abb. 4 deutlich, dass die Fließbewegung dann zum Stillstand kommt, wenn die Fließspannung gleich der Fließgrenze  $\tau_0$  ist. Aus diesem vereinfachten Ansatz lässt sich ableiten,

**Analysis of slump flow curves**

Equation (Eq. 1) can be used to achieve a very good approximation of the slump-flow curves measured using the automatic flow table (coefficient of determination  $\geq 99\%$ ). In this calculation, the flow path  $s(t)$  describes the spread of the concrete depending on the time  $t$  after reaching a radius  $r$  of 200 mm.

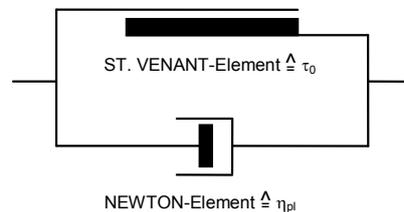
$$s(t) = \alpha \cdot (1 - \exp(-t/\beta)) \tag{1}$$

where

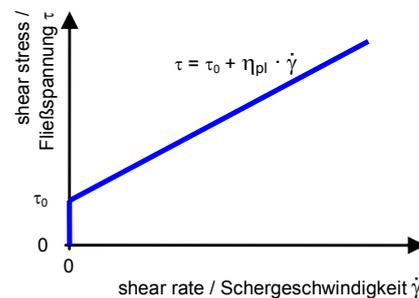
- $t$  [s] = time from  $r = 200$  mm,
- $s$  [mm] = flow path from  $r = 200$  mm,
- $\alpha = 1/2 \cdot (sf - 400)$  [mm],
- $sf$  [mm] = slump flow in slump test according to [1] without J-ring,
- $\beta$  [s] = slump flow coefficient to describe flow curve damping.

When applying the simplified model of a Bingham body to SCC, the model and the relationship between shear rate  $d\gamma/dt$  and shear stress  $\tau$  shown in Fig. 4 demonstrate that the flow motion comes to a halt when the shear stress equals the yield value  $\tau_0$ . This simplified model makes it possible to determine that the time that elapses until the spread of the SCC comes to a halt is solely

dass die Zeit, bis der SVB zum Stillstand kommt, allein von der Verzögerung der Scherbewegung abhängig ist.



dependent on the delay of the shear movement.



**Abbildung 4:** Bingham-Körper aus Parallelschaltung eines Reibungselementes (St. Venant-Element) und eines Dämpfungselementes (Newton-Element).

**Figure 4:** Bingham body created by a parallel arrangement of a friction element (St. Venant element) and a damping element (Newtonian element).

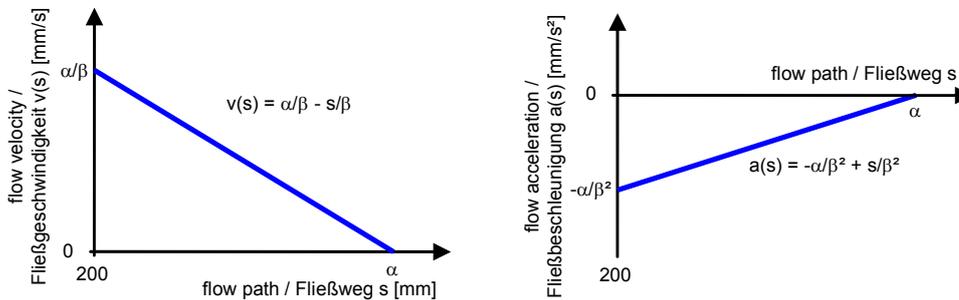
Die Schergeschwindigkeit wird bei den weiteren Überlegungen als Funktion der Fließgeschwindigkeit des SVB beim Setzfließversuch ohne Blockierring betrachtet. Beim numerischen Differenzieren der ungeglätteten Fließkurve ab dem betrachteten Setzfließdurchmesser von 400 mm wurde eine weitgehend gleichförmig verzögerte Fließbewegung festgestellt. Daher wird angenommen, dass bei Erreichen des Durchmessers von 400 mm die Fließbeschleunigung aufgrund der Einwirkung der Schwerkraft gegenüber der durch die Viskosität des SVB hervorgerufenen Fließverzögerung vernachlässigbar ist. Diese Feststellung gilt für die mit umgedrehtem Setztrichter durchgeführten Setzfließversuche.

Die Fließgeschwindigkeit  $v(t)$  am Rand des fließenden Betons zum Zeitpunkt  $t$  nach Erreichen des Durchmessers von 400 mm ergibt sich gemäß Gleichung (2) durch Differenzieren von Gleichung (1). Durch nochmaliges Differenzieren erhält man die als Fließverzögerung bezeichnete negative Fließbeschleunigung  $a(t)$  gemäß Gleichung (3). Die Beschreibung der Fließkurve durch die gewählte Exponentialgleichung ergibt gemäß den Gleichungen (4) und (5) den in Abb. 5 schematisch dargestellten linearen Zusam-

In further considerations, the shear rate is seen as a function of the flow rate of the spreading mass during the slump test without J-ring. A flow motion that decelerated in a largely uniform fashion was found when numerically differentiating the unsmoothed flow curve from the slump flow diameter of 400 mm considered. It is assumed, therefore, that the flow acceleration that occurs as a result of the gravity effect is negligible when arriving at the diameter of 400 mm compared to the flow deceleration caused by the viscosity of the SCC. This assumption applies to the slump tests carried out with the reversed slump funnel.

The flow velocity  $v(t)$  measured on the edge of the spreading concrete at the time  $t$  after having reached the diameter of 400 mm is calculated using equation (2) by differentiating equation (1). Another differentiation step results in the negative flow acceleration  $a(t)$ , which is termed flow deceleration, using equation (3). Using equations (4) and (5), the description of the flow curve by the selected exponential equation leads to the linear correlation between flow velocity  $v(s)$ , or flow acceleration  $a(s)$  and the flow path  $s$ , as shown in the schematic representation in Fig. 5.

menhang zwischen der Fließgeschwindigkeit  $v(s)$  bzw. der Fließbeschleunigung  $a(s)$  und dem Fließweg  $s$ .



**Abbildung 5:** Grafische Darstellung der Fließgeschwindigkeit  $v(s)$  bzw. der Fließbeschleunigung  $a(s)$  in Abhängigkeit vom Fließweg  $s$  beim Setzfließversuch ab einem Radius von 200 mm.

**Figure 5:** Diagram of flow velocity  $v(s)$ , or flow acceleration  $a(s)$ , as a function of the flow path in the slump test from a radius of 200 mm.

Da die Fließgeschwindigkeit bzw. die Fließbeschleunigung bei Betrachtung über dem Fließweg direkt von dem Faktor  $\beta$  abhängig ist, wird der Koeffizient  $\beta$  als Frischbetonkennwert für die Dämpfung bzw. die effektive Viskosität  $\eta_{eff}$  der Fließbewegung beim Setzfließversuch ohne Blockierring interpretiert. Der Koeffizient  $\beta$  wird im Weiteren als Setzfließkoeffizient bezeichnet.

Since the flow velocity, or flow acceleration, directly depends on the factor  $\beta$  when seen as a function of the flow path, the coefficient  $\beta$  is interpreted as a fresh concrete parameter for the damping or the effective viscosity  $\eta_{eff}$  of the flow motion that occurs in the slump test without J-ring. The coefficient  $\beta$  is referred to as slump flow coefficient in the following sections.

$$v(t) = ds/dt = \alpha / \beta \cdot \exp(-t / \beta) \tag{2}$$

$$v(t) = ds/dt = \alpha / \beta \cdot \exp(-t / \beta) \tag{2}$$

$$a(t) = dv/dt = - \alpha / \beta^2 \cdot \exp(-t / \beta) \tag{3}$$

$$a(t) = dv/dt = - \alpha / \beta^2 \cdot \exp(-t / \beta) \tag{3}$$

$$v(s) = \alpha / \beta - s / \beta \tag{4}$$

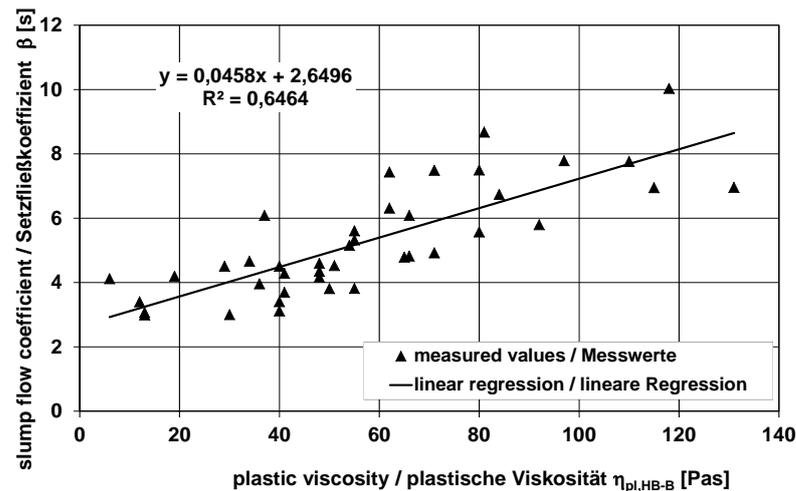
$$v(s) = \alpha / \beta - s / \beta \tag{4}$$

$$a(s) = \alpha / \beta^2 - s / \beta^2 \tag{5}$$

$$a(s) = \alpha / \beta^2 - s / \beta^2 \tag{5}$$

Der Zusammenhang zwischen dem Setzfließkoeffizienten  $\beta$  und der im BTRHEOM bestimmten plastischen Viskosität  $\eta_{pl,HB-B}$  ist in Abb. 6 für alle im Rahmen der Untersuchungen bestimmten Wertepaare dargestellt. BTRHEOM ist ein Beton-Rheometer, der am LCPC in Paris entwickelt wurde [2].

Fig. 6 shows the correlation between the slump flow coefficient  $\beta$  and the plastic viscosity  $\eta_{pl,HB-B}$  determined in the BTRHEOM for all pairs of values calculated in the tests. BTRHEOM is a rheometer developed at LCPC in Paris [2].



**Abbildung 6:** Grafische Darstellung des Setzfließkoeffizienten  $\beta$  aus der Auswertung der Fließkurven beim Setzfließversuch ohne Blockierring in Abhängigkeit von der plastischen Viskosität  $\eta_{pl,HB-B}$  aus den Fließkurven beim Rheometerversuch im BTRHEOM. Dargestellt sind alle 41 im Rahmen der Untersuchungen geprüften Wertepaare.

**Figure 6:** Diagram showing the slump flow coefficient  $\beta$  resulting from the analysis of the flow curves during the slump test without J-ring in relation to the plastic viscosity  $\eta_{pl,HB-B}$  derived from the flow curves recorded in the BTRHEOM rheometer test. All 41 pairs of values are shown that were verified as part of the tests.

Die Wertepaare beinhalten blockierende und nicht blockierende SVB, SVB mit Fluss- oder Brechsand, KSM oder SFA als Betonzusatzstoff sowie Kies oder Splitt als grobe Gesteinskörnungen. Vor diesem Hintergrund ist tendenziell ein linearer Zusammenhang zwischen dem Setzfließkoeffizienten  $\beta$  und der im BTRHEOM bestimmten plastischen Viskosität zu erkennen. Zur Verifizierung des Zusammenhangs stehen noch gezielte Versuchsreihen mit Mehrfachversuchen des jeweiligen Prüfverfahrens aus. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Setzfließversuch aufgrund der einfacheren und schnelleren Durchführung eine geringere Prüfstreuung als die Prüfung im BTRHEOM aufweist. Zudem stellt der Setzfließversuch gemäß SVB-Richtlinie [1] das praxistgerechtere Prüfverfahren dar.

Die Prüfung des Setzfließmaßes hat gegenüber der Prüfung im BTRHEOM den Vorteil, dass sie unempfindlich gegenüber Sedimentation ist. Dadurch konnten auch SVB ge-

The pairs of values include blocking and non-blocking SCCs, SCCs with fluviial and crushed sand, LSD or CFA as additions, and gravel and chippings as coarse aggregates. Against this background, a tendency towards a linear correlation between the slump flow coefficient  $\beta$  and the plastic viscosity measured in the BTRHEOM can be identified. Targeted series of tests that include multiple tests for each method are still required to verify the correlation. However, it can be assumed, on the basis of the experience gained to date, that the slump test shows a smaller variance than the BTRHEOM test due to its easier and quicker completion. Moreover, the slump test in accordance with the SCC Guideline [1] is better suited to practical needs.

Compared to the BTRHEOM test, the slump flow test provides the advantage that it is insensitive to sedimentation. For this reason, the tests also included SCCs that were susceptible to dynamic sedimentation in the rheometer. The existing set of data was in-

prüft werden, die zu dynamischer Sedimentation im Rheometer neigten. Inwiefern der Setzfließkoeffizient als Zielgröße für die Festlegung der Frischbetoneigenschaften von SVB geeignet ist bzw. in welchem Bereich der Setzfließkoeffizient – u.a. auch im Hinblick auf das Setzfließmaß – für einen praxisgerechten SVB liegen sollte, konnte anhand der vorliegenden Datenbasis nicht geklärt werden.

### Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich aus den vorliegenden Überlegungen und Untersuchungen folgende Schlussfolgerung ziehen:

Das Fließverhalten von SVB wurde mit Hilfe von Sensoren im Ausbreittisch beim Setzfließversuch nach der SVB-Richtlinie [1] untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Fließkurve ab einem Durchmesser von rd. 400 mm sehr gut durch Gleichung (1) approximiert werden kann. Anhand der angestregten Überlegungen und den Vergleichen mit der im Rheometer (BTRHEOM [2]) bestimmten plastischen Viskosität kann die Dämpfung der Fließbewegung mit dem eingeführten Setzfließkoeffizienten  $\beta$  aus dem Setzfließversuch beschrieben werden.

Für weitere Informationen siehe [3].

### Literatur / References

- [1] **DAfStb (2003):** Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Ausgabe 2003-11
- [2] **Centre d'Études techniques de l'Équipement CETE Normandie Centre (2009):** BTRHEOM. Mesure des propriétés rhéologiques des bétons. <http://media.lcpc.fr/ext/pdf/prod/mlpc/btrheom.pdf>, 18.01.2009
- [3] **Huß, A.; Reinhardt, H.W. (2009):** SVB vom Mehlkorntyp mit gebrochener Gesteinskörnung – Entwurfskonzept und Fließigenschaften von SVB. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 75 (2009), H. 8, S. 4-12 und H. 9, S. 22-34

sufficient to determine the extent to which the slump flow coefficient is appropriate as a target parameter to define the fresh concrete properties of SCC, or the range in which the slump flow coefficient should lie with a view to producing an SCC that fulfils all practical requirements.

### Summary and outlook

In summary, the following conclusion can be drawn:

During the slump test in accordance with the SCC Guideline [1], the flow behavior of SCC was tested by means of sensors located in the flow table. It was found that the flow curve can be approximated very accurately by equation (1) from a diameter of about 400 mm. On the basis of the above considerations and comparisons with the plastic viscosity measured in the rheometer (BTRHEOM [2]), the damping of the flow motion can be described using the slump flow coefficient  $\beta$  introduced from the slump test.

For more information see [3].

## PHONOLIT UNTERDRÜCKT ALKALI-KIESELSÄURE-REAKTION PHONOLITE SUPPRESSES ALKALI-SILICA REACTION

von/by: O. Mielich <sup>1)</sup>, H.-W. Reinhardt

<sup>1)</sup> Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Otto-Graf-Institut

### Zusammenfassung

Der Aufsatz berichtet über eine Versuchsreihe mit drei sog. slow/late Gesteinskörnungen und zwei Bindemitteln. Die Bindemittel sind einmal Portlandzement CEM I und andererseits eine Mischung aus CEM I und Phonolit, die als CEM II bezeichnet wird. Proben wurden 560 Tage in der 40°C Nebelkammer gelagert. Quellen aufgrund von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR), Rissbildung und dynamischer Elastizitätsmodul wurden im Verlauf der Lagerung gemessen. Es zeigte sich, dass Phonolit die AKR unterdrücken kann.

### Einleitung

Wenn alkaliempfindliche Gesteinskörnungen in Beton verwendet werden, kann es zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) kommen. Die Voraussetzungen dazu sind ein entsprechendes Alkaliangebot im Beton, Zufuhr von Wasser und eventuell zusätzlich Alkalien von außen in Form von Taumitteln oder Meerwasser. Die bekanntesten schnell reagierenden Gesteine sind Flint, Kieselschiefer und Opal. Es gibt jedoch Gesteinstypen, die erst nach 10 bis 20 Jahren im Beton reagieren, die sog. slow/late Gesteine Grauwacke, Rhyolith, Quarzit, Andesit u.a. Mit diesen Gesteinstypen wurde ein Versuchsprogramm durchgeführt, in dem auch die Wirkung von Phonolit untersucht werden sollte.

### Charakteristische Eigenschaften von Phonolit

Der in diesem Beitrag verwendete Zusatzstoff Phonolith ist ein natürlich getempertes Puzzolan vulkanischen Ursprungs. Der Ausgangsstoff ist ein tertiäres Eruptivgestein und besteht hauptsächlich aus den Mineralien Kalifeldspat, Sodalith/Zeolith, Pyroxen,

### Abstract

The paper reports on a test series with three so-called slow/late aggregates and two binders. The binders are, first, Portland cement CEM I and, second, a mixture of CEM I and phonolite which is called CEM II. Specimens were stored in a 40°C fog room. Expansion due to alkali-silica reaction (ASR), crack formation, and dynamic modulus of elasticity as function of storage time were measured. It turned out that phonolite could suppress ASR.

### Introduction

When alkali-sensitive aggregates are used in concrete, alkali-silica reaction (ASR) can occur. As requirements can be mentioned a certain alkali content in the concrete, water supply and eventually additional alkalines from the exterior in form of deicing salts or seawater. The best known rapid reacting aggregates are flintstone, chert and opal. However, there are types of aggregates which react only after 10 to 20 years in concrete, the so-called slow/late aggregates greywacke, rhyolite, quartzite, andesite etc. With such types of aggregate a testing programme was carried out in which also the action of phonolite should be investigated.

### Characteristic properties of phonolite

The here used supplementary cementitious materials (SCM) phonolite is a natural calcined pozzolana of volcanic origin. The raw material is a tertiary volcanic rock and consists mainly of the minerals potash feldspar, sodalite/zeolite, pyroxene, wollastonite and very small quantities of calcite. The chemical main components are essentially SiO<sub>2</sub> and

Wollastonit und einem geringen Anteil von Calcit. Die chemischen Hauptkomponenten sind im wesentlichen SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, wobei der Gehalt an reaktivem SiO<sub>2</sub> mindestens 25 M.-% beträgt. Phonolith wird am Kaiserstuhl (Deutschland) abgebaut, aufbereitet und nach Temperung (450°C) fein vermahlen. Die spezifische Oberfläche des Zusatzstoffes beträgt 500 m<sup>2</sup>/kg ± 50 m<sup>2</sup>/kg.

**Versuchsprogramm**

Als slow/late Gesteine wurden Grauwacke, Quarzporphyr und Edelsplitt vom Oberrhein verwendet. Die Zusammensetzung der Betone ist aus Tabelle 1 ersichtlich.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in which the content of reactive SiO<sub>2</sub> being at least 25 % by mass. Phonolite is extracted at the Kaiserstuhl (Germany), pre-processed and after thermal treatment (450°C) finely divided by grinding. The specific surface of the SCM is 500 m<sup>2</sup>/kg ± 50 m<sup>2</sup>/kg.

**Testing programme**

As slow/late material greywacke, quartz porphyry and crushed gravel from Upper Rhine has been used. The composition of the concretes can be seen in Table 1.

**Tabelle 1: Zusammensetzung der Betone**  
**Table 1: Composition of concrete mixes**

Concrete indicator	Aggregate	Storage 40 °C fog room	Cement			w/c ratio	Grading curve	Aggregate proportion <sup>1)</sup> Vol.-%
			Designation	Amount kg/m <sup>3</sup>	Total alkali content M.-% Na <sub>2</sub> O <sub>equ.</sub>			
CEM I GW	crushed greywacke	x	CEM I 32.5 R	400	1.24	0.45	A/B 16	30 + 70
CEM II GW		x	CEM II/B-Q 32.5 R (V)		3.5			
CEM I QP	crushed quartz porphyry	x	CEM I 32.5 R		1.24			
CEM II QP		x	CEM II/B-Q 32.5 R (V)		3.5			
CEM I UR	crushed gravel from Upper Rhine	x	CEM I 32.5 R		1.24			
CEM II UR		x	CEM II/B-Q 32.5 R (V)		3.5			

<sup>1)</sup> 30 Vol.-% non reactive sand, 70 Vol.-% reactive aggregates

Der Portlandzement CEM I hat ein Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 1,24 M.-%. Der CEM II wurde durch Mischen von 70 M.-% Portlandzement und 30 M.-% Phonolitmehl hergestellt und hatte einen Gesamtalkaligehalt von 3,5 M.-%, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Alkalien des Phonolit fest in den Mineralien gebunden sind. Die Proben wurden bei 40°C in der Nebelkammer bis zu 560 Tagen gelagert. Die Zuschläge bestanden aus 30 Vol.-% inertem Sand und 70 Vol.-% reaktivem Gestein.

The Portland cement CEM I has a Na<sub>2</sub>O equivalent of 1.24 % by mass. The CEM II has been prepared by mixing of 70 % by mass Portland cement and 30 % by mass phonolite powder. It had a total alkali content of 3.5 % by mass. However, it must be considered that the alkalines of phonolite are bound firmly in the minerals. The specimens were exposed in a fog room at 40°C up to 560 days. The aggregates consisted of 30 % by vol. inert sand and 70 % reactive rock.

An 100 mm x 100 mm x 500 mm großen Prismen wurden die Dehnung und der dynamische Elastizitätsmodul gemessen.

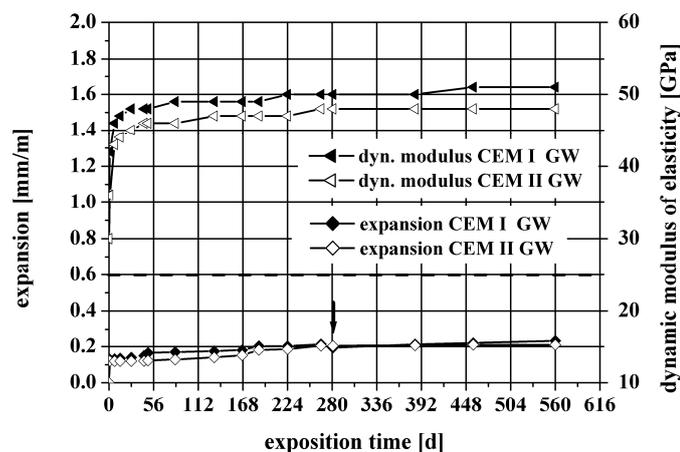
### Ergebnisse

Abb. 1 zeigt die Dehnung und den dynamischen E-Modul als Funktion der Auslagerungsdauer von Beton mit Grauwacke als Zuschlag. Die Kurven entstanden jeweils aus den Ergebnissen von drei Prüfkörpern.

Prisms with the dimensions of 100 mm x 100 mm x 500 mm are used for the determination of the expansion and of the dynamic modulus elasticity.

### Results

Fig. 1 shows the expansion and the dynamic modulus of elasticity as function of the exposure time of concrete with greywacke as aggregate. The curves represent the mean values of three specimens.



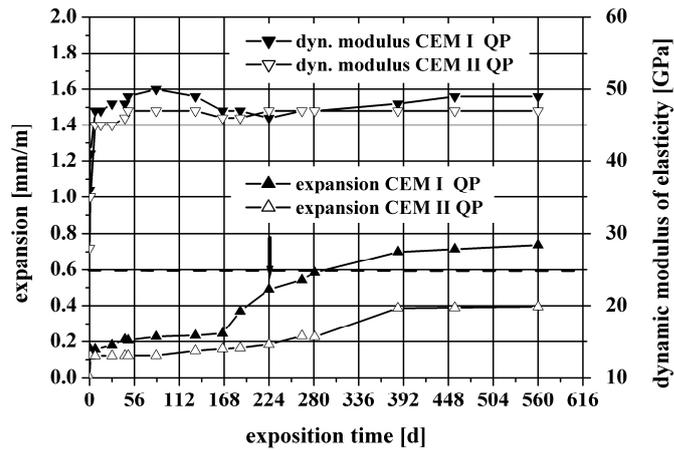
**Abbildung 1:** Dehnung und dynamischer E-Modul von Beton mit Grauwacke mit CEM I und CEM II  
**Figure 1:** Expansion and dynamic modulus of elasticity of greywacke concrete with CEM I and CEM II

Die vollen Punkte gehören zum Beton mit CEM I während die offenen Punkte zum Beton mit Phonolit gehören. Der Pfeil markiert den Zeitpunkt, zu dem ein Riss  $\geq 0,2$  mm an einem gleich gelagerten Würfel mit 300 mm Kantenlänge entstand. Dies geschah nach 280 Tagen. Die Dehnungen sind klein und erreichen nur 0,2 mm/m nach 560 Tagen. Das Kriterium für alkaliempfindliche Gesteinskörnungen nach Alkali-Richtlinie [1] beträgt 0,6 mm/m. Der dynamische E-Modul steigt in den ersten 28 Tagen steil an, was auf die fortlaufende Hydratation zurückzuführen ist. Danach nimmt der E-Modul nur noch geringfügig zu.

Abb. 2 zeigt ein analoges Diagramm für Beton mit Quarzporphyr als Zuschlag.

The full dots belong to the concrete with CEM I while the open dots belong to the concrete with CEM II. The arrow marks the time when a crack with  $\geq 0.2$  mm width appeared at the edge of the 300 mm cube. This happened at 280 days storage on the CEM I concrete only. The expansion is small and reaches 0.2 mm/m after 560 days. The criterion for alkali sensitive aggregates according to DAfStb-Guideline [1] is 0.6 mm/m which is not reached with the two concretes tested. The lines of the dynamic modulus of elasticity show a steep increase during the first 28 days which is the result of the continuing hydration. Thereafter, only a small increase can be seen.

Fig. 2 shows an analogous graph for the concretes made of quartz porphyry aggregates and with CEM I and CEM II.



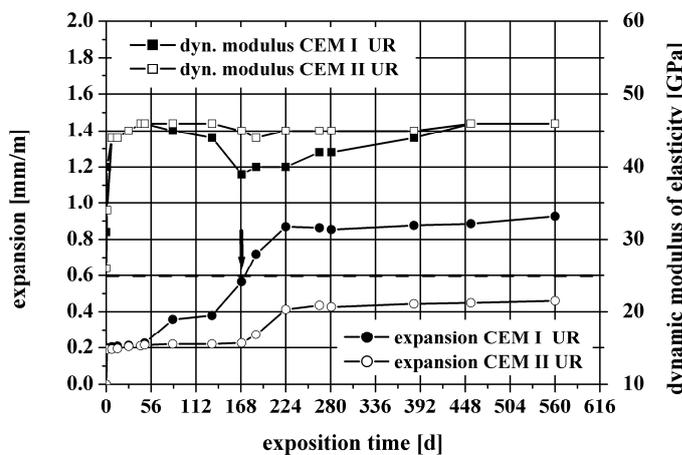
**Abbildung 2:** Dehnung und dynamischer E-Modul von Beton mit Quarzporphyr mit CEM I und CEM II  
**Figure 2:** Expansion and dynamic modulus of elasticity of quartz porphyry concrete with CEM I and CEM II

Während der Beton mit CEM I den kritischen Wert von 0,6 mm/m nach 280 Tagen erreicht, bleibt der Beton mit CEM II immer darunter. Rissbildung trat nach 224 Tagen bei Beton mit CEM I auf. Der dynamische E-Modul nimmt anfänglich zu, nimmt zwischenzeitlich ab und bleibt danach fast konstant.

While the expansion of the concrete with Portland cement reaches the critical value of 0.6 mm/m after 280 days, the concrete with CEM II stays always below the critical value. It shows also a crack  $\geq 0.2$  mm after 224 days. The dynamic modulus of elasticity grows during the first days, decreases then a little and stays almost constant during the remainder of the test.

Abb. 3 gibt die Ergebnisse Edelsplitt wieder. Die Dehnung mit CEM I-Beton nimmt zunächst wenig, aber ab 140 Tagen steil zu bis 224 Tagen und verhardt dann. Rissbildung trat nach 168 Tagen auf.

Fig. 3 gives the results for the crushed gravel concretes. The expansion curve of the CEM I concrete shows a slow increase up to 140 days, then a steep increase up to 224 days whereafter it stays constant. Cracking occurs after 168 days.



**Abbildung 3:** Dehnung und dynamischer E-Modul von Beton mit Edelsplitt mit CEM I und CEM II  
**Figure 3:** Expansion and dynamic modulus of elasticity of crushed gravel concrete with CEM I and CEM II

Der Beton mit CEM II bleibt während des gesamten Versuchszeitraums unter der kritischen Grenze von 0,6 mm/m. Der dynamische E-Modul von CEM I-Beton nimmt im Zeitraum von 120 bis 240 Tagen deutlich ab und nimmt dann wieder zu, bis er den Wert von CEM II-Beton erreicht.

### **Diskussion der Ergebnisse**

#### *Dehnung und Rissbildung*

Die geprüften Betone mit den drei slow/late Gesteinen zeigen ein unterschiedliches Verhalten, wenn man die Dehnungen betrachtet. Beim Grauwacke-Beton blieben die Dehnungen immer unter dem kritischen Wert von 0,6 mm/m, sowohl mit CEM I wie mit CEM II. Bei den Betonen mit Quarzporphyr und Edelsplitt wurde der kritische Wert deutlich überschritten, wenn CEM I verwendet wurde. Mit CEM II blieben die Dehnungen darunter. Nach Alkali-Richtlinie sind die zwei Zuschläge Quarzporphyr und Edelsplitt des Oberrheins also alkaliempfindlich. Grauwacke ist hinsichtlich der Dehnungen nicht verdächtig, aber die Richtlinie besagt ausdrücklich, dass alle Kriterien bewertet werden müssen, d.h. die Rissbildung am Würfel ist in diesem Fall kennzeichnend für die Alkaliempfindlichkeit der Grauwacke.

#### *Dynamischer Elastizitätsmodul*

Der dynamische Elastizitätsmodul verläuft bei Grauwacke- und Quarzporphyrbeton kontinuierlich und erwartungsgemäß. Aufgrund der zunehmenden Hydratation steigt der E-Modul in den ersten Wochen stark an und bleibt danach auf einem hohen Niveau. Beim Edelsplittbeton nimmt er zunächst auch zu, fällt dann aber ab und erreicht den tiefsten Wert zum Zeitpunkt der Rissbildung am Würfel. Danach steigt er wieder an. Diese Erscheinung gilt bei CEM I, während mit CEM II kein Einbruch auftritt. Nach einem Vorschlag von Siebel & Dahms [2] werden

The line of the CEM II cement stays always below the critical mark of 0.6 mm/m. The dynamic modulus of elasticity of the CEM I concrete shows some reverse sign of the expansion curve since it decays when the expansion increases strongly.

### **Discussion of the results**

#### *Expansion and crack formation*

The tested concrete with three slow/late aggregates show a different behaviour if one considers the strains. With greywacke concrete the expansions stay always below the critical value of 0.6 mm/m with CEM I and CEM II. The concretes with quartz porphyry and crushed gravel surpasses the critical value considerably with CEM I. With CEM II the expansions stay below the critical value. According to the alkali guideline, the two aggregates quartz porphyry and crushed gravel of the Upper Rhine valley are alkali-sensitive. Greywacke is not suspicious with respect to the expansion, but the guideline expresses particularly that all criteria have to be assessed, i.e. the crack formation on the cube is representative for the alkali-sensitivity of greywacke.

#### *Dynamic modulus of elasticity*

The dynamic modulus of elasticity shows a continuous line for greywacke and quartz porphyry concrete which follows the expectations. Due to the continuing hydration the elastic modulus increases strongly in the first weeks and stays then at a high level. The crushed gravel concrete shows a similar behaviour but decreases after a while and reaches the lowest value at the time of crack formation on the cube. After that it increases again. This phenomenon is valid for CEM I whereas with CEM II no decrease occurs. According to a proposal of Siebel & Dahms [2] the development of the compressive strength and of the dynamic modulus of elas-

der Verlauf der Druckfestigkeit und des dynamischen E-Moduls als zwei Kenngrößen angenommen, die die Wirkung der AKR kennzeichnen sollen. Nach den hier beschriebenen Ergebnissen scheint der dynamische E-Modul in dieser Hinsicht zu hinterfragen sein.

#### *Günstige Wirkung von Phonolit*

Es ist wohl bekannt, dass latent hydraulische und puzzolanische Zuzahl- und Zusatzstoffe helfen, eine AKR zu unterdrücken [3, 4]. Die Zusatzstoffe sollen dafür sorgen, dass Alkalien während einer frühen Erhärtung in Calciumsilikathydrat (CSH) mit niedrigem Ca-Gehalt oder in Zeolith ähnlichen Phasen gebunden werden [5]. Die  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen der Porenflüssigkeit werden teilweise durch die Puzzolane gebunden. Dies führt zu einer Erniedrigung des C/S-Verhältnisses und zu einer festen Bindung oder Adsorption der Alkalien in oder an den CSH-Phasen oder Komponenten, in denen die Alkalien praktisch unlöslich sind. Ergebnisse von synthetischen CSH-Phasen zeigen [6], dass die Alkalibindung mit abnehmendem C/S-Verhältnis zunimmt und dass die Alkaliadsorption mit steigender Alkalikonzentration der Lösung zunimmt. Außerdem ist bekannt, dass ein Alkali-Silika-Gel nur quellen kann, wenn ein bestimmter CaO-Gehalt vorhanden ist [7]. Messungen haben gezeigt [8], dass ein Gel ohne CaO keinen Quelldruck ausübt und dass ein CaO-Gehalt von 10 % zum höchsten Quelldruck führt. Flugaschen mit niedrigem CaO-Gehalt [9] waren effektiver als solche mit hohem CaO-Gehalt. Deshalb sind Zusatzstoffe, die während der  $\text{C}_3\text{S}$ - und  $\text{C}_2\text{S}$ -Hydratation Calciumhydroxid binden, hilfreich zur Vermeidung einer Betonschädigung durch AKR.

Der hier untersuchte Zusatzstoff ist Phonolith mit einem CaO-Gehalt von 9 %. Gemischt mit Portlandzement CEM I mit einem CaO-

ticity are considered as two main parameters which should mark the action of an ASR. The present results seem that the dynamic modulus of elasticity has to be scrutinised in this respect.

#### *Beneficial action of phonolite*

It is well known that supplementary cementitious materials (SCMs) help to suppress ASR in concrete [3, 4]. The idea of using SCM, for example puzzolans, is to already bind the alkalis during the early stage of hardening in the C-S-H phases low in Ca or in zeolite-like phases that might form [5]. The  $\text{Ca}^{2+}$  ions of pore solution are bound in part by puzzolans. This leads to a reduction of the C/S ratio and to a stable binding or adsorption of alkalis in or to the C-S-H phases or in compounds in which the alkalis are virtually insoluble. Results on synthetic C-S-H phases show [6] that the alkali binding increases with decreasing C/S ratio in which the absorption of alkalis increases with increasing alkali concentration in the solution. A second aspect is that the alkali-silica gel is capable of swelling only in a certain range of CaO content [7]. Measurements have shown [8] that a gel without CaO does not exert a swelling pressure whereas the maximum swelling pressure occurs with a CaO content of 10 %. Investigations with fly ashes showed [9], that fly ashes with lower content of CaO are more effective than those with high CaO content. Therefore, all SCMs, which bind  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formed during the  $\text{C}_3\text{S}$  and  $\text{C}_2\text{S}$  hydration, help to avoid a deterioration of concrete by ASR.

The investigated supplementary cementitious material (SCM) is a phonolite with a CaO content of 9 %. When mixed with Portland cement CEM I which has a CaO content of 62 % the total CaO content of the binder amounts to 46 %. When hydration takes place the  $\text{SiO}_2$  combines with calcium oxide

Gehalt von 62 % wird der CaO-Gehalt des gesamten Bindemittels 46 %. Bei der Hydratation verbindet sich  $\text{SiO}_2$  mit Calciumoxid zu Calciumsilikathydraten (CSH). Der  $\text{SiO}_2$ -Gehalt des Binders beträgt 28 %, während der  $\text{SiO}_2$ -Gehalt des CEM I 19 % beträgt. Das bedeutet, dass im CEM II mehr Calcium gebraucht wird, um CSH zu bilden. Das bedeutet auch, dass weniger Calcium im Alkaliesäuregel gebunden werden kann und dass deshalb der Quelldruck geringer wird. Diese Berechnung ist eine grobe Schätzung, aber sie zeigt, dass Phonolith helfen kann, die schädigende AKR zu reduzieren.

Die vorteilhafte Wirkung von Phonolith kann an den Abb. 1 bis 3 hinsichtlich der Dehnung und der Rissbildung beobachtet werden. Obwohl die Dehnung von Grauwacke gering ist (Abb. 1) und der Unterschied zwischen den zwei Zementen vernachlässigbar ist, beobachtet man am Würfel mit dem CEM I Rissbildung nach 280 Tagen. Wie schon oben dargelegt, tritt mit CEM II keine Rissbildung auf und auch die Dehnung bleibt unter dem kritischen Wert von 0,6 mm/m. Phonolith hat also durchweg eine positive Wirkung hinsichtlich der Vermeidung von AKR.

### Zusammenfassung

Die Untersuchungen mit drei Gesteinen des slow/late-Typs und zwei Bindemitteln erbrachten folgende Ergebnisse nach 560 Tagen Lagerung in der Nebelkammer:

- a) Phonolith als Zusatzstoff hat einen vorteilhaften Effekt hinsichtlich Dehnung und Rissbildung,
- b) obwohl der Gesamt-Alkali-Gehalt von Phonolith in den Mineralien hoch ist, sind die Alkalien fest gebunden und tragen nicht zur AKR bei,
- c) der dynamische E-Modul charakterisiert die schädigende Wirkung von AKR nicht.

to calcium silicate hydrate (C-S-H). The  $\text{SiO}_2$  content of the binder comes to 28 % whereas the  $\text{SiO}_2$  content of CEM I is 19 %. This means that in the CEM II more calcium is needed to form C-S-H. (The hydration of the other klinker minerals is not considered here.) This means also that less calcium can be bound in the alkali silica gel and therefore the swelling pressure is lower. This calculation is a rough estimate but it shows that phonolite can help to reduce or even suppress the detrimental action of ASR.

The beneficial action of phonolite can be observed in Figs. 1 to 3 with respect to the expansion and crack formation. Although the expansion of greywacke concrete is small (Fig. 1) and the difference between the two cements is negligible the cube with CEM I is cracking after 280 days of exposure. With CEM II, no cracking occurs and the expansion is smaller than 0.6 mm/m. It turned out that phonolite has consistently a positive effect on the avoidance of ASR.

### Conclusions

The investigations with three types of slow/late aggregates and two types of cement have brought up some new facts about alkali-silica reaction which have been found during 560 days of exposure in the fog room:

- a) the supplementary cementitious material phonolite has beneficial effects with respect to expansion and crack formation,
- b) although the total alkali content of phonolite in the minerals is high, the alkalis are firmly bound and do not contribute to ASR,
- c) the dynamic modulus of elasticity does not characterize the detrimental action of ASR.

Weitergehende Informationen finden sich in [10].  
More information can be found in [10].

### Literatur / References

- [1] **DAfStb (2007):** Richtlinie "Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)", Berlin (Beuth) 2007
- [2] **Siebel, E.; Dahms, J. (1997):** Assessment of structures with respect to a damaging alkali-silica reaction (in German), Beton 47 (1997), No. 9, pp. 533-537
- [3] **Scrivener, K. (2008):** Importance of microstructural understanding for durable and sustainable concrete. In Wei Sun, K. van Breugel, Changwen Miao, Gauang Ye, Huisu Chen (Eds.). Microstructure related durability of cementitious composites. Rilem Publ. SARL, Pro 61, Bagneux 2008, pp. 333-344
- [4] **Stark, J. (2008):** Alkali-silica reaction (in German). Bulletin of F.A. Finger Institute, Weimar 2008
- [5] **Stark, J.; Freyburg, E.; Seyfarth, K.; Giebson, C.; Erfurt, D. (2010):** 70 years of ASR with no end in sight? (Part 2), ZKG International (2010), No. 5, pp. 55-70
- [6] **Hong, S.Y.; Glasser, F.P. (1999):** Alkali binding in cement pastes. Part I. The C-S-H Phase, Cement and Concrete Research 29 (1999), No. 12, pp. 1893-1903
- [7] **Stark, J.; Freyburg, E.; Seyfarth, K.; Giebson, C.; Erfurt, D. (2010):** 70 years of ASR with no end in sight? (Part 1), ZKG International (2010), No. 4, pp. 86-95
- [8] **Mansfeld, T. (2008):** The swelling behavior of alkali gels with recognition of their composition (in German), PhD thesis, Weimar 2008
- [9] **Shehata, M.H.; Thomas, M.D.A. (2000):** The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction, Cement and Concrete Research 30 (2000), No. 7, pp. 1063-1072
- [10] **Mielich, O. (2010):** Beitrag zu den Schädigungsmechanismen in Betonen mit langsam reagierender alkaliempfindlicher Gesteinskörnung, DAfStb Nr. 583, Berlin 2010

**ENTWURF VON BETONMISCHUNGEN MIT VARIABLEM LUFTPORENGEHALT MIT  
DEM ZIEL EINER MAXIMALEN POROSIERUNG  
CONCEPT OF CONCRETE COMPOSITIONS WITH VARIABLE AIR VOID CONTENTS  
AIMING AT A MAXIMUM POROSITY**

von/by: Dipl.-Ing. T. Sören Sippel

### Zusammenfassung

Mit dem Ziel einer maximalen Porosierung von Betonmischungen soll den Anforderungen der neuen Energieeinsparverordnungen (EnEV 2009 und EnEV 2012) auch für mineralisch gebundene Wandbauteile Rechnung getragen werden. Dazu werden Leichtzuschläge und ausgewählte Porosierungsmittel miteinander kombiniert, um eine optimale Wärmedämmung zu erreichen. Gleichzeitig sollen die hergestellten Mischungen eine gute Verarbeitbarkeit und bestmögliche Festigkeitswerte zeigen. Ausgehend von einer Normalbetonmischung (Größtkorn  $\leq 4$  mm) mit sehr geringem Luftporenanteil ( $< 2,0$  %) wird in einem ersten Schritt die Gesteinskörnung durch Leichtzuschlag ersetzt, und in einem zweiten Schritt die verbleibende Zementmatrix porosiert. Es entsteht ein gefügedichter Leichtbeton mit porosierter Matrix, der bei geringer Rohdichte gute Festigkeits- und Dämmwerte erreichen kann. [1]

### Übersicht

Als Leichtzuschlag kommen drei verschiedene, industriell hergestellte Zuschläge zum Einsatz: Expandiertes Perlit, Blähglas und Aerogel. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Eigenschaften.

### Abstract

The goal is a maximum porosity of concrete compositions in order to take the new regulations of German Energy Saving Ordinance (EnEV2009 and EnEV 2012) also for mineral-bounded structural elements into account. To achieve an optimal thermal insulation some lightweight aggregates and selected porosity agents are combined. Concurrently, the compounded compositions should indicate a good plasticity and best possible strength development. Based on a standard concrete composition (maximum grain  $\leq 4$  mm) with a very low proportion of air ( $< 2.0$  %) the aggregate will be replaced by lightweight aggregates in a first step, and in the second step the remaining cement matrix will be aerated. This leads to a dense lightweight concrete with a porosed matrix, which has good strength values and high thermal insulation with in low density. [1]

### General view

There are three different lightweight aggregates from industrial production used in these investigations: expanded perlite, foam glass and aerogel. Table 1 shows the most important characteristics.

Tabelle 1: Kennwerte der Leichtzuschläge / specific values of the lightweight aggregates

	Expandiertes Perlit	Blähglas	Aerogel
Hauptbestandteil	vulkanisches Glas	recyceltes Altglas	amorphe Kieselsäure
Schüttdichte $\rho_s$	85 kg/m <sup>3</sup>	190 kg/m <sup>3</sup>	70 kg/m <sup>3</sup>
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Tr}$	0,038 W/(mK)	0,07 W/(mK)	0,018 W/(mK)

Schon die ersten Versuche mit Perlit zeigen, dass das Mischwerkzeug die Perlit-Körnung

The first examinations with perlite already show that these aggregates are destroyed

zerschlägt, obwohl mit geringster Mischgeschwindigkeit experimentiert wird. Die gebrochene Körnung saugt Wasser auf und verliert zudem die erwünschte Wirkung als Leichtzuschlag. Im weiteren Verlauf wird deshalb nur mit Blähglas und Aerogel experimentiert. Für beide Leichtzuschläge werden Körnungen mit einem Größtkorn kleiner 4 mm ausgewählt (Blähglas: 2 – 4 mm; Aerogel: 5  $\mu\text{m}$  – 4 mm).

Der Lufteintrag in die Zementmatrix erfolgt durch Kunststoff-Mikrohohlkugeln, Schaumbildner und superabsorbierenden Polymeren (SAP). Dabei lassen sich bei SAPs und Mikrohohlkugeln Poren mit definierter Größe bzw. Größenverteilung erzeugen.

Bei Zugabe von SAP entstehen die Poren erst durch die Austrocknung des von den trockenen SAP aufgenommenen Wassers. Im Gegensatz dazu werden durch Mikrohohlkugeln oder Schaumzugabe fertige Poren der Betonmischung zugegeben.

### Mischungsentwürfe

Im ersten Schritt der Mischungsentwürfe wird der Leichtzuschlaganteil bis zu einem Maximum erhöht. Dies wird erreicht, wenn die Leichtzuschläge ein dichtes Haufwerk bilden, und die restlichen Zwischenräume durch Zementleim und Gesteinskörnung optimal ausgefüllt werden. Abbildung 1 zeigt diese Abstufungen von Mischung M1,0 mit 100 V-% Normalbeton bis M0,30 mit 30 V-% Normalbetonanteil und 70 V-% Leichtzuschlag (Blähglas).

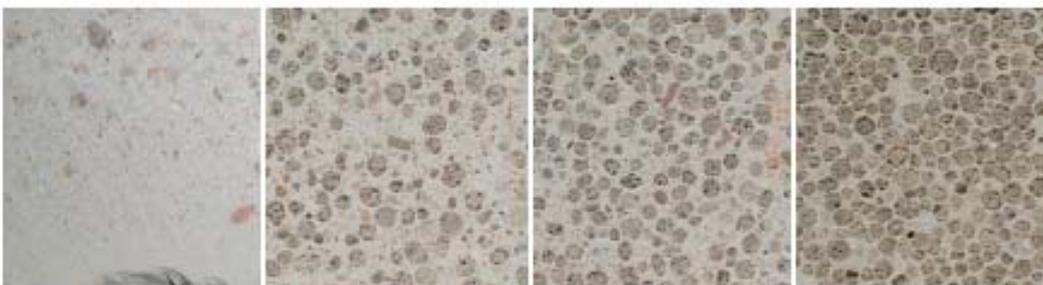
by the rotary tool of the mixer, although the speed of the mixer is as low as possible. The broken grains absorb water and they furthermore lose the desired effect of a lightweight aggregate. Further experiments are therefore done with foam glass and aerogel. Both of these aggregates have a maximum grain size of 4 mm (foam glass: 2 – 4 mm; aerogel: 5  $\mu\text{m}$  – 4 mm).

To aerate the cement matrix synthetically microspheres, foaming agent and superabsorbent polymers (SAP) are used. It is possible to create porosities with defined dimension respectively size distribution with SAPs and microspheres.

While the porosities in adding the SAP are generated through the loss of the absorbing water, the other porosity agents like microspheres and foam give already finished porosities into the concrete mixture.

### Mixture proportioning

In the first step of mixture composition the amount of lightweight aggregate will be increased to a maximum. The maximum is reached, when the light aggregates have formed a dense agglomeration, and the remaining space between is optimally filled with cement paste and normal aggregate. Figure 1 shows these steps from mixture M1.0 with 100 v-% standard concrete to M0.30 with 70 v-% of lightweight aggregate (foam glass).



**Abbildung 1:** Erhöhung des Leichtzuschlaganteils (M1,0 bis M0,30)  
**Figure 1:** Increase of the lightweight aggregate (M1.0 till M0.30)

Bei einer weiteren Erhöhung des Anteils an Leichtzuschlag würden Hohlstellen entstehen, da die Matrixmenge nicht mehr ausreicht, die Zwischenräume zu füllen. Außerdem könnte sich das Korngerüst nicht mehr optimal abstützen, was Festigkeitseinbußen zur Folge hätte.

Um die Rohdichte weiter zu senken, wird das noch verbleibende Matrixvolumen porosiert, und der Anteil an normaler Gesteinskörnung auf null reduziert.

Der Unterschied in den einzelnen Mischungen wird durch einen volumenbezogenen Austausch der Materialien erzielt. Abbildung 2 zeigt dies schematisch.

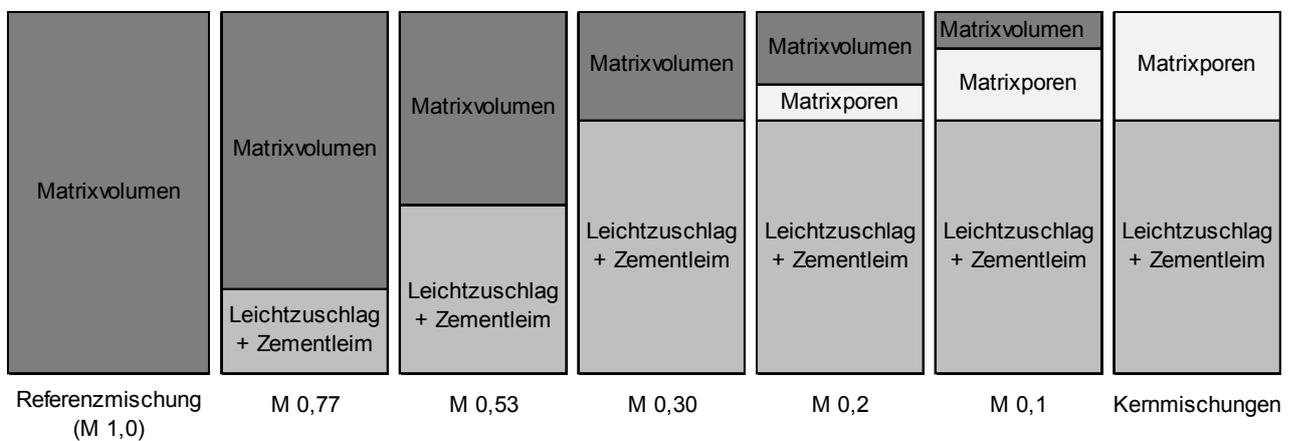
Damit die einzelnen Mischungen untereinander vergleichbar sind, sollte ein für alle Zusammensetzungen festgelegter w/z-Wert von 0,5 gelten. Hierbei treten jedoch große Unterschiede in der Verarbeitung auf. Mischungen mit Mikrohohlkugeln sind viel zu trocken, und lassen sich selbst durch Zugabe von Fließmittel nicht verarbeiten. Nur mit Hilfe von zusätzlichem Wasser können auch diese Mischungen praktikabel hergestellt und verarbeitet werden. Bei den Mischungen M0,77 bis M0,30 ist teilweise auch der Einsatz von Beschleuniger notwendig, um das Entmischen durch Aufschwemmung der Leichtzuschläge zu verhindern.

A further increase of the amount of lightweight aggregate leads to some space between the grains, because the matrix cannot fill the whole space. Another consequence would be, that the strength gets decreased due to the fact that the grains don't support to each other.

To reduce the density more and more, the residual volume of cement matrix will be aerated. The amount of normal aggregates is adjusted to zero.

The difference in the several mixtures is caused by a volumetric exchange of the materials. Figure 2 shows these facts.

A given w/c ratio of 0.5 for all compositions permits the comparison of the several mixtures. However there is a large difference in handling. Mixtures with microspheres are very dry, and one cannot handle them even with adding superplasticizer. The mixtures only can be developed practicably by the aid of extra water to handle them correctly. To avoid decomposition through flotation of the lightweight aggregate, it is even necessary to use a stabilizer in the mixtures M0.77 to M0.30 in different quantities.



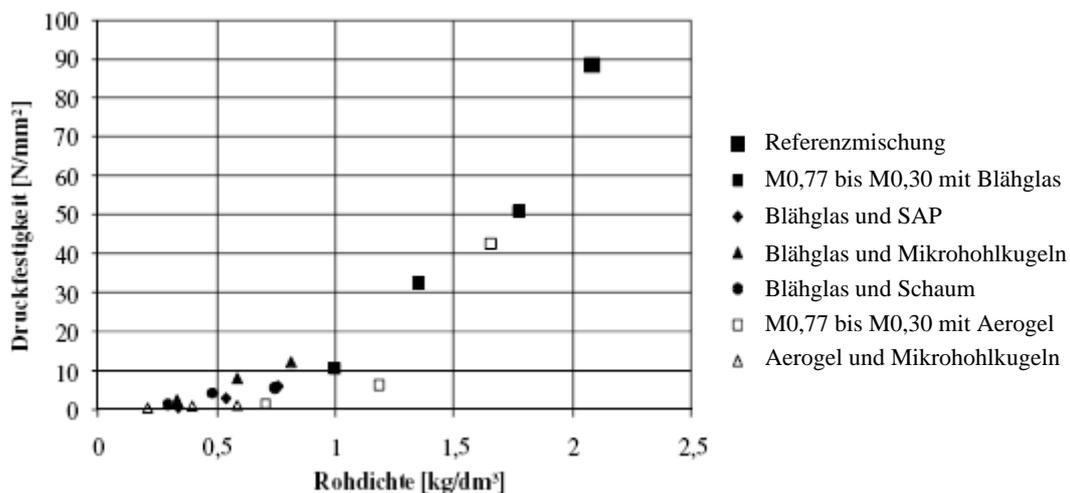
**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der Mischungen  
**Figure 2:** Schematical illustration of the mixtures

## Ergebnisse

An allen Mischungen werden Frischbetonprüfungen durchgeführt und Probekörper hergestellt, damit sich auch Eigenschaften des Festbetons miteinander vergleichen lassen. Aufgrund der maximalen Korngröße von 4 mm wird die Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1 an Prismen mit  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  geprüft. Betoniert werden Serien von je drei Prismen. Die Ergebnisse nach 28 Tagen Normlagerung sind in folgender Abbildung dargestellt.

## Results

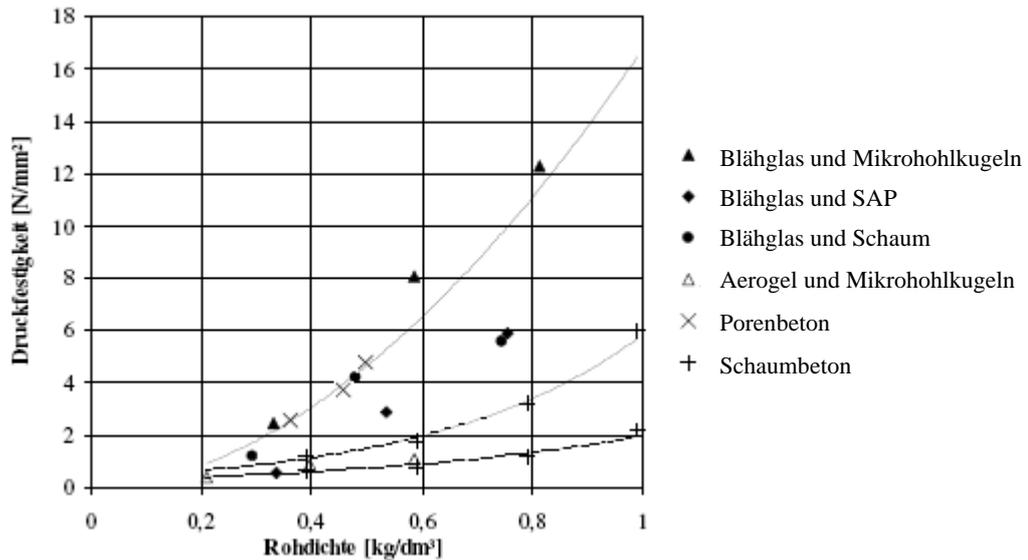
There are fresh concrete examinations with all mixtures and also specimens are produced to compare the properties of the hardened concrete. Because of the maximum grain size of about 4 mm, the compressive strength is tested according to DIN EN 196-1 on prisms with the dimension of  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . Every value is the result of a testing series of three prisms. The results after storing in the lab climate for 28 days are given in figure 3.



**Abbildung 3:** Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen  
**Figure 3:** Compressive strength as function of density

Scheinbar unabhängig vom verwendeten Material, liegen alle Ergebnisse ungefähr auf einer exponentiellen Trendlinie. Betrachtungen im Rohdichtebereich  $\leq 1 \text{ kg/dm}^3$  zeigen jedoch wesentliche Differenzierungen. Zur besseren Einordnung sind dem folgenden Diagramm auch Vergleichskurven von Porenbeton [2] (obere Linie) und Schaumbeton [3] eingezeichnet (Bereich zwischen den zwei unteren Linien). Bis auf wenige Ausnahmen liegen die Versuchsergebnisse dieser Arbeit oberhalb von Schaumbeton. Die Ergebnisse der E-Modul Prüfung sind um den Faktor 600 größer, zeigen jedoch einen nahezu identischen Verlauf, und werden deshalb hier nicht abgebildet.

It looks like the results go head to head with an exponential trendline independent of the used materials. But a look in the area of density  $\leq 1 \text{ kg/dm}^3$  shows significant differentiations. For a better classification comparison curves of autoclaved aerated concrete [2] (upper line) and foam concrete [3] (area between the two lower lines) are drawn into the following figure. With a few exceptions all the examination results of this work are above the values of foam concrete. The results of the Young's modulus are about 600 times higher than compressive strength. Yet they show the same progression and aren't projected in this work.

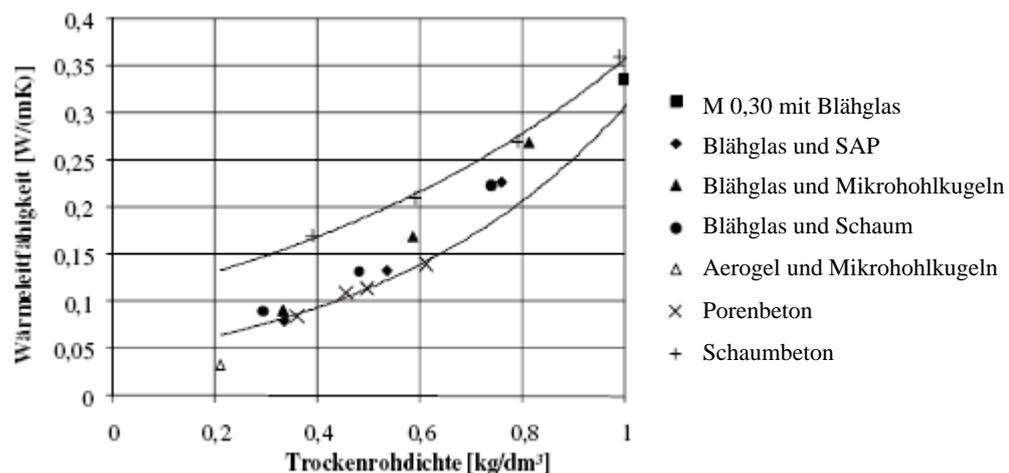


**Abbildung 4:** Vergleich mit Porenbeton und Schaumbeton

**Figure 4:** Comparison with autoclaved aerated concrete and foam concrete

Die Wärmeleitfähigkeit wird mit einem Zwei-plattengerät bestimmt [4]. Dazu sind zwei identische Probekörper bis zur Massekonstanz im Ofen getrocknet. Nach dem Einbau wird im Plattengerät eine konstante und gleichmäßige Wärmestromdichte hergestellt. Über die mittlere Leistungszufuhr lässt sich die Wärmeleitfähigkeit errechnen. Auch diese Ergebnisse werden mit Porenbeton und Schaumbeton verglichen. Den besten Wert zeigt die Mischung aus Aerogel und Mikrohohlkugeln mit  $\lambda_{Tr} = 0,033 \text{ W/mK}$  und liegt dabei im Bereich von Polystyrolschaum.

The thermal conductivity is detected by the guarded hot plate method [4]. For this measurement two identical specimens are dried in an oven until constant mass. After installation in the hot plate method there is a constant and equal heat flux density. With the average power feed the thermal conductivity can be calculated and the results are compared with the values of autoclaved aerated concrete and foam concrete. The best value is reached in the mixture with aerogel and microspheres ( $\lambda_{Tr} = 0.033 \text{ W/mK}$ ) which is as good as the value of polystyrene foam.



**Abbildung 5:** Wärmeleitfähigkeit der Mischungen  $\leq 1 \text{ kg/dm}^3$

**Figure 5:** Thermal conductivity of the mixtures  $\leq 1 \text{ kg/dm}^3$

## Fazit

Durch die Veränderung der Mischungszusammensetzung wurden Betonmischungen mit unterschiedlichem Porenanteil hergestellt. Die Probekörper der Kernmischungen mit Blähglas haben einen maximalen Luftporenanteil von ca. 82 %.

In Kombination mit Mikrohohlkugeln zeigen einige Mischungen trotz der geringen Rohdichte noch gute Festigkeitswerte. Kernmischung mit Blähglas und Mikrohohlkugeln:  $\rho_{Tr,10} = 0,33 \text{ kg/dm}^3$ ;  $f_c = 2,5 \text{ N/mm}^2$ .

Bei der Verwendung von Schaumbildner ist eine über die Mischungsdauer hinaus stabile Schaumerzeugung notwendig. Dies konnte in dieser Arbeit noch nicht zufriedenstellend erreicht werden.

SAPs eignen sich für die Erzeugung definierter Porengrößen und Porenverteilungen. Sie erzielen gute Wärmedämmwerte. Allerdings gestalten sich die Lagerung und die Festigkeitsentwicklung durch den hohen Anteil an zusätzlichem Wasser schwierig.

In Abbildung 6 sind die Kernmischungen aus Blähglas zu sehen.

## Conclusion

With the variation of the mixture compositions concrete mixtures with different amount of air voids could be produced. The specimens of the lightest mixtures with foam glass have a maximum amount of air of about 82 %.

In combination with microspheres there are still good strength values in spite of a very low density. Mixture with foam glass and microspheres:  $\rho_{Tr,10} = 0.33 \text{ kg/dm}^3$ ;  $f_c = 2.5 \text{ N/mm}^2$ .

A stable foam generation during the whole mixing period is necessary so that a foaming agent can be used. In this work this couldn't be achieved to get satisfying results.

SAPs are good for a defined dimension of air voids, defined distribution of pores and they achieve good heat insulation. A disadvantage is found in curing and in the low progression of strength by reason of additionally added water.

The lightest mixtures with foam glass are seen in figure 6.



**Abbildung 6:** Kernmischungen aus Blähglas und verschiedenen Porosierungsmitteln  
(v.o.: Mikrohohlkugeln, SAP, Schaumbildner)

**Figure 6:** Specimens with foam glass and different porosity agents  
(f.t.: microspheres, SAP, foaming agent)

Mit Aerogel als Leichtzuschlag kann sogar ein maximaler Luftporenanteil von ca. 89 % erreicht werden. Dies führt bei der in Abbildung 7 gezeigten Mischung zu einer Trockenrohdichte  $\rho_{Tr,10}$  von lediglich noch  $0,21 \text{ kg/dm}^3$ . Allerdings sind die Herstellungskosten von Aerogel im Augenblick zu hoch, um es unter rentablen Gesichtspunkten für mineralisch gebundene Wandbauteile einzusetzen. Ein industrieller Fertigungsprozess des Materials in großem Maßstab könnte dafür die Lösung sein.

With the lightweight aggregate aerogel the lightest mixtures have a maximum amount of air of even about 89%. This fact leads to a dry density of only  $\rho_{Tr,10} = 0.21 \text{ kg/dm}^3$  for this mixture. The picture in figure 7 shows this specimen.

However the production of aerogel is very expensive at the moment, there is no profitability for using this material in mineral-bounded structural elements. Maybe an industrial production with a high volume can solve this problem.



**Abbildung 7:** *Probekörper aus Aerogel und Mikrohohlkugeln*  
**Figure 7:** *Specimen with aerogel and microspheres*

#### Literatur / References

- [1] **Thienel, K.-Ch. (2006):** Fertigteile aus haufwerksporigem Leichtbeton mit porosierter Matrix. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 66:1 (2006), S. 62-72
- [2] **Homann, M. (2008):** Porenbeton-Handbuch. 6. Aufl. Gütersloh: Bauverlag
- [3] **Betontechnische Daten:** Ausg.2009. HeidelbergCement AG, Leimen
- [4] **DIN EN 12664:** Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten. Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät. Mai 2001.

# CARBONATISIERUNG DES BETONS UND FUNKTIONSFÄHIGKEIT VON DÜBELN IN CARBONATISIERTEM BETON

## CONCRETE CARBONATION AND THE FUNCTIONALITY OF FASTENERS IN CARBONATED CONCRETE

von/by: Marina Stipetić

### Zusammenfassung

Nachträglich montierte Befestigungen werden in zunehmendem Maße verwendet, um hohe Lasten in Beton oder Mauerwerk zu übertragen. In den letzten Jahrzehnten wurde die Bemessung von Befestigungen dahingehend deutlich verbessert, die zulässigen Lasten solcher Verankerungen zu erhöhen. Allerdings sind solche Befestigungssysteme zunehmend komplex und reagieren sensibel auf äußere Einflüsse während der geforderten Mindestlebensdauer von 50 Jahre.

Üblicherweise erfolgt eine Direktmontage entsprechender Befestigungsmittel oder die Montage von Befestigungsmitteln für abgehängte Decken innerhalb eines Jahres nach dem Betonieren der tragenden Struktur. Mit der Zeit können sich die Eigenschaften des Betons, insbesondere in der Nähe der Betonoberfläche z.B. aufgrund von Carbonatisierung verändern. Diese Veränderung der Materialeigenschaften in Oberflächennähe hat in der Regel keinen Einfluss auf das Verhalten von Befestigungssystemen, wenn deren Verankerungstiefe groß genug ist. Dahingegen kann die Verankerungstiefe von Befestigungsmitteln zur Direktmontage oder von z.B. Deckennägeln kleiner sein als 30 mm.

Bisher gibt es keine Untersuchungen, inwiefern solche Änderungen der Materialeigenschaften Einfluss auf die Traglast und/oder das Verschiebungsverhalten haben.

In diesem Forschungsvorhaben wurde der Einfluss der Carbonatisierung auf die Traglast und das Verschiebungsverhalten untersucht.

Der folgende Bericht zeigt im Detail, wie die

### Abstract

For concrete structures post installed fasteners are gaining popularity for transferring high loads into concrete or masonry structures. Within the last decades the design of fasteners were strongly improved with the focus to increase the load that can be transferred by such fasteners. However, these fasteners are more and more sophisticated and sensitive to changes during the life-cycle of minimum of fifty years.

In most cases power actuated fasteners as well as plugs for suspended ceilings are installed within one year after concreting the bare structure. With time the concrete properties will change especially near the concrete surface e.g. by carbonating. The effect of changing material properties of the surface normally does not influence the behavior of fastener because the embedment depth is large enough. For anchor nails and power actuated fastener the embedment depth can be smaller than 30 mm.

Currently no test and analyses have been conducted to consider the changing properties on the failure load and displacement behavior of such fasteners. The aim of the test presented in this paper will show the influence of the changing concrete surface properties with time on the failure load and the displacement of fasteners with small embedment depths. The following paper shows in detail how the properties of the concrete surface is influenced with time and which effect on the safety of fasteners must be considered to ensure a life time of fifty years.

Eigenschaften der Betonoberfläche im Laufe der Zeit beeinflusst werden und welche Auswirkungen auf die Sicherheit von Befestigungen berücksichtigt werden müssen, um eine Nutzdauer von fünfzig Jahren gewährleisten zu können.

### **Einleitung**

Der PH-Wert von nicht-carbonatisiertem Beton beträgt ungefähr 12,6. Während der Carbonatisierung schreitet die Neutralisierung des Betons von außen nach innen fort, wodurch der PH-Wert unter 9,5 sinkt. Um carbonatisierten Beton zu erhalten, wurde innerhalb von drei Monaten eine beschleunigte Carbonatisierung durchgeführt<sup>1</sup>. Danach wurden jeweils 20 zentrische Zugversuche mit Einzelbefestigungen der Deckennägeln ohne Randeinfluss in ungerissenem, carbonatisiertem und nicht-carbonatisiertem, niederfestem Beton durchgeführt.

### **Carbonatisierung**

Zur Karbonatisierung wurden die Betonplatten und Betonwürfel der Festigkeitsklasse C20/25 benutzt. Alle Betonproben wurden aus der gleichen Betoncharge hergestellt.

Die Prüfkammer (Abbildung 1) mit den eingelagerten Betonproben zur Carbonatisierung wurde während der Prüfung mit 3 % CO<sub>2</sub> gespült.

Die Messungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Prüfkammer konnten aufgrund des begrenzten Meßbereichs des Prüfgeräts, erst nach einer definierten Verdünnung des aus der Prüfkammer herausgeleiteten Gases erfolgen. Es ergaben sich umgerechnet CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Prüfkammer von 10000 – 15000 ppm CO<sub>2</sub>.

Der CO<sub>2</sub>-Gehalt war etwas schwankend, da der Vordruck des zur Einleitung benutzten Ventils nicht immer konstant gehalten werden konnte.

### **Introduction**

The pH value of non-carbonated concrete is approximately 12.6. During carbonation concrete is neutralized from the outside to inside, causing the pH to fall below 9.5. Accelerated carbonation was carried out for three months to obtain carbonated concrete<sup>1</sup>. Afterwards, 20 centric tension tests each were performed with single anchor nails for suspended ceilings without edge influence in uncracked, carbonated and non-carbonated, low-strength concrete.

### **Carbonation**

For carbonation testing, concrete slabs and concrete cubes with a strength class of C20/25 were used. All concrete samples were prepared from the same batch of concrete.

The test chamber (Figure 1) with the concrete samples for carbonation was filled with 3% of CO<sub>2</sub>.

Because of a limited measurement range of the test instrument, the measurement of CO<sub>2</sub> concentration in the test chamber could be made only after a defined dilution of the gas. CO<sub>2</sub> concentrations in the test chamber were between 10000-15000 ppm.

The level of gas fluctuated due to an old valve.

The constant humidity of 65% in the test chamber was regulated by a saturated solution of ammonium nitrate. The test chamber was not air-conditioned, because

---

<sup>1</sup> Dank an Dr. Dieter Zöltzer für die Hilfe bei der Durchführung der Carbonatisierung

Die Luftfeuchtigkeit in der Prüfkammer wurde mit einer in die Prüfkammer befindlichen gesättigten Ammoniumnitratlösung auf 65 % eingestellt.

Die Prüfkammer wurde nicht extra klimatisiert, da sie sich in einem temperaturgeregelten Raum mit einer Temperatur von ca. 20 – 22 ° befand, was auch der Temperatur in der Prüfkammer entsprach.



**Abbildung 1:** Prüfkammer zur Karbonatisierung  
**Figure 1:** Test chamber for carbonation

In der Prüfkammer befanden sich die Betonprüfwürfel (Abbildung 2), an denen die Carbonatisierungstiefe geprüft wurde. Die Betonwürfel wurden aus der Kammer genommen, gebohrt und von Staub gereinigt. Unmittelbar darauf wurde eine 1%-ige ethanolische Phenolphthaleinlösung in die Bohrlöcher getropft. Die nicht carbonatisierte Betonzone färbte sich daraufhin violett, während der carbonatisierte Teil mit einem pH-Wert unter 9,5 farblos blieb. Die Carbonatisierungstiefe wurde mit Hilfe des Endoskops geprüft. Bei einer Carbonatisierungstiefe gleich oder größer als 3 cm, wurde der Carbonatisierungsprozess abgeschlossen. Da mit dem Endoskop die Tiefe nur approximativ bestimmt werden konnte, wurden die Betonwürfel gespalten, um die exakte Carbonatisierungstiefe messen zu können.

temperature-controlled room, with a temperature between 20-22°C.

Concrete cubes (Figure 2) were placed in the test chamber to test depth of carbonation. The concrete cubes were removed from the chamber, drilled, boreholes were cleaned and immediately afterwards a 1% phenolphthalein in ethanol solution was injected into the boreholes. The non-carbonated concrete zone was colored in violet, while the carbonated part did not change its color because the pH-value remained below 9.5. The carbonation depth was tested using the endoscope. When depth of carbonation was equal to or greater than 3 cm, the carbonation was considered completed. As the endoscope only determined an approximate depth, the concrete cubes were split to get an exact depth of carbonation.

The compressive strength of concrete at the beginning and the end of the carbonation was tested on concrete cubes ( $a = 15$  cm). The results are summarized in Table 1. The studies show 7 kN higher strength of carbonated concrete compared to non-carbonated concrete, both made from the same concrete batch.



**Abbildung 2:** Messen der Karbonatisierungstiefe  
**Figure 2:** Measuring of carbonation depth

To determine the influence of carbonation to concrete cover, tensile bond strength tests were made before and after carbonation.

Die Druckfestigkeit des verwendeten Betons zum Zeitpunkt des Anfangs und des Endes der Carbonatisierung wurde an Betonwürfeln ( $a = 15 \text{ cm}$ ) untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Festigkeitsuntersuchungen zeigen eine um 7 kN erhöhte Festigkeit bei karbonatisiertem Beton im Vergleich zu nicht-carbonatisiertem Beton aus derselben Betoncharge.

Prüfung der Druckfestigkeit an Betonwürfeln (15*15*15 cm)		
Beton	Prüfdatum	Druckfestigkeit
[-]	[tt.mm.jjjj]	[N/mm <sup>2</sup> ]
C20/25	15.11.2010	30,51
C20/25	21.02.2011	31,22
C20/25 (carbonatisiert)	21.02.2011	38,21

**Tabelle 1:** Druckfestigkeit des verwendeten Betons

**Table 1:** Compressive strength of the used concrete

Die Versuche zum Einfluss der Carbonatisierung an der Betondeckung bestehen aus Versuchen zur Bestimmung der Haftzugfestigkeit vor und nach dem Carbonatisieren. Die Haftzugfestigkeit wird auf je 5 Prüfstellen durchgeführt. Die Prüfergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Mittelhaftzugfestigkeit der Betonoberfläche nach dem Carbonatisieren zeigt eine große Abminderung.

### Versuchsprogramm und Ergebnisse

Da die Carbonatisierungstiefe immer größer als 3 cm ist, werden Deckennägel mit effektiver Verankerungstiefe von 32 mm in ungerissenem, carbonatisiertem und nicht-carbonatisiertem niederfestem Beton geprüft. Eine Zusammenstellung der durchgeführten Versuche ist in Tabelle 3 zusammengestellt.

The bond strength tests were performed at 5 places before and after. The test results are shown in Table 2. The middle tensile bond strength of the concrete surface after carbonation shows huge damage.

Prüfung der Haftzugfestigkeit			
Prüfdatum	Haftzugfestigkeit	Mittelhaftzugfestigkeit	Bruchbild
[tt.mm.jjjj]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
13.09.2010	1,33	1,66	Betonbruch
	1,51		Betonbruch
	2,13		Betonbruch
	1,31		Betonbruch
	1,99		Betonbruch
09.03.2011	0,96	0,92	Betonbruch
	1,06		Betonbruch
	1,27		Betonbruch
	0,67		Betonbruch
	0,60		Betonbruch

**Tabelle 2:** Prüfung der Haftzugfestigkeit

**Table 2:** Bond strength test

### Test program and results

The carbonation depth was always bigger than 3 cm and therefore anchor nails for suspended ceilings with an effective embedment of 32 mm were tested in non-cracked, carbonated and non-carbonated, low-strength concrete. The test program is given in Table 3.

Verankerungsgrund	Rissbreite	Bohrereckmaß	Anzahl der Versuche	Verspreizungsintensität	Anbauteildicke
[-]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[mm]
C20/25	w = 0	$d_{cut,m}$	20	Vollverspreizt	5
C20/25 (karbonatisiert)	w = 0	$d_{cut,m}$	20	Vollverspreizt	5

**Tabelle 3:** *Versuchsprogramm*

**Table 3:** *Test program*

Die Versuchsergebnisse werden in Tabelle 4 dargestellt.

Der Deckennagel versagt in nicht-carbonatisiertem Beton meistens durch Stahlversagen. Im carbonatisierten Beton versagte der Dübel nur in 50% Fälle durch Stahlversagen, und 30% durch Betonausbruch.

Bei den Versuchen zeigt sich, dass die Nägel eine höhere mittlere Bruchlast in carbonatisiertem Beton erreichen, jedoch die Streuung ebenfalls zunimmt.

Die Streuung der Verschiebungen bei 50% der Bruchlast beträgt für nicht-carbonatisierten Beton 60,1% und für carbonatisierten Beton 87,1%.

Werden die Nägel im carbonatisiertem Beton gesetzt, so erreichen die Nägel bei Bruchlast eine um 25,2% größere Verschiebung im Vergleich mit Nägeln in nicht-carbonatisiertem Beton.

Test results are presented in Table 4.

Steel failure of the anchor nail was the predominated failure mode in non-carbonated concrete. In carbonated concrete the anchors failed in only 50% of the cases by steel failure, and in 30% of the tests the concrete failed.

Tests show that the anchor nails achieved a higher average breaking load in carbonated concrete, but also with an increased mean variation.

The dispersion of the displacement at 50% of the breaking load for non-carbonated concrete is 60.1%, and 87.1% for carbonated concrete.

The anchor nails set in carbonated concrete reached 25.2% greater displacement at the ultimate load in comparison with nails set in non-carbonated concrete.

Messwert	Mittelwert	Variationskoeffizient	Mittelwert	Variationskoeffizient
Versagenslast $N_U$	7,07	5,9%	7,60	12,3%
Verschiebung bei $N_U/2$	0,04	60,1%	0,04	87,1%
Verschiebung $s_u$	1,76	68,7%	2,38	68,9%

**Tabelle 4:** *Versuchsergebnisse der Versuche in carbonatisiertem und nicht-carbonatisiertem Beton*

**Table 4:** *Test results in carbonated and non-carbonated concrete*

## Zusammenfassung

In diesem Bericht wird der Einfluss geänderter Eigenschaften der Betonoberfläche aufgrund von Carbonatisieren auf die Bruchlast und die Verschiebung der Dübel mit geringer Verankerungstiefe dargestellt.

Die angenommene Nutzungsdauer des Dü-

## Summary

This paper shows how the changing concrete surface properties influence the failure load and the displacement of fasteners with small embedment depths.

The assumed lifetime of anchors in accordance with European Technical

bels gemäß der europäischen technischen Zulassung ist auf 50 Jahre festgelegt. Dieser Wert dient jedoch nur als Richtwert. Tatsächlich ist für eine korrekte Wahl des Befestigungsmittels ebenso der bauliche Zustand der Bausubstanz zu berücksichtigen.

Approval is 50 years. This value serves only as a guide. The structural condition of the building must also be considered when choosing an appropriate fastening system.

### Literatur / References

- [1] **Dahme, U (2006):** Chlorid in karbonatisiertem Beton. Göttingen : Cuvillier, 2006
- [2] **Muntean, A (2006):** A moving boundary problem: modeling, analysis and simulation of concrete carbonation. Göttingen : Cuvillier, 2006
- [3] **[ETAG 001-1]** Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete. European Organisation for Technical Approvals (EOTA), 1997

## MÖGLICHKEITEN ZUR BEURTEILUNG DER RESTOBERFLÄCHENZUGFESTIGKEIT VON VERWITTERTEN NATURSTEINEN

### POSSIBILITIES TO APPRAISE THE RESIDUAL SURFACE TENSILE STRENGTH

von/by: Judit Tevesz, Friedrich Grüner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA), Otto-Graf-Institut

#### Zusammenfassung

Für die zerstörungsarme Messung der mechanischen Eigenschaften (Restfestigkeit) einer verwitterten Natursteinoberfläche gibt es heutzutage nur wenige vor Ort anwendbare Methoden. Eine von diesen Methoden ist der PowerStrip® Test. Ziel des Vorhabens war es, diese Messmethode unter Erhaltung der Vorteile – günstig, schnell, einfache Durchführung vor Ort, Lieferung der konkreten Messwerte – zu optimieren.<sup>2</sup> Ungenauigkeiten in der Messung durch unregelmäßig auftretende Verformungen des verwendeten Klebebandes sollten reduziert werden.

#### Einleitung

Bei der Beurteilung des Erhaltungszustandes von Oberflächen historischer Baudenkmäler ist gegenüber der Zustandskontrolle moderner Bauten eine minimal - invasive Vorgehensweise notwendig. Die genaue Zustandserfassung von Baudenkmälern mit Hilfe von Normprüfverfahren (Haftzugfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit, etc.) wird durch die stark begrenzten Möglichkeiten der Probenahme, durch die Art und Intensität der Verwitterung von Naturstein- und Ziegeloberflächen sowie der Materialanisotropie (z.B. bei Sandsteinen) stark eingeschränkt.

Deshalb werden oft Messmethoden angewendet, die nicht vollständig normgerecht sind, um das Ausmaß an Materialentnahme historisch wertvoller Substanz möglichst gering zu halten. Die nicht normgerechte An-

#### Abstract

There are only a few on-site methods for non-destructive measurement of the mechanic properties (residual strength) of weathered natural stone surfaces. One of those methods is the PowerStrip® Test. The aim of the project was to test this method, while preserving the advantages – cheap, fast and easy to carry out on site - providing concrete measuring values. Inaccuracies in the measurement due to uncontrolled deformations of the adhesive tape used should be reduced.

#### Introduction

In assessing the state of preservation of surfaces of historical monuments compared to the state control of modern buildings, a minimally - invasive procedure is necessary. The exact condition assessment of architectural monuments with the help of standard tests (bond strength, flexural strength, compressive strength, etc.), the very limited possibilities of sampling, the type and intensity of weathering of stone and brick surfaces and the material anisotropy (e.g. sandstones) is severely limited.

Therefore measurement methods are used frequently, which do not completely conform to standards, to keep the dimension of material extraction of historic valuable substance as small as possible. The non-standard application of measurement methods is usually enforced by geometry, sur-

---

<sup>2</sup> Dank an Prof. Dr. rer. nat G. Grassegger-Schön für die Einführung in das Thema

wendung von Prüfmethode wird häufig durch die Geometrie, Oberflächenbeschaffenheit und Zugänglichkeit der Baudenkmal erzwungen. Für die Erfüllung der oben genannten Aspekte ist die Suche und Entwicklung neuer und zerstörungsarmer, leicht handhabbarer und vor Ort einsetzbarer Prüfmethode auch heute noch sehr aktuell. Zerstörungsfreie Prüfmethode wie Röntgenuntersuchungen oder elastische Wellen (z.B. Ultraschall) benötigen einen hohen instrumentellen Aufwand vor Ort, spezifische Fachkenntnisse in der Bedienung und Interpretation der erhaltenen Daten. Eine weitere Einschränkung besteht häufig darin, dass die gelieferten Werte nur Durchschnittswerte für den gesamten durch Wellen oder Strahlung untersuchten Materialquerschnitt sind.

Eine oft verwendete Methode sind zerstörungsarme Bohrlochwiderstandsmessungen, die ein näherungsweise Festigkeitsprofil bis zu einer Tiefe von mehreren Zentimetern aufnehmen können. Die Methode ist gut geeignet, um Festigkeitsunterschiede durch Verwitterungsprozesse oder die festigkeitssteigernde Wirkung durch Tränkung mit geeigneten Wirkstoffen relativ zueinander zu erfassen. Die Anwendung der Methode ist begrenzt durch den Einfluss der Korngröße und Materialinhomogenitäten. Alternativ ist die Messung der Oberflächenhaftzugfestigkeit eine verbreitete Prüfmethode, um Aussagen zur Materialfestigkeit zu erhalten. Jedoch sind auch hier Mindestanforderungen an die Restfestigkeit, den allgemeinen Oberflächenzustand und Zugänglichkeit zu erfüllen. Durch die nötige Abstützung des Gerätes ist auch bei kleinen Stempelflächen der Nachteil von zusätzlichen Schäden an den historischen Oberflächen kaum zu vermeiden. Für die Bestimmung der Adhäsion zwischen den Oberflächenschichten bzw. beim Absanden der Oberflächen von verwitterten Natursteinen wird auch der PowerStrip® Test nach [1-2] verwendet. Dieser Versuch

face condition and accessibility. To fulfill the aspects above, the search and development of new and destruction of poor, easily manageable and usable on-site testing methods are still very current. Non-destructive testing methods such as x-ray or elastic waves (e.g. ultrasound) require a large instrumental effort on site-specific expertise in the use and interpretation of data obtained. They need a high instrument input on-site, specific expert knowledge for handling and interpretation of the received value. Another restriction is that in many cases the delivered values are only average values of the analysed cross-sections.

One of the frequently-used methods is the less destructive drill hole resistance method, which can admit an approximate strength profile up to a depth of a few centimeters. This method is well suitable to determine relative strength difference from weathering or the strength cumulative effect of impregnation with adequate consolidation materials. The application of this method is limited by the grain size and the material inhomogeneity. The measurement of the surface adhesive strength is a very common alternative test method to achieve assumption about the material strength. However, minimum requirements need to be fulfilled for the residual strength, the general surface condition and the accessibility. With the necessary brace support of the device, small damages from the stamps are not really preventable. For the determination of the adhesion between the surface layers and accordingly the sanding of the surface of weathered natural stones, the PowerStrip® Test is used according to [1-2]. This method is ideal to measure on-site because of the low cost, the easily transportable test equipment, the short test time and the simple feasibility. Though from experience, there is known certain variation of the test results, that is higher than the standard variation of the material specific

ist wegen des geringen Kostenaufwandes, leicht transportabler Versuchsvorrichtung, kurzer Prüfungszeit und einfacher Durchführbarkeit für Messungen am Objekt ideal. Erfahrungsgemäß gibt es aber eine gewisse Streuung der Messergebnisse, die die normale Streuung der Materialkennwerte überschreitet. Diese Streuung liegt nach dem bisherigen Kenntnisstand am Einfluss der umweltbedingten Verformung (Umgebungstemperatur und relative Luftfeuchte) der verwendeten Klebebänder. Die gemessene Kraft beinhaltet nicht nur die für den Abriss des Klebebandes benötigte Energie, sondern auch die Energie, die für die Dehnung des Klebebands aufgewendet wird. Da diese Verformung stark temperaturabhängig ist, sind die Messwerte schwer zu vergleichen. Ziel der vorliegenden Untersuchung war, die Optimierung des Versuches unter Beibehaltung der oben angeführten Vorteile und mehr über die Adhäsion zwischen den verwitterten Steinschichten (Oberflächenzugfestigkeit und Haftzugfestigkeit) zu erfahren. Folgende Normen wurden bei der Entwicklung berücksichtigt und teilweise als Vorlage verwendet: [3-8].

### Veränderungen am Versuchsaufbau und -durchführung

Um die durch die Verformung des Klebebandes hervorgerufenen Schwankungen zu vermeiden, wurden Metallstempel von DFD® Instruments verwendet bzw. nach eigenen Vorgaben aus Aluminium (Abb. 1) hergestellt. Die Stempel wurden jeweils mit einer Öse als Halterung versehen, um die Lastwechsellmomente zu minimieren.



**Abbildung 1:** Mit Öse modifizierte Stempel von DFD® Instruments und Aluminiumstempel  
**Figure 1:** Dollies from DFD® Instruments, with ear and Dollies from aluminum

values. According to the present state-of-the-art, this variation depends on the influence of the environmental deformation (surrounding temperature and relative humidity) of the used adhesive tape. The measured force contains not only the energy that was used by the demolition of the adhesive tape but the energy that was dissipated to the deformation of the tape. Given that this deformation is very much dependent on the temperature, the measurement values are complicated to compare. The aim of the present research was the optimization of the test method below maintaining the above mentioned advantages and to find out more about the adhesion between the weathered stone layers (surface tensile strength and adhesive tensile strength).

The following standards were used or considered and in part chosen as guideline by the development: [3-8].

### Changes on the test set-up and procedure

Metallic dollies were used from DFD® Instruments and after our specification aluminum dollies were made (Fig. 1). in order to avoid the variation caused by the deformation of the adhesive tape. The dollies had an eyelet as a holder to minimize the momentum and stress.



**Abbildung 2:** Kraftmessgerät von PCE Inst.  
**Figure 2:** Digital force measurement apparatus from PCE Inst.

Für die Kraftmessung wurde an Stelle der Federwaage nach [1] ein digitales Kraftmessgerät (Abb. 2) mit Schleppeerfunktion gewählt, um Ableseungenauigkeiten des Wertes während der Messung auszuschließen. Das Gerät verfügt über eine Schnittschnelle, somit ist es möglich den Kraft-Zeitverlauf während der Messung aufzuzeichnen, wodurch die Reproduzierbarkeit und Kontrolle der Prüfung erleichtert wird.

Es wurde ein Stempeldurchmesser von 20 mm gewählt, um die erforderlichen Zugkräfte zu begrenzen. Dies erleichtert die manuelle Durchführung und begrenzt gleichzeitig die Oberflächenbeeinträchtigung auf eine kleinere Fläche. Weiterhin verformen sich die Leichtmetallstempel bei den zu erwartenden Spannungen nicht.

Als Befestigung wurden Klebstoffe und doppelseitige Klebebänder getestet. Klebstoffe sind bei höheren Restoberflächenzugfestigkeitswerten grundsätzlich besser geeignet, führen aber zu einer höheren, örtlichen Zerstörung der Oberfläche bei der Untersuchung. Die Versuchsdurchführung mit Klebstoff unterscheidet sich nur wenig von anderen Haftzugversuchen: es gibt keine Abstützung, wodurch zusätzliche Schädigungen verursacht werden könnten, und der Messbereich ist auf 0,15-2 MPa begrenzt. Es wurden verschiedene Klebstoffe getestet (Ri-

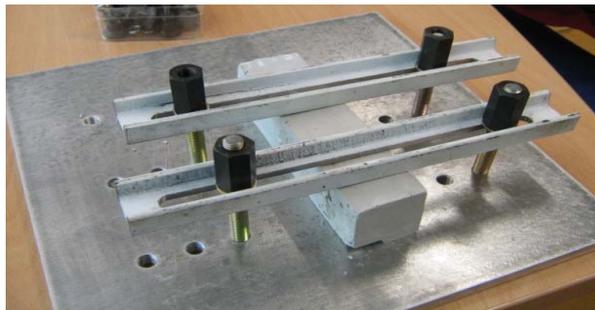
A digital force measurement device (Fig. 2) with trailing pointer function to avoid the impreciseness of the manual reading during the test was chosen instead of the spring balance according to [1-2]. The device has an interface, so it is possible to record the force-time curve during the measurement, whereby the reproducibility and the control of the test is easier.

A diameter of 20 mm was chosen for the dollies in order to limit the tensile force. This relieves the manual execution and limits the surface damage to a small area. Furthermore the light metal dollies do not deform by the prevented stresses.

Adhesives and double-page adhesive tapes were tested for mounting. Adhesives are more applicable due to the higher residual surface tensile but they induce a higher local damage of the surface during the test. The experiment with adhesive in the application has only a few differences compared to the tensile bond test: there is no brace support therefore additional damages are easier to avoid and the measurement range is limited to 0.15-2 MPa. Different adhesives (Rite-Lok Si Gel, Ruderer 4918 und HBM X60) were tested. The adhesive Ruderer 4918 can be

te-Lok Si Gel, Ruderer 4918 und HBM X60). Der Klebstoff Ruderer 4918 ist nur mechanisch – durch schleifen – vom Probekörper und Stempel zu entfernen, was die Anwendung vor Ort sehr aufwendig macht. Das Rite-Lok Si Gel erhärtet schnell, mit Aceton ist es von der Oberfläche und dem Stempel leicht zu entfernen, und da es ein 1-Komponenten-Kleber ist, stellt die Dosierung kein Problem dar. Bei der Untersuchung wurde aber festgestellt, dass sich die Erhärtungszeit ab etwa 65% rel. Luftfeuchte enorm verlängert, was die Anwendung vor Ort deutlich behindert. Der im Bauwesen oft verwendete HBM X60 hat zwar als 2 – Komponentenklebstoff eine etwas kompliziertere Dosierung vor Ort, aber die Erhärtungszeit ist kurz und die Rückstände sind durch Erhitzen des Stempels wieder leicht zu entfernen. Die Messung mit doppelseitigen Klebebändern ist vor Ort auch mit einer geringen Anzahl von Stempeln einfach und schnell durchführbar. Um die Untersuchungen im Labor durchführen zu können wurde eine Einspannvorrichtung (Abb. 3) entwickelt und an der MPA der Universität Stuttgart hergestellt<sup>3</sup>.

removed only mechanically – by grinding – from the specimen and dolly, which makes the application on-site very intricate. The Rite-Lok Si Gel hardens very fast and can be removed easily with acetone from the specimen and dolly as it is a one-component adhesive and the dosage is not a problem. It was discovered during the experiments that the hardening time greatly extended above circa 65% relative humidity, which restrains the application on-site significantly. The HBM X60, which is commonly used in the construction industry, is a 2 component adhesive, so the dosage on-site is a little complicated, but the hardening time is very short and removing of the residual is simple by heating. The measurement with double-page adhesive tapes on-site with a minor number of dollies is simple and quickly applicable. In order to accomplish the experiment in laboratory environment, a fixing system was developed (Fig. 3). It was made at the MPA of the University of Stuttgart.



**Abbildung 3:** *Einspannvorrichtung für die Messungen in Labor*  
**Figure 3:** *Measuring apparatus, for testing in the laboratory*

Eine Zusammenfassung der Eigenschaften der getesteten Klebebänder enthält Abbildung 4. Die Ergebnisse wurden an verwittertem – Neckartäler Sandstein mit absandender Oberfläche – und unverwitterten Natursteinen –

A summary of the results of the tested adhesive tapes are presented in Figure 4. The used materials were on weathered – Neckartal sandstone with polished surface – and on not weathered – Rorschacher molassesand-

<sup>3</sup> Dank an den Schlossermeister Herrn Scheu, der mit vielen Anregungen zu dem Versuchsaufbau beigetragen hat.

Rorschacher Molassesandstein, Sander Schilfsandstein, Dogger -  $\beta$  - Sandstein aus Lauchheim, Muschelkalk aus Krenzheim - ermittelt.

stone, Sander Schilfsandstein, dogger -  $\beta$  - sandstone from Lauchheim, shell limestone from Krenzheim.

Aspekt	Duplomont 919	Coroplast 9211	3M VHB 4941
<b>Kosten</b>	niedrig	mittel	hoch
<b>Klebkraft</b>	mittel	hoch	sehr hoch
[N] [MPa]	~100 ~0,35	>150 >0,55	> 200 >0,70
<b>Festigkeit</b>	geringer, zu wenig	hoch	sehr hoch
[N] [MPa]	< ~80 <~0,28	>als max. Klebkraft	> als max. Klebkraft
<b>Messbereich</b>	niedriger	mittel	höher
[N] [MPa]	0~80 <sup>4</sup> 0,00 4~0,28	0~90 <sup>5</sup> 0,004~0,32	0~100 <sup>2</sup> 0,004~0,35
<b>Verarbeitbarkeit</b>	umständlicher	sehr gut	gut
<b>Dicke [mm]</b>	1,65	1,1	1,1
<b>Anpassung</b>	sehr gut	gut	gut

**Abbildung 4:** Überblick der getesteten Klebebänder  
**Figure 4:** Summary about the tested adhesive tape

### Ergebnisse der Versuchsreihen

Die vorliegenden Messergebnisse lassen folgende Rückschlüsse zu: (1) falls sich das Klebeband beim Aufkleben wieder ablöst, gibt es keine messbare Festigkeit; (2) falls das Klebeband zwar aufgeklebt wurde, Stempel und Klebeband aber während des Anfügens des Stempels herunter fallen: die Scherfestigkeit des Materials ist kleiner als 0,001 MPa; (3) falls der Stempel zwar mit dem Haken abgerissen wird, das Messgerät aber keine Kraft gemessen hat: die Haftzugfestigkeit ist kleiner als 0,0035 MPa; (4) falls das Gerät die Zugkraft gemessen hat und auf dem Klebeband Materialrückstände vorhanden sind: die Oberflächenzugfestigkeit des Materials ist annähernd  $\sigma_M = F_M/A_{st}$  [MPa], wo  $F_M$  = gemessene Kraft [N],  $A_{st}$  = Fläche des Stempels [mm<sup>2</sup>], (5) falls das Gerät die Zugkraft gemessen hat, aber auf dem Klebeband keine Materialrückstände geblieben sind oder das Versagen zwischen Klebeband und Stempeloberfläche

### The results of the experiments

The results shown allow the following conclusions: (1) if the tape is detached from the surface, there is no measureable strength; (2) if the tape can be glued on, but the dollies fall during attaching: the shear strength is less than 0,001 MPa; (3) if the dollies can be demolished without measured force, then the adhesive tensile strength was less than 0,0035 MPa; (4) if the device measures the force and on the tape there is remaining material: the surface tensile strength of the material is about  $\sigma_M = F_M/A_{st}$  [MPa], where  $F_M$  = measured force [N],  $A_{st}$  = area of the dolly [mm<sup>2</sup>]; (5) if the tensile force is measured, but the tape is clean or the failure is between the tape and the dolly then the surface tensile strength of the material is larger than  $\sigma_M = F_M/A_{st}$  [MPa].

<sup>4</sup> Das Klebeband versagt, zerreißt in der Mitte.

<sup>5</sup> die Haftzugfestigkeit zwischen Klebeband und Stempel ist kleiner, als die zwischen Klebeband und Oberfläche (Klebeband bleibt auf der Oberfläche kleben, ist aber leicht entfernbar)

eintritt: dann ist die Oberflächenzugfestigkeit des Materials größer als  $\sigma_M = F_M/A_{st}$  [Mpa].

Die Abbildung 5 zeigt einen Ergebnisvergleich von an gleichen Stellen - jeweils nebeneinander - durchgeführten Messungen mit dem PowerStrip® Test und mit der weiter entwickelten Methode auf unterschiedlich stark verwitterten Baumberger Kalksandsteinoberflächen (Nr. 1-10) und auf circa 30 Jahre alten Kalkputz (Nr. 11). Der Verwitterungsgrad war an einzelnen Stellen unterschiedlich. Nr. 1-10: Gesteinsoberfläche war intakt, ohne starke Anzeichen von Verwitterung; Nr. 11: abmehlende Oberfläche.

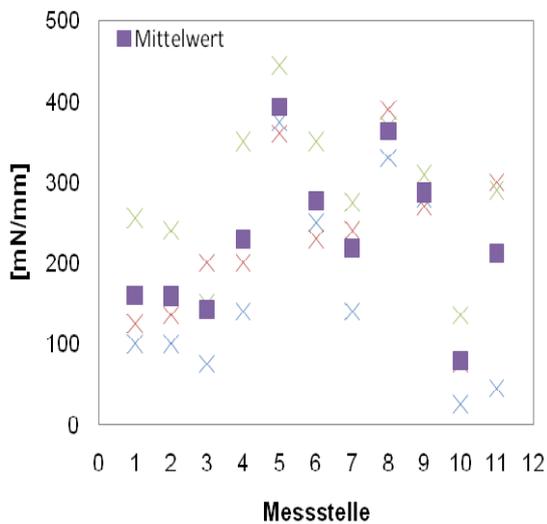
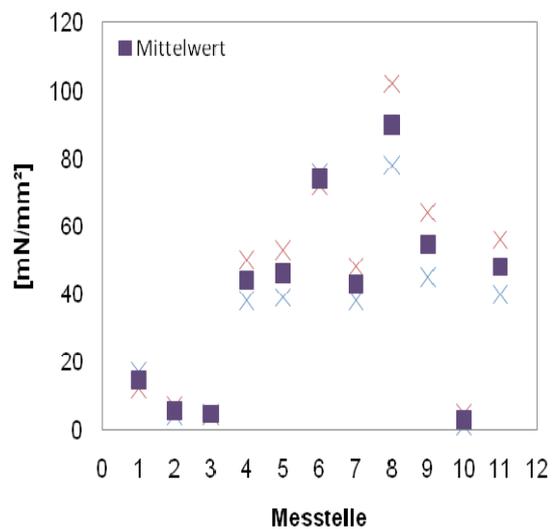


Figure 5 shows a comparison of the results from the same sample – each side by side – measurements made with PowerStrip® Test and with the refined method to very strongly weathered, carbonaceous bound Baumberger sandstone surfaces (Nos. 1-10) and at about 30 years old lime plaster surface (No. 11). The level of the weathering was on each area different. Nr. 1-10: the stone surface was intact without significant sign from weathering; No. 11: the surface was sanding.



**Abbildung 5:** Messergebnisse mit dem PowerStrip®-Test (links) und der neuen Methode (rechts)<sup>6</sup>  
**Figure 5:** Measurement result from the PowerStrip®-Test (left) and from the modified method (right)

Die Abbildungen zeigen die Streuung der an den gleichen Stellen gemessenen Werte jeweils verglichen mit dem ermittelten Mittelwert. Es ist zu erkennen, dass die Streuung unter gleichen Umständen bei der modifizierten Methode durchschnittlich kleiner ist, als beim ursprünglichen Verfahren.

The Figures show the variation of the measured value on the same surface compared to the calculated average value. It shows that the deviation of the value of the modified method is less under similar conditions than with the original test method.

## Zusammenfassung

Die Nachteile der Temperatur- und Luftfeuchteempfindlichkeit des PowerStrip®

## Summary

The disadvantages of the PowerStrip® Tests are the sensibility for temperature and hu-

<sup>6</sup> Dank an Frau Dipl.-Ing. J. Zallmanzig für die Ermöglichung der Versuche vor Ort und für Ihre Unterstützung

Tests, die zu einer deutlichen Beeinflussung der Testergebnisse führen können, wurden durch neue Lösungswege teilweise behoben, aber es gibt weiterhin offene Fragen und Verbesserungsmöglichkeiten. Beim jetzigen Stand der Untersuchungen ist eine zuverlässige Bestimmung der messtechnisch verursachten Streuung von Einzelwerten noch nicht möglich gewesen. Um diese prüfen zu können, sind homogene Probekörper mit einer sehr geringen Zugfestigkeit erforderlich. Weiterhin wird es notwendig sein, die Abhängigkeit von Umgebungstemperatur und Feuchtegehalt des Untergrundes heraus zu arbeiten, um den Anwendungsbereich der Methode für den Einsatz am Objekt beschreiben zu können. Zusätzlich ist neben weiteren Messungen die Entwicklung eines FE-Modells wünschenswert, das die Abhängigkeit der Messergebnisse von der Abrissgeschwindigkeit, dem Winkel der aufgetragenen Last und vom kreisförmigen Einsägen um den Stempel herum bestimmen bzw. überprüfen lässt.

midity, that can influence the test results considerably, were in part eliminated through the new approach, but there are some more unanswered questions and the possibility for improvement. A reliable calculation of the deviation the measurement technique caused variation is not possible at the present state of the experiments. In order to examine these very homogeneous specimens with very low tensile strength would be needed. Furthermore it will be necessary to test the dependence on the temperature and humidity of the surrounding area in order to be able to describe the application range on-site on the object. Additionally, it would be preferable beside the further measurements to design an FEM-model in order to control and describe the dependence of the test results on the demolition velocity, the angle of the applied load and circular saw around the dolly.

### Literatur / References

- [1] **Snethlage, R. (2008):** PowerStrip® Test, DBU Monitoring Bericht von 11-2008
- [2] **Snethlage, R., Auras, M., Meinhardt, J. (2010):** Leitfaden Naturstein-Monitoring, Fraunhofer IRB Verlag, 2010
- [3] **DIN 18555-6** Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Festmörtel; Bestimmung der Haftzugfestigkeit
- [4] **DIN EN 13892-8** Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen - Teil 8
- [5] **DIN 1048-2** Prüfverfahren für Beton; Festbeton in Bauwerken und Bauteilen
- [6] **DIN 1542** Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch
- [7] **DIN EN 1015-12** - Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Bestimmung der Haftzugfestigkeit von erhärteten Putzmörtel
- [8] **DIN EN 13318** Estrichmörtel und Estriche - Estrichmörtel und Estrichmassen - Eigenschaften und Anforderungen.

# ERMÜDUNGSVERHALTEN VON BETONSTAHL UNTER KORROSIONSBELASTUNG

## FATIGUE BEHAVIOUR OF REINFORCING STEEL UNDER GOING CORROSION

von/by: Tim Weirich

### Einleitung

In der 2008 grundlegend überarbeiteten Version der DIN 1045-1, vgl. hierzu auch [1], ist erstmalig ein expliziter Nachweis gegen Ermüdung, d.h. ein Betriebsfestigkeitsnachweis, verankert worden. Eine Dauerschwingfestigkeit ab einer Schwingzahl von zwei Mio. Lastwechseln, so wie sie noch bis vor wenigen Jahren im Bauwesen üblich war, ist nicht mehr gebräuchlich (siehe Abb.1).

Der Einfluss von Korrosion auf das Ermüdungsverhalten von Betonstahl ist sowohl in der Praxis als auch in der Literatur bekannt, allerdings noch nicht hinreichend genug abgeklärt. Deshalb wurden Dauerschwingversuche an Stahlproben u.a. mit einem Durchmesser von 16 mm unter gleichzeitig wirkender korrosiver Beanspruchung durchgeführt, insgesamt für vier unterschiedliche korrosive Medien.

Neben dem Verlauf der Wöhler-Linien, interessierte aus werkstofftechnologischer Sicht die Fragestellung, inwieweit die Anteile der Risseinleitungs- und Rissausbreitungsphase expositionsabhängig getrennt voneinander erfasst werden können. Diesbezüglich kamen verschiedene Prüfverfahren zur Risserkennung zum Einsatz, die sich insbesondere bezüglich ihrer Methodik unterscheiden.

Im folgenden Aufsatz wird der Einsatz der verwendeten Prüfmethode zur Risserkennung kurz geschildert, die Dauerschwingversuche mit den korrosiven Medien erläutert und beschrieben, sowie deren Ergebnisse diskutiert.

### Methoden der Risserkennung

Für die Separierung von Risseinleitungs- und Rissausbreitungsphase steht eine Vielzahl von Prüftechniken zur Verfügung. Ge-

### Introduction

In the 2008 completely revised version of DIN 1045-1 for the first time an explicit proof against fatigue, more a fatigue analysis, have been published. A limit on the fatigue strength at two million cycles, as it was formerly common in civil engineering, is no longer in use (see Fig.1).

The influence of corrosion on the fatigue behaviour is both in practice and in the literature well-known, but it is still not clarified enough. Therefore, fatigue tests at steel samples with a diameter of 16 mm were performed under going corrosion. The fatigue behaviour of the reinforcing steel was determined for four different corrosive media. Additionally to the course of the S-N curves crack initiation and crack growth of the steel specimen should be recorded separately from each other for the different media. Therefore, different testing methods for crack detection were used. They differ especially with respect to their methodology.

The article briefly describes the use of the testing methods for crack detection, explains the fatigue tests with the different corrosive media and discusses the test results.

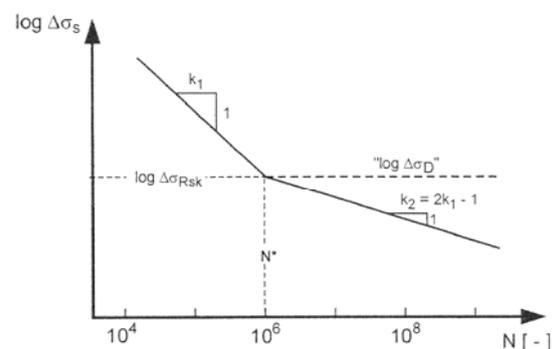


Abb. 1: Wöhler-Linie [1]/ Fig. 1: Woehler line [1]

### Testing Methods for crack detection

For the separation of the two phases crack

nerell unterscheiden sie sich bezüglich der Methodik der Risserkennung, wobei auch Einsatzgebiet und das zu untersuchende Material eine entscheidende Rolle für die Eignung des jeweiligen Prüfverfahrens spielen.

Für die Detektion von Anrissen und der Beobachtung des Risswachstums in Betonstählen wurden drei unterschiedliche Verfahren (Hysterese-Messung, Schallemissionsanalyse, Potentialssondenverfahren) ausgewählt und in Eignungsversuchen miteinander verglichen. Als Prüfkörper diente ein Betonstahl BSt 500 B mit einem Stabdurchmesser von 12,0 mm. Um Ermüdungsbrüche im Kräfteinleitungsbereiche zu vermeiden und um den Ort des möglichen Anrisses bereits vor Versuchsbeginn einzugrenzen, wurden die Proben mittig mit einem V-Kerb von 1,0 mm Tiefe versehen.

Die Grundidee der Hysterese-Messung beruht auf der Veränderung der Wegamplitude während des Dauerschwingversuchs. Bei der Schallemissionsanalyse macht man sich das Abstrahlen von Schallemissionen beim Abbau von Gefügeverspannungen zu nutze. Die Potentialsonde beruht dagegen auf dem Prinzip, dass ein elektrischer Strom dem Weg des geringsten Widerstands folgt, der bei Risswachstum zunimmt.

initiation and crack growth several non-destructive testing methods are available. In general, they differ in the method of crack detection. Otherwise, the application and the investigated material is important for the suitability of each testing method.

For the detection of crack initiation and crack growth in steel specimens three non-destructive testing methods (hysteresis measurement, acoustic emission analysis, potential drop method) were applied. They were compared in several preliminary tests with one another. The used sample was a ribbed reinforcing steel BSt 500 B with a diameter of 12.0 mm. In order to avoid fatigue fractures in the area of load introduction and to limit the location of a possible crack before the beginning of the experiment, the specimens had a centric notch of defined depth, up to 1.0 mm (point of crack initiation).

The basic idea of hysteresis measurement is based on changes of the displacement during the fatigue test. In the acoustic emission analysis the emission of acoustic signals from the material structure is recorded and analysed. The idea behind the potential drop method is that an electric current follows the path of least resistance. This current increases with crack growth.

Tab.1 : Vergleich der unterschiedlichen Prüftechniken

Tab.1: Comparison of different testing techniques

Prüftechnik	Schwingspielzahl bis zum...		Verhältnis $N_A/N_B$
	Anriss* $N_A$	Bruch $N_B$	
Hysterese-Messung	137.000	149.520	0,92
Schallemissionsanalyse	128.283	158.235	0,81
Potentialssondenverfahren	157.207	196.882	0,80

\* Schwingspielzahl, ab der mit der jew. Prüftechnik ein Risswachstum zu registrieren war

In Tab.1 werden die unterschiedlichen Schwingspielzahlen, ab denen ein weiteres Risswachstum im Kerb registriert werden konnte, den Schwingspielzahlen beim Bruch gegenübergestellt.

Bei Betrachtung des Verhältnis  $N_A/N_B$  wird bereits deutlich, dass beim Einsatz der Hys-

In Tab.1 the different numbers of cycles, from which a further crack growth could be registered in the notch, are compared with the numbers of cycles at failure.

For the hysteresis measurement the ratio of  $N_A/N_B$  shows that a crack growth in the notch could be clearly indicated only a few load

terese-Messung ein Risswachstum im Kerb erst kurz vor dem eigentlichen Stahlversagen unzweifelhaft registriert werden kann. Bei den Untersuchungen mit der Schallemissionsanalyse und dem Potentialsondenverfahren konnte das Risswachstum im Kerb dagegen frühzeitiger registriert werden. Sie weisen eine ähnliche Trennschärfe bzgl. der Erfassung des Risswachstums auf. Gegen einen Einsatz der Schallemissionsanalyse im Rahmen der Korrosionsermüdungsversuche spricht dennoch die hohe Anzahl von Störsignalen, die selbst bei kontrollierten Umgebungsbedingungen und im Vergleich zu den Korrosionsversuchen relativ kurzen Versuchszeiten von wenigen Tagen nur mit hohem Aufwand reduziert werden konnten. Das Potentialsondenverfahren hingegen zeigt bei den durchgeführten Messungen ein stabiles Langzeitverhalten. Aus diesem Grund wird diese Prüftechnik in den Zerstörungsversuchen, d.h. in den Folgend beschriebenen Hauptversuchen, eingesetzt.

### Versuchsprogramm

Um bei den Untersuchungen zur Korrosionsermüdung die hohen Schwingspielzahlen (mehrere Mio. Lastwechsel) bei gleichzeitig niedriger Frequenz in der vorgesehenen Projektdauer von drei Jahren zu realisieren, kam für die Hauptversuche ein Prüfrahmen (Abb.4) zum Einsatz, mit dem bis zu 4 Proben parallel geprüft werden konnten.

cycles before the final failure of the reinforcing steel. While the investigations with the acoustic emission analysis and the potential drop method the crack growth in the notch can be registered earlier. They demonstrate a large selectivity with respect to crack growth. However, due to the high number of disturbing signals is a usage of the acoustic emission analysis during the corrosion-fatigue tests impossible. Only under controlled environmental conditions and a short test time (of a few days) it is possible to minimize the number of signals to an acceptable level. On the other hand the potential drop method shows a stable long-term behaviour while the first measurements. Therefore this testing method is used in the main experiments described below.

### Research program

In order to realize the studies on the corrosion fatigue in the planned project duration of three years, a load frame (Fig.4) was used for the main experiments due to the high number of cycles (many million load cycles) and the low frequency during the fatigue tests. Up to four specimens could be examined in parallel.

The aim was to analyse the fatigue behaviour of reinforcing steel under different, practice-oriented environmental conditions and to determine from this Woehler lines (S-N curves).

Tab. 2: Versuchparameter für die Untersuchungen zur Korrosionsermüdung

Tab. 2: Experimental parameters for the studies on corrosion fatigue

Betonstahl	BSt 500 S (B); d = 16,0 mm <u>Herstellung:</u> Tempcore-Verfahren <u>Hersteller:</u> Elbe-Stahlwerke Feralpi
Frequenz	<u>Versuche mit korrosiven Medien:</u> 0,5 Hz; <u>Referenzversuche:</u> 15,0 Hz
Belastung	<u>Oberspannung:</u> konst. 300 N/mm <sup>2</sup> <u>Schwingbreiten:</u> Variation der Schwingbreite auf vier Lastniveaus Lastniveau 1: $\Delta\sigma = 250,0$ N/mm <sup>2</sup> Lastniveau 3: $\Delta\sigma = 175,0$ N/mm <sup>2</sup> Lastniveau 2: $\Delta\sigma = 200,0$ N/mm <sup>2</sup> Lastniveau 4: $\Delta\sigma = 145,0$ N/mm <sup>2</sup>

Ziel war, das Dauerschwingverhalten von Betonstahl bei verschiedenen, praxis-relevanten Expositionen zu analysieren und daraus Wöhler-Linien zu bestimmen. Dazu werden die Proben bei zentrischer Beanspruchung im Zugschwellbereich schwingend geprüft (entspricht auch den im Stahlbeton vorherrschenden Beanspruchungen). Tab.2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Parameter zu den Untersuchungen.

Für die Untersuchung der Korrosionsermüdung wurde je Lastniveau ein Probenumfang von 6 bzw. 4 Proben gewählt. Je Medium entspricht dies 20 Dauerschwingversuchen, die sich auf vier Lastniveaus aufteilen. Die unterschiedlichen Medien sind in Tab.3 genauer aufgelistet. Des Weiteren wurden 20 Proben an Luft bei einer Frequenz von 15 Hz geprüft. So kam man auf einen Probenumfang von insgesamt 100 Dauerschwingversuchen sowie eine Vielzahl weiterer Zusatz- bzw. Ergänzungsversuchen, die hier nur nebenbei Erwähnung finden sollen.

Die Betonstahlstäbe wurden auf der freien Länge mit einem korrosiven Medium (siehe Abb.2, rechte Bildhälfte) beaufschlagt.

Diese Versuchsanordnung ist vergleichbar mit der Situation im Bauwerk, bei der ein Riss bis zur Bewehrung gewachsen ist und somit ein Kontakt zwischen korrosivem Medium und Betonstahl möglich ist (Abb.2, linke Bildhälfte). Begleitet wurden alle Dauerschwingversuche durch Messungen mit dem Potentialsondenverfahren.

### Versuchsergebnisse

#### - Wöhler – Linien

In Abb.3 sind die Wöhler-Linien der fünf Versuchsreihen (vier Versuchsreihen mit unterschiedlichen Medien und einer Versuchsreihe an Luft) einander gegenübergestellt. Zusätzlich ist der Verlauf der Bemessungs-Wöhler-Line, wie sie in der aktuellen DIN 1045-1:2008 beschrieben wird, aufgetragen. Während die Dauerschwingversuche an Luft

Therefore, the samples were tested in dynamic-tensile tests with a centric swinging load (equivalent to the stresses in reinforced concrete). Tab.2 gives an overview of the most important parameters to the investigations. For the investigation of the corrosion-fatigue the number of samples consisted for each load level of 6 and/or 4 samples. For each medium this corresponds to 20 fatigue tests, which divide themselves on four load levels. The various media are listed in Tab.3 in more detail. In addition, 20 samples were tested in air with a frequency of 15 Hz. The total number of samples includes altogether 100 fatigue tests as well as a number of additional tests that should be mentioned only in passing.

The reinforcing steel bars were exposed in the free length to a corrosive medium (see Fig.2, right half). This experimental setup is similar to the situation in the building where a crack has grown to the reinforcement and therefore a contact between a corrosive medium and the reinforcing steel is possible (Fig.2, left half). All fatigue tests were accompanied by measurements with the potential drop method.

Tab. 3: Korrosive Medien

Tab. 3: Corrosive media

Medium I: gesät. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lsg. ohne Chlorid (pH 12,6)
Medium II: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lsg.; 3,0 M.-% Chlorid (pH 12,6)
Medium III: $\text{CaCO}_3$ -Lsg. ohne Chlorid (pH 8,0)
Medium IV: $\text{CaCO}_3$ -Lsg.; 1,0 M.-% Chlorid (pH 8,0)

### Research results

#### - Woehler lines (S-N curves)

In Fig.3 the Woehler lines of the five test series (four test series with different media and one series of tests in air) are compared to each other. Additionally, the course of the Woehler line, as described in the current DIN 1045-1:2008, is also applied in the figure.

auf der freien Probenlänge versagten, brachen die Proben bei den Medien I bis III ausschließlich im Bereich der Drei-Phasen-Grenze (vgl. Abb.2). Bei Medium IV kam es auch zu mittigen Brüchen in der Prüflösung. Die zu den Versuchspunkten dazugehörigen Wöhler-Linien wurden gemäß [2] konstruiert. Sie entspricht der Winkelhalbierenden zweier linearer Regressionen, welche zum einen die Schwingspielzahl  $N$  und zum anderen die Schwingbreite  $\Delta\sigma$  als streuende Größe zugrunde legen. Deutlich sind die unterschiedlichen Verläufe zu erkennen. Zu erwarten war, dass der Einfluss der Medien und der damit verbundenen Korrosion auf das Dauerschwingverhalten des Betonstahls mit abnehmender Schwingbreite (siehe Tab.2) und somit zunehmender Versuchsdauer immer deutlicher wird.

Überraschend zeigten aber auch die Ergebnisse auf Lastniveau 1 ( $\Delta\sigma=250,0$  N/mm<sup>2</sup>) bereits einen signifikanten Einfluss der Medien. Während die Ergebnisse bei Medium I, wie erwartet, noch in der Größenordnung der Referenzmessung (rd. 700.000 LW) liegen, weichen die Ergebnisse der Dauerschwingversuche für die Medien II bis IV mit einer Schwingspielzahl von ca. 300.000 bis 400.000 Lastwechseln bereits deutlich von der Referenzmessung ab.

Zunächst überraschend war die Abminderung im unteren Verlauf zwischen Referenzmessung und dem passivierenden Prüfmedium I. Die Abminderung ist jedoch mit dem hier gewählten Versuchsaufbau (siehe Abb.2) erklärbar, wo an der 3-Phasen-Grenze eine Umwandlung zu Calciumcarbonat (vergleichbar mit Medium III) und damit eine anodische Eisenauflösung nicht verhindert werden konnte. Somit handelt es sich hierbei, anders als erwartet, nicht um eine Versuchsreihe, die völlig frei von Korrosion stattfindet.

The fatigue tests in air fail in the free length of the sample, whereas the samples with the media I - III only break in the three-phase boundary (see Fig.2). In medium IV, there were also central breaks in the test solution. The S-N curves to the test results were created according to [2]. It corresponds to the angle bisector of two linear regressions, which have the number of cycles  $N$  and the stress amplitude  $\Delta\sigma$  as the measured parameters with variance. Significantly different courses are seen. As expected, the influence of the media (and the resulting corrosion) on the fatigue behaviour of reinforcing steel is becoming clearer with a decreasing stress amplitude and/or with a increasing test time (see Tab. 2). Surprisingly, the results on load level 1 ( $\Delta\sigma=250.0$  N/mm<sup>2</sup>) already showed a significant influence of the media. The tests with medium I show, as expected, the similar values as the reference measurements in air (about 700,000 load cycles). Instead, the results of the fatigue tests for media II to IV with a number of cycles from approx. 300,000 to 400,000 deviate significantly from the reference measurement.

The comparison between the S-N curves of the passivating test medium I and the reference measurement show surprising differences. The reduction in the Woehler line to medium I can be explained by the chosen experimental setup (see Fig.2). At the three-phase boundary the calcium hydroxide convert to calcium carbonate (comparable to medium III). An anodic reaction (dissolution of iron) cannot be prevented any longer. It is therefore not an experimental series that is totally free of corrosion. This also explains the steep drop in the Woehler line for medium I at lower stress amplitudes.

The fatigue tests for the media II and III show similar results.

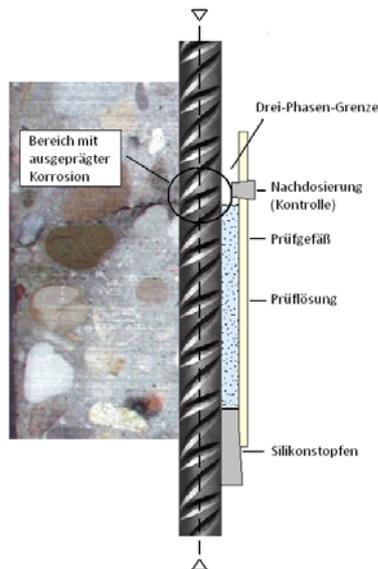


Abb.2: Versuchsaufbau

Fig.2: Experimental setup

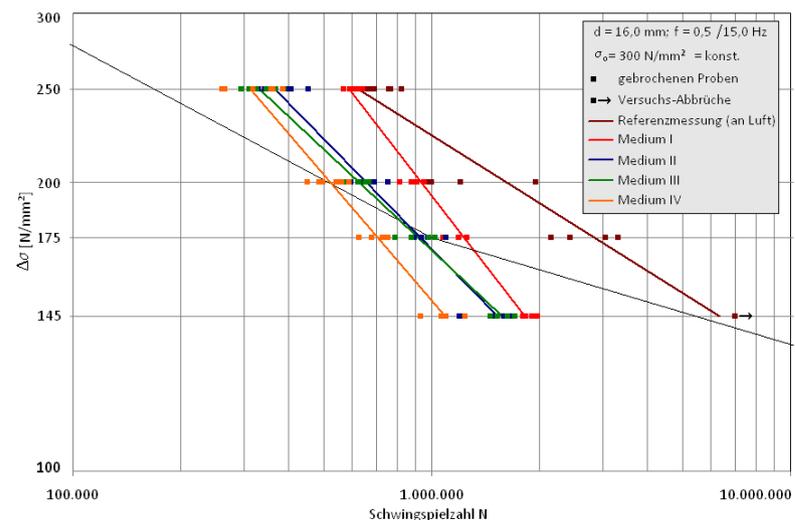


Abb.3: Wöhler-Linien der fünf Versuchsreihen (an Luft und bei den vier Medien)

Fig.3: S-N curves of the five test series

Dies erklärt auch den steilen Abfall der Wöhler-Linie für Medium I im Hinblick auf geringere Schwingbreiten. Die Dauerschwingversuche an den beiden Medien II und III zeigen vergleichbare Ergebnisse. Während Medium III im Vergleich zu Medium II auf Lastniveau 1 noch geringere Schwingspielzahlen bei Bruch aufweist, scheint sich dieses Verhalten mit zunehmender Versuchsdauer (vgl. Lastniveau 4) umzukehren. Inwiefern bei Medium II der Einfluss einer möglichen Wasserstoffversprödung der Betonstahloberfläche, wie sie beispielsweise in [3] für Spannstahl beschrieben wird und im vorliegenden Fall bei einer erhöhten Härte des Randbereichs (Tempcore-Stähle) und dem Einfluss von Chloriden durchaus möglich ist, eine Rolle spielt, ist bisher unbekannt und sollte Gegenstand künftiger Untersuchungen sein.

Den größten Einfluss auf das Dauerschwingverhalten von Betonstahl hatte Medium IV. Schon bei einer hohen Schwingbreite, und einer damit verbundenen kurzen Versuchsdauer (vgl. Lastniveau 1), ist eine deutliche Abweichung von den Ergebnissen der Referenzmessung bzw. der anderen drei Versuchsreihen zu erkennen. Diese Tendenz wird auch bei geringeren Schwingbrei-

On load level 1 medium III have still smaller numbers of cycles at failure compared with medium II. However, with increasing test duration this behaviour seems to reverse itself (see load level 4). A possible hydrogen embrittlement of the reinforcing steel surface by the influence of medium II, as it is for example described in [3] for prestressing steel (made possible by an increased hardness of the edge area of Tempcore steel and by the influence of chlorides), is unknown and should be subject to future investigations.

The biggest influence on the fatigue behavior of reinforcing steel was observed for medium IV. Already with a high stress amplitude (and therefore short test duration; see load level 1) a clear difference can be recognized from the results of the reference measurement or the other three test series. This trend is also confirmed at lower stress amplitudes. With a stress range of 145 N/mm<sup>2</sup> (load level 4), the fatigue tests for medium IV have a number of cycles at failure of about 1.000.000. For the other three media, however, a number of cycles at failure from 1.600.000 to 1.900.000 can be indicated.

#### - crack lines

In addition to the numbers of cycles at failure

ten bestätigt. So weisen die Dauerschwingversuche für Medium IV bei einer Schwingbreite von 145 N/mm<sup>2</sup> (Lastniveau 4) eine Bruchschwingspielzahl von ca. 1.000.000 Lastwechseln auf, während die anderen drei Medien Schwingspielzahlen von 1.600.000 bis 1.900.000 Lastwechseln beim Bruch aufzeigen.

#### - Anriss – Linien

Um bei den Untersuchungen, neben den Bruchschwingspielzahlen bei den unterschiedlichen Medien, weitere Aussagen über den Einfluss der Korrosion auf das Dauerschwingverhalten von Betonstahl machen zu können, wurden alle Dauerschwingversuche durch Messungen mit dem Potentialsondenverfahren begleitet. Somit konnte der Anteil, den die Rissausbreitungsphase am gesamten Schadensverlauf hat, miterfasst werden. Abb.5 zeigt für alle vier Medien sowohl den Verlauf der Wöhler-Linie, als auch den Verlauf einer so genannten Anriss-Linie (gestrichelte Linien). Diese Anriss-Linien repräsentieren bei der für das Potentialsondenverfahren verwendeten Messstrecke den Zeitpunkt, ab dem der Riss bereits eine Tiefe von 1,0 mm erreicht hat. Nach [4] spricht man in diesem Zusammenhang von der technischen Risskeimbildung. Ab diesem Zeitpunkt findet die Rissausbreitung ausschließlich senkrecht zur größten Normalspannung statt und wächst bei jedem Lastwechsel um einen bestimmten Betrag voran (stabiles Risswachstum). In den Tabellen in Abb.5 ist für jedes Medium das Verhältnis von der Schwingspielzahl bei Anriss ( $N_A$ ) zu der Bruchschwingspielzahl ( $N_B$ ) aufgetragen. Des Weiteren wird die durchschnittliche Anzahl der Schwingspiele  $\Delta N$ , die zwischen Anriss und Bruch der Probe stattfanden, aufgeführt. Deutlich ist erkennbar, dass unabhängig vom Medium die Korrosion nur einen geringen Einfluss auf die Phase der Rissausbreitung hat. Vielmehr unterscheiden sich die Ergebnisse der Ver-

for the different media, further statements about the impact of corrosion on the fatigue behaviour of reinforcing steel should be made.



Abb.4: Prüfeinrichtung/ Fig.4: Testing facility

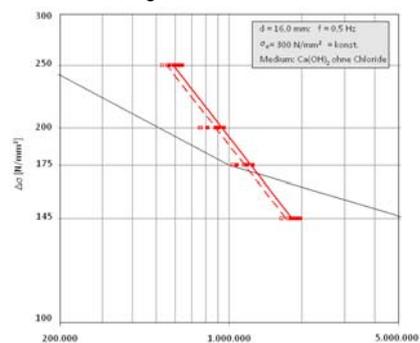
Therefore, all fatigue tests were examined at the same time by measurements with the potential drop method. Thus, the part of the crack growth phase of the progress of damage could be determined. Fig.5 shows for all four media, both the course of the Woehler line, as well as the course of the so-called crack line (dashed lines). These crack-lines represent the point, at which the crack reaches a depth of 1.0 mm (measured by the potential drop method). According to [4], in this context we speak of the technical crack nucleation. From this point on the crack growth takes place only perpendicular to the largest normal stress and grows with each load cycle by a certain amount (stable crack growth).

The tables in Fig.5 show for each medium the ratio of the number of cycles at crack initiation ( $N_A$ ) to the number of cycles at failure ( $N_B$ ). Furthermore, the average number of cycles  $\Delta N$  between crack initiation and failure of the sample is indicated. The experiments show that the corrosion (regardless of the medium) has just little influence on the phase of the crack growth. In fact, the results of the test series differ with regard to the crack initiation phase. Thus, the test results indicate that the corrosion under the

suchsreihen bezüglich der Risseinleitungsphase. Somit weisen auch hier die Versuchsergebnisse darauf hin, dass die Korrosion unter den vorliegenden Randbedingungen insbesondere einen Einfluss auf die Entstehung des Anrisses und weniger auf das Wachstum des Risses hat.

present boundary conditions has an influence on the beginning of the crack and less on the growth of the crack.

**Medium I : Ca(OH)<sub>2</sub> ohne Chlorid**  
 → Porenlösung des Zementsteins



z.B. Gründungen



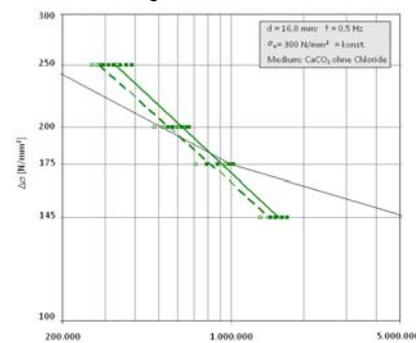
Δσ [N/mm <sup>2</sup> ]	Medium I N <sub>a</sub> /N <sub>b</sub> (ΔN)
250	0,934 (40.349)
200	0,926 (64.409)
175	0,941 (71.269)
145	0,954 (85.248)

z.B. Lärmschutzwände

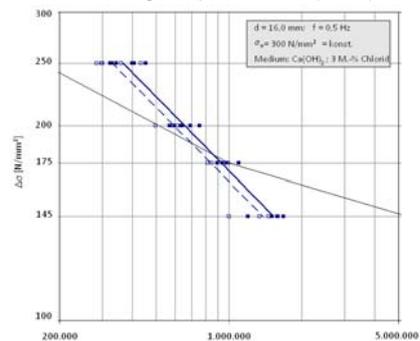


Δσ [N/mm <sup>2</sup> ]	Medium III N <sub>a</sub> /N <sub>b</sub> (ΔN)
250	0,890 (36.338)
200	0,901 (60.489)
175	0,907 (82.675)
145	0,906(149.806)

**Medium III : CaCO<sub>3</sub> ohne Chlorid**  
 → Porenlösung d. carbonatisierten Betons



**Medium II : Ca(OH)<sub>2</sub>; 3 M.-% Chlorid**  
 → tausalzhaltiges Spritzwasser (Meer)



z.B. Offshore-Bauwerke



Δσ [N/mm <sup>2</sup> ]	Medium II N <sub>a</sub> /N <sub>b</sub> (ΔN)
250	0,900 (36.018)
200	0,904 (62.546)
175	0,910 (87.897)
145	0,896(148.397)

z.B. Straßenbrücken



Δσ [N/mm <sup>2</sup> ]	Medium IV N <sub>a</sub> /N <sub>b</sub> (ΔN)
250	0,804 (58.976)
200	0,807 (91.093)
175	0,867 (92.520)
145	0,878(131.872)

**Medium IV : CaCO<sub>3</sub>; 1 M.-% Chlorid**  
 → tausalzhaltiger Sprühnebel

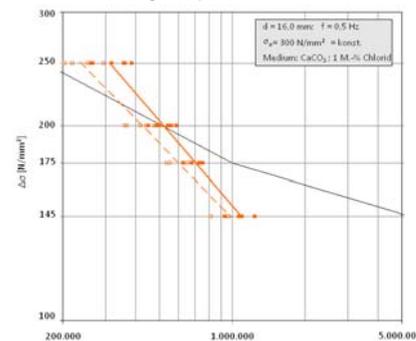


Abb.5: Wöhler-Linie und Anrisslinie für die vier unterschiedlichen Medien

Fig.5: Woehlerline and crack line for the four different media

**Zusammenfassung**

Im Rahmen der Untersuchungen wurde das Ermüdungsverhalten von Betonstahl unter Korrosionsbedingungen betrachtet. Dazu sind unter anderen vier verschiedene, für die Praxis relevante Expositionen näher untersucht worden. Es konnte gezeigt werden, dass die Wöhler-Linien expositionsbedingt recht unterschiedliche Verläufe aufweisen. So führt insbesondere der Einsatz von chloridhaltigen Medien zu einer deutlichen Reduzierung der Bruchschwingspielzahl bezogen auf die Referenzmessungen an Luft. Um bei den Untersuchungen, neben den Bruchschwingspielzahlen bei den unterschiedlichen Medien, weitere Aussagen über

**Summary**

In the context of the investigations the fatigue behaviour of reinforcing steel under going corrosion was considered. Therefore, the fatigue behaviour of reinforcing steel under different, practice-oriented environmental conditions was analysed in more detail. It could be shown that the S-N curves have quite different exposure-related courses. Especially, the use of chloride containing media leads to a significant reduction in the number of cycles at failure relative to the reference measurements in air. In addition to the numbers of cycles at failure for the different media, further statements about the impact of corrosion on

den Einfluss der Korrosion auf das Dauerschwingverhalten von Betonstahl machen zu können, wurden bei allen Dauerschwingversuchen Risseinleitungs- und Rissausbreitungsphase mit Hilfe einer geeigneten Prüftechnik getrennt voneinander erfasst.

Dazu wurden im Vorfeld Versuche mit drei Prüftechniken – Hysterese-Messung, Schallemissionsanalyse, Potentialsondenverfahren durchgeführt, welche sich insbesondere in ihrer Methodik unterscheiden. Eignungsversuche an gekerbten Betonstahlproben ergaben, dass das Potentialsondenverfahren die besten Voraussetzungen für einen Einsatz während der Ermüdungsversuche mit Korrosion aufweist. So konnte bei den durchgeführten Messungen mit dem Potentialsondenverfahren sowohl das Risswachstum im Kerb frühzeitig registriert als auch ein stabiles Langzeitverhalten erreicht werden.

Entstanden sind dadurch für alle vier untersuchten Medien Wöhler-Linien mit den dazugehörigen Anriss-Linien. Die Anriss-Linie repräsentiert dabei die Linie, bei der der Riss bereits eine Tiefe von 1,0 mm erreicht hat. Die Rissausbreitung findet ab diesem Zeitpunkt ausschließlich senkrecht zur größten Normalspannung statt und wächst bei jedem Lastwechsel um einen bestimmten Betrag voran (stabiles Risswachstum).

Beim Vergleich der Anriss-Linien mit den Bruch-Linien zeigt sich, dass unabhängig vom Medium die Korrosion nur einen geringen Einfluss auf die Phase der Rissausbreitung hat. Vielmehr unterscheiden sich die Ergebnisse der Versuchsreihen bezüglich der Risseinleitungsphase. Somit hat die Korrosion unter den vorliegenden Randbedingungen insbesondere einen Einfluss auf die Entstehung des Anrisses und weniger auf das Wachstum des Risses.

Der Einfluss einer möglichen Wasserstoffversprödung der Betonstahlfläche, wie sie beispielsweise bei Versuchen mit Spannstahl auftritt und im vorliegenden

the fatigue behaviour of reinforcing steel should be made. Therefore, all fatigue tests were examined by a suitable testing method to record crack initiation and crack growth separately.

At the beginning of the investigations, experiments with three different testing methods – hysteresis measurement, acoustic emission analysis, potential drop method – were made. They differ especially in the method of crack detection. In several preliminary tests at samples with a centric notch, the potential drop method showed the best requirements for the use at the fatigue tests under going corrosion. While the measurements with the potential drop method the crack growth in the notch could be registered early. Furthermore, a stable long-term behaviour could be achieved. From the test results the S-N curves with the corresponding crack lines can be calculated for all four examined media. The crack line represents the point, at which the crack reaches a depth of 1.0 mm (measured by the potential drop method). From this point on the crack growth takes place only perpendicular to the largest normal stress and grows with each load cycle by a certain amount (stable crack growth).

The comparison between the crack lines and the Woehler lines show that the corrosion (regardless of the medium) has just little influence on the phase of the crack growth. In fact, the results of the test series differ with regard to the crack initiation phase. Thus, the test results indicate that the corrosion under the present boundary conditions has an influence on the beginning of the crack and less on the growth of the crack.

The influence of a possible hydrogen embrittlement of the reinforcing steel surface, as in tests with prestressing steel (made possible by an increased hardness of the edge area of Tempcore steel and by the influence of chlorides), was not investigated (see [5]).

A comparison of the results with previous

Fall bei einer erhöhten Härte des Randbereichs (Tempcore-Stähle) und dem Einfluss von Chloriden durchaus möglich ist, wurde nicht untersucht (vgl. dazu [5]).

Ein Vergleich der Ergebnissen mit früheren Untersuchungen, bei denen entweder eine Betondeckung vorhanden war oder die Frequenz weiter reduziert wurde, zeigen, dass das Ermüdungsverhalten von Betonstahl von einer Vielzahl von Parametern und den Umgebungsbedingungen abhängig ist. Die durchgeführten Untersuchungen können die Realität somit nur exemplarisch abbilden.

### Danksagung

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wird für die finanzielle Unterstützung des zugrunde liegenden Projektes gedankt.

### Literatur / References

- [1] **Deutscher Normenausschuss:** *DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton*, DIN Normen, 2008
- [2] **Volkwein, A.:** *Arbeitspapier zur Erarbeitung einer Richtlinie zur Auswertung von Dauer-schwingversuchen*, Bearbeitungsstand: 11.04.10 (unveröffentlicht)
- [3] **Moersch, J.:** *Zur wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion von hochfesten Spannstählen – Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Spannbetonbauten*, Berlin, DAfStb, Heft 563, Beuth Verlag, 2005.
- [4] **Läpple, V.:** *Einführung in die Festigkeitslehre*, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2008.
- [5] **RUSTEEL-Project-Title:** *Effects of corrosion on low-cycle fatigue (seismic) behaviour of high strength steel reinforcing bars*, European Commission Research Directorate-General, Research Fund for Coal and Steel, Grant Agreement No RFSR-CT-2009-00023.

studies (studies with a concrete cover or a further reduced frequency) shows that the fatigue behaviour of reinforcing steel depends on a large number of parameters and the environmental conditions.

The accomplished investigations can illustrate the reality only exemplarily.

### Acknowledgement

The Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) is thanked for the financial support of the underlying project.

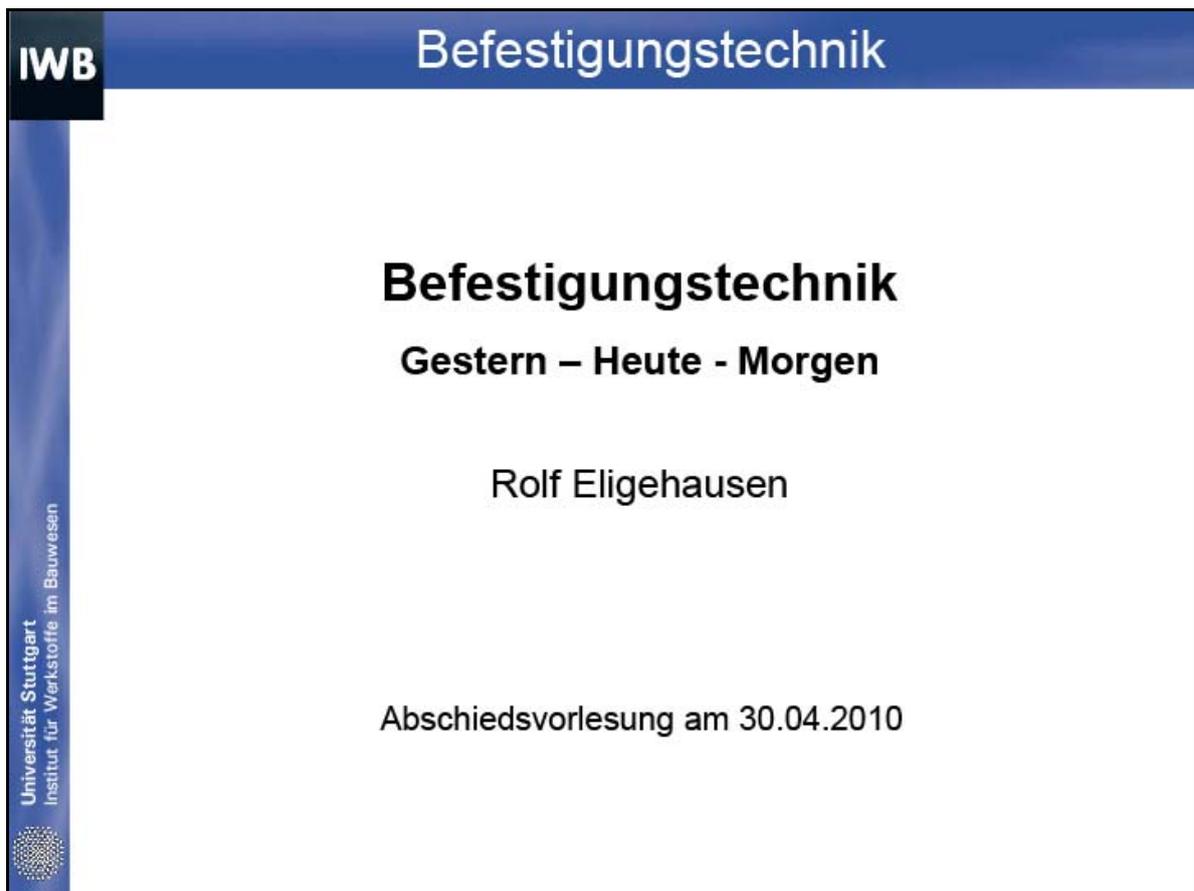
## VORTRAGSVERANSTALTUNGEN, SYMPOSIEN, WORKSHOPS, KONFERENZEN

2008



<b>Titel:</b>	7th International PhD-Symposium in Civil Engineering
<b>Zeitpunkt:</b>	11. bis 13. September 2008
<b>Veranstalter:</b>	fib; Universität Stuttgart
<b>Veranstaltungsort:</b>	Universität Stuttgart
<b>Tagungsband:</b>	Buch und CD für 15,- € erhältlich über Frau Simone Stumpp (stumpp@iwb.uni-stuttgart.de)

2009



**Titel:** Abschiedsvorlesung Prof. Dr.-Ing. Rolf Eligehausen

**Zeitpunkt:** 30.04.2010

**Veranstalter:** Universität Stuttgart

**Veranstaltungsort:** IWB, Universität Stuttgart

**IWB**

**Was die Welt zusammenhält  
befestigen und verbinden**



Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann

Institut für Werkstoffe im Bauwesen  
Abteilung Befestigungs- und Verstärkungsmethoden

Universität Stuttgart  
Institute of Construction Materials

- Titel:** Was die Welt zusammenhält – befestigen und verbinden  
Antrittsvorlesung Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann
- Zeitpunkt:** 28.10.2010
- Veranstalter:** Universität Stuttgart
- Veranstaltungsort:** IWB, Universität Stuttgart

**PUBLIKATIONEN / PUBLICATIONS****2008**

Appa Rao, G.; Mahajan, M.; Gangaram, M.; Eligehausen, R.: Performance of nonseismically designed RC beam column joints strengthened by various schemes subjected to seismic loads - a review. - In: *Journal of Structural Engineering* 35 (2008), Nr. 1, S. 52-57

Appa Rao, G.; Raghu Prasad, B.K.; Eligehausen, R.: Characterization of concrete failure from load-CMOD curves and tension softening modulus. - In: *Journal of Structural Engineering* 35 (2008), Nr. 3, S. 207-215

Appa Rao, G.; Vijayanand, I.: Studies on ductility and evaluation of minimum flexural reinforcement in RC beams. - In: *Materials and Structures* 41 (2008), Nr. 4, S. 759-771

Asmus, J.; Eligehausen, R.; Schneider, J.: Schubdorne nach neuer DIN 1045-1 - Anforderungen, Bemessung, praktische Anwendung. - In: *Betonwerk und Fertigteiltechnik* (2008), Nr. 252. *Beton-tage, Ulm*, S. 108-109

Bachmaier, S.: Event-based acoustic emission technique for structural health monitoring using wireless sensor networks. - In: Gehlen, Ch.; Eligehausen, R. (Eds.): *7th Int. PhD Symposium in Civil Engineering; Stuttgart, September 11th-13th 2008*. Stuttgart : Universität, 2008, S. 3-11

Beutel, R.; Reinhardt, H.-W.; Grosse, C. U.; Glaubitt, A.; Krause, M.; Maierhofer, C.; Algernon, D.; Wigggenhauser, H.; Schickert, M.: Comparative performance tests and validation of NDT methods for concrete testing. In: *Journal of Nondestructive Evaluation* 27 (2008), No. 1-3, pp 59-65

Bezecny, L.: Einfluss der Betonfeuchte auf das Tragverhalten von Verbunddübeln (Epoxidharz-System). - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07*. - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 37-42

Charuchaimontri, T.; Senjuntichai, T.; Otbolt, J.; Limsuwan, E.: Effect of lap reinforcement in link slabs of highway bridges. - In: *Engineering Structures* 30 (2008), Nr. 2, S. 546-560

Chatzichrisafis, P.; Bachmeier, S.: Datenerfassung und -verarbeitung durch drahtlose Sensornetze für das Bauwerksmonitoring. - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07*. - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 27-36

Dauberschmidt, C.; Sodeikat, C.; Schießl, P.; Gehlen, C.: Monitoring von Verkehrsbauten: kontinuierliche Zustandserfassung zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit. - In: Gieler-Breßmer, S.: *3. Kolloquium Verkehrsbauten - Schwerpunkt Parkhäuser, Brücken, 29. und 30. Januar 2008*. Ostfildern : TAE, 2008

Dauberschmidt, Ch.; Sodeikat, Ch.; Schießl, P.; Gehlen, Ch.: Monitoring von Verkehrsbauten - kontinuierliche Zustandserfassung. - In: *Tiefbau* (2008), Nr. 3, S. 135-141

Eligehausen, R.; Fuchs, W.: Verankerungssysteme : aktueller Stand. - In: Berger, J.; Fischer, A.; Himburg, S.; Kramp, M. (Hrsg.): *Berliner Hoch- und Ingenieurbaukolloquium BHIK 08 : Innovative Fasadentechnik*. Aachen : Shaker, 2008. – (Berichte aus dem Bauwesen), S. 35-50

Eligehausen, R.; Fuchs, W.; Wildermuth, A.: Dübel unter Zuglast in Leicht- und Normalbeton. - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07*. - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 43-50

Fischer, C.: Design of beam end specimen for investigations of bond strength on corroded reinforcement. - In: Gehlen, C.; Eligehausen, R. (Eds.): *7th Int. PhD Symposium in Civil Engineering; Stuttgart, September 11th-13th 2008*. Stuttgart : Universität, 2008. S. 15-23

Fischer, C.: Probabilistische Dauerhaftigkeitsuntersuchungen an einem 2-Schicht-Instandsetzungssystem für Stahlbetonbauteile. - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07*. - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 51-60

Gehlen, C.: Widmung Prof. Schießl zum 65. Geburtstag. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 103 (2008), Nr. 7, S. 518-519

Gehlen, C.; Mayer, T.F.; Schiessl, P.: Von Bausteinen eines nachhaltigen Lebenszyklusmanagements für Ingenieurbauwerke. - In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung : *Fachtagung Bauwerksdiagnose - Praktische Anwendungen zerstörungsfreier Prüfungen und Zukunftsaufgaben; 21.-22. Februar 2008, Berlin*. Berlin : DGZfP, 2008

Gehlen, C.; Reinhardt, H.W.; Mönning, S.: Potenziale von Superabsorbentern im Betonbau - Von der Übersicht ins Detail. In: *Betonwerk + Fertigteil-Technik* 74 (2008), Nr. 2, S. 20-21

Genesisio, G. Design Examples: Anchoring to Concrete according to ACI 318-05 Appendix D. In: *Advanced Topics in Anchorage to Concrete, New Zealand Concrete Society (NZCS), Auckland, New Zealand, 19.03.2008*.

Genesisio, G.; Eligehausen, R.: Seismic assessment and retrofit of poor detailed reinforced concrete exterior beam-column joints. - In: Indian Institute of Technology : *Earthquake Engineering for Sustainable Structures : Proceedings of the TU9-IITM Indo-German Workshop, 30th November - 2nd December, Chennai*. Madras : Indian Inst. of Technology, 2008

Grosse, C.; McLaskey, G.; Bachmaier, S.; Glaser, S.D.; Krüger, M.: A hybrid wireless sensor network for acoustic emission testing in SHM. In: Masayoshi T. (Ed.): *Proceedings of SPIE. Smart Structures and Materials 2008: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems. San Diego, California, USA*. Bellingham, Wash. : SPIE, 2008, (Proceedings of SPIE ; 6932), S. 38-1 – 38-9.

Grosser, P.: Zum Tragverhalten von Vierfachbefestigungen unter Torsionsbeanspruchung. - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07*. - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 69-78

Herzog, M.: Harmonization of design in reinforced concrete and fastening technology. - In: Gehlen, Ch.; Eligehausen, R. (Eds.): *7th Int. PhD Symposium in Civil Engineering; Stuttgart, September 11th-13th 2008*. Stuttgart : Universität, 2008, S. 3-10

Hoehler, M.S.; Eligehausen, R.: Behavior and testing of anchors in simulated seismic cracks. - In: *ACI Structural Journal* 105 (2008), Nr. 3, S. 348-357

Hoehler, M.S.; Eligehausen, R.: Behavior of anchors in cracked concrete under tension cycling at near-ultimate loads. - In: *ACI Structural Journal* 105 (2008), Nr. 5, S. 601-608

Hüer, T.: Das Versagen von Verbunddübeln infolge Spaltens des Betons. - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07*. - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 61-68

Jüngert, A.: Damage detection in wind turbine blades using two different acoustic techniques. - In: *NDT.net* (2008), December

Jüngert, A.: Damage detection in wind turbine blades using two different acoustic techniques. - In: Gehlen, Ch.; Eligehausen, R. (Eds.): *7th Int. PhD Symposium in Civil Engineering; Stuttgart, September 11th-13th 2008*. Stuttgart : Universität, 2008, S. 13-22

Jüngert, A.: Untersuchung der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit akustischen Verfahren. - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07*. - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 79-84

Keßler, S.: NBB - Nachhaltig Bauen mit Beton - Lebensdauermanagement. - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07*. - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 85-90

Kontzi, Ch.: Setting and tensile behavior of screw anchors in autoclaved aerated concrete. - In: Gehlen, Ch.; Eligehausen, R. (Eds.): *7th Int. PhD Symposium in Civil Engineering; Stuttgart, September 11th-13th 2008*. Stuttgart : Universität, 2008, S. 11-19

Krüger, M.; Bachmeier, S.: Event-triggered dynamic strain measurements using wireless sensor networks. - In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung : *Fachtagung Bauwerksdiagnose - Praktische Anwendungen zerstörungsfreier Prüfungen und Zukunftsaufgaben; 21.-22. Februar 2008, Berlin*. Berlin : DGZfP, 2008, S. 1

Mahrenholtz, C.: European approvals of concrete anchors: Qualification procedures and tests. In: *Workshop on Concrete for Coastal Environment, NIT Mangalore, India. 2008*

Mayer, T.F.; Gehlen, C.; Schießl, P.; Hecht, M.: Regensburger Dom: Zur Instandsetzung des Süd-turmhelms. In: *Beton* 58 (2008), Nr. 7+8, S. 342-344

Mönning, S.: Erforschung der Eigenschaften neuer salzstabiler superabsorbierender Polymere. - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07*. - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 91-97

Müller, H.S., Reinhardt, H.W.: Beton. In: Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.-D. (Hrsg.): *Beton-Kalender 2009; Teil 1*. 98. Jahrg. Berlin: Ernst & Sohn, 2008, S. 1-149

- Nürnberg, U.: Korrosionsverhalten der Baumetalle in der Atmosphäre und bei Kontakt mit Holz. In: *Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage an der Universität Karlsruhe 2008, Tagungsband*. Köln : Bruder-Verl., 2008, S. 89-102
- Nürnberg, U.: Reasons and prevention of corrosion induced failures of prestressing steel in concrete. In: Jin, W.-L.; Ueda, T.; Basheer, P.A.M. (Eds.): *Advances in Concrete Structural Durability. Proceedings of the International Conference on Durability of Concrete Structures, ICDCS 2008, Zhejiang University Hangzhou, PR China, 2008*. Hangzhou : Zhejiang University Press, 2008., S. 137-145
- Nürnberg, U.: Verzinkte Betonstähle und Einbauteile im Betonbau - Problemanalyse und Empfehlungen. 52. Ulmer Betontage, 12.-14.2.2008, Kongressunterlagen, S. 76-77
- Nürnberg, U., Wu, Y.: Hochfeste nichtrostende Stähle im Ingenieurbau - Einfluss starker Kaltumformungen auf das Korrosionsverhalten. In: *Korrosion nichtrostender Stähle - Auf die Oberfläche kommt es an: Dreiländer-Korrosionstagung, Wien, 24. -25.04.2008*. Frankfurt am Main : GfKORR, 2008, S. 107-125
- Nürnberg, U.; Wu, Y.: Stainless steel in concrete structures and in the fastening technique. - In: *Materials and Corrosion* 59 (2008), Nr. 2, S. 144-158
- Ozbolt, J.: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf den Betonausbruch von Kopfbolzenbefestigungen. - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07*. - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 98-107
- Ozbolt, J.; Grassegger, G.; Van der Veken, P.; Periskic, G.; Reinhardt, H.-W.: Experimental and numerical study of hygro-thermo-mechanical properties of "Schilfsandstein" from Baden-Württemberg. - In: *Environmental Geology* 56 (2008), Nr. 3-4, S. 535-546
- Ozbolt, J.; Periskic, G.; Reinhardt, H.-W.; Eligehausen, R.: Numerical analysis of spalling of concrete cover at high temperature. - In: *Computers and Concrete* 5 (2008), Nr. 4, S. 279-293
- Periskic, G.; Ozbolt, J.; Reinhardt, H.-W.: 3D Thermo-hygro-mechanisches Modell für Beton. - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07*. - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 85-90
- Pregartner, T.; Asmus, J.; Eligehausen, R.: Tragverhalten von risstauglichen Verbundspreißdübeln in Beton. - In: *Beton- und Stahlbetonbau* 103 (2008), Nr. 4, S. 244-251
- Reinhardt, H.-W.: Book Review: The history of the theory of structures. From arch analysis to computational mechanics. K.-E. Kurrer. - In: *Cement and Concrete Composites* 30 (2008), Nr. 10, S. 1023
- Reinhardt, H.-W.: Entwicklungspotentiale für einen universalen Werkstoff. - In: *Betonwerk und Fertigteiltechnik* (2008), Nr. 252. Betontage, Ulm, S. 4
- Reinhardt, H.-W.: Hochfester Beton besteht Feuerprobe. - In: *Bauwerk* (2008), Nr. 9, S. 8-9

- Reinhardt, H.-W.; Assmann, A.; Mönnig, S.: Superabsorbent polymers (SAPs) an admixture to increase the durability of concrete. - In: Sun, W.; Breugel, K. van; Miao, Ch.; Ye, G.; Chen, H. (Eds.): *1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites . Nanjing, China, 13-15 October 2008 ; Volume 1*. Bagnex : RILEM Publ., 2008. – (RILEM Proceedings PRO ; 61), S. 313-322
- Reinhardt, H.W. et al.: *Constitutive modelling of high strength/high performance concrete. State-of-art report, Chapter 6.2*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2008. (fib bulletin ; 42), pp 55-68
- Reinhardt, H.-W.; Grosse, C.U.: Strukturbestimmung von Betonbauteilen - Ergebnisse einer Forschungsgruppe der Deutschen Forschungsgemeinschaft. - In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung : *Fachtagung Bauwerksdiagnose - Praktische Anwendungen zerstörungsfreier Prüfungen und Zukunftsaufgaben; 21.-22. Februar 2008, Berlin*. Berlin : DGZfP, 2008, S. 8
- Reinhardt, H.W., Grosse, C.U., Kurz, J.H.: Localization and mode determination of fracture events by acoustic emission. In Carpinteri, A.; Lacidogna, G. (Eds.): *Acoustic Emission and Critical Phenomena: From Structural Mechanics to Geophysic*. Boca Raton : CRC Press, 2008, pp 41-66
- Reinhardt, H.W., Mönnig, S.: An additive to increase the freeze-thaw resistance of normal and high-strength concrete. In: *Concrete Plant International* 10 (2008), Nr. 1, S. 70-80
- Reinhardt, H.-W.; Mönnig, S.: Ein Zusatzmittel zur Vergrößerung des Frost-Taumittel-Widerstandes von normal- und hochfesten Betonen. - In: *BWI Betonwerk International* (2008), Nr. 1, S. 70-80
- Reinhardt, H.W., Mönnig, S.: Results of a macroscopic simulation of saturated lightweight aggregates (LWAS) and superabsorbent polymers (SAPs) as internal water sources. In: Schlangen, E.; De Schutter, G. (Eds.): *International RILEM Symposium on Concrete Modelling CONMOD'08*. Bagnex : RILEM Publ., 2008. – (RILEM Proceedings PRO ; 58), S. 585-593
- Reinhardt, H.-W.; Naaman, A.E.: Report on International Workshop HPRCC 5. - In: *Materials and Structures* 41 (2008), Nr. 3
- Reinhardt, H.-W., Wiens, U.: Bisherige Umsetzung der EN 206-1 in Deutschland und Europa. In: *Beton + Fertigteil-Jahrbuch 2009*. 57. Ausg. Gütersloh : Bauverlag, 2008, pp 164-169
- Reinhardt, H.-W.; Wiens, U.: Europäische Betonnormen - Stand der Anwendung in den CEN-Mitgliedsstaaten und Ausblick. - In: *Beton* 58 (2008), Nr. 4, S. 142-148
- Schießl, P.; Gehlen, Ch.: fib-"Mustervorschrift": Lebensdauerbemessung. - In: *Beton Fertigteil Jahrbuch 2008*. Gütersloh : Bau-Verl., 2008. 56. Ausg., S. 173-179
- Schießl, P.; Gehlen, Ch.; Sodeikat, Ch.; Mayer, T.F.; Schießl Pecka, A.: Dauerhafter Konstruktionsbeton für Wasserbauwerke. - In: Bergmeister, K.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): *Beton-Kalender 2008: Konstruktiver Wasserbau, Erdbebensicheres Bauen*. Berlin : Ernst + Sohn, 2008. 97. Jg., S. 3-85

Schmid, K.: Zum Tragverhalten von Befestigungsmitteln unter Querlasten im bewehrten Beton. - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07.* - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 118-127

Simons, I.; Eligehausen, R.: Tragverhalten und Bemessung von eingemörtelten Bewehrungsstäben unter zyklischer Beanspruchung im ungerissenen und gerissenen Beton. - In: *Beton- und Stahlbetonbau* 103 (2008), Nr. 9, S. 598-607

Sodeikat, C.; Schießl, P.; Gehlen, C.: Fahrbahn ohne Abdichtung - neues Brückenkonzept für PPP-Projekte. In: Gieler-Breßmer, S. (Hrsg.): *3. Kolloquium Verkehrsbauten - Schwerpunkt Parkhäuser, Brücken, 29. und 30. Januar 2008.* Ostfildern : TAE, 2008, S. 187-194

Sodeikat, C.; Gehlen, C.: Untersuchung und Instandsetzung von Spannverankerungen. In: Gieler-Breßmer, S. (Hrsg.): *3. Kolloquium Verkehrsbauten - Schwerpunkt Parkhäuser, Brücken, 29. und 30. Januar 2008.* Ostfildern : TAE, 2008, S. 231-241

Welz, G.: Metal injection anchors in masonry under shear loading. - In: Gehlen, Ch.; Eligehausen, R. (Eds.): *7th Int. PhD Symposium in Civil Engineering; Stuttgart, September 11th-13th 2008.* Stuttgart : Universität, 2008, S. 39-49

Weiß, G.C., Reinhardt, H.W.: Demontables Bauen mit Beton und demontable Deckenscheiben (Teil 2). In: *BetonWerk International* 11 (2008), Nr. 2, S. 154-159

Welz, G.: Tragverhalten von Injektionsdübeln im Mauerwerk unter Querlasten. - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07.* - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 98-107

Wu, Y.: Korrosionsuntersuchungen an hochfesten nichtrostenden Stählen zur Anwendung als Spannstahl im Spannbetonbau. - In: *IWB Jahresbericht / Activities 2005/07.* - (IWB-Mitteilungen ; 2008,1), S. 138-145

Wu, Y., Nürnberger, U.: Innovation of materials - Stainless steel in concrete structures. In: Jin, W.-L.; Ueda, T.; Basheer, P.A.M. (Eds.): *Advances in Concrete Structural Durability. Proceedings of the International Conference on Durability of Concrete Structures, ICDCS 2008, Zhejiang University Hangzhou, PR China, 2008.* Hangzhou : Zhejiang University Press, 2008., S. 960-966

## 2009

Bachmaier, S.: A wireless monitoring system for SHM of historic structures : advantages, challenges and applications. - In: Schueremans, L. (Ed.): *Building materials and building technology to preserve the built heritage; 1. WTA International PhD-Symposium; October 8-9, 2009, Leuven, Belgien.* München : WTA, 2009

Bachmaier, S.A.: A Prototype Implementation of the TinyOS Hardware Abstraction Architecture for Ferroelectric RAM. - In: *8. Fachgespräch Sensornetze der GI/ITG Fachgruppe "Kommunikation und Verteilte Systeme".* Hamburg : TU Hamburg-Harburg, Inst. für Telematik, 2009, S. 39-41

Bachmaier, S.A.: UML 2.0 for modeling TinyOS components. - In: *8. Fachgespräch Sensornetze der GI/ITG Fachgruppe "Kommunikation und Verteilte Systeme"*. Hamburg : TU Hamburg-Harburg, Inst. für Telematik, 2009, S. 87-89

Bachmeier, S.; Krüger, M.; Grosse, C.: A survey on power management for long-term-measurements using wireless sensor networks. - In: Meier, U. (Ed.): *Proceedings of the 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure; Zurich, Switzerland, 22-24 July 2009*. Dübendorf : EMPA, 2009, S. 2-9

Eligehausen, R.: Behaviour and design of connections with post-installed reinforcing bars. - In: Arede, A.; Guedes, J.M.; Rodrigues, S. (Eds.): *SIRR09 Seminario Internacional de Reforço e Reabilitação : Ligacoes Estruturais, 13 Novembro 2009, FEUP*. Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2009, S. 3-9

Eligehausen, R.: Geleitwort. - In: Pregartner, T.: *Bemessung von Befestigungen in Beton*. Berlin : Ernst & Sohn, 2009. - (BiP Bauingenieur Praxis), S. V-VI

Eligehausen, R.; Fuchs, W.: Bemessung der Verankerung von Befestigungen in Beton. - In: *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (2009), Nr. 7, S. 394-398

Eligehausen, R.; Genesio, G.; Ozbolt, J.; Pampanin, S.: 3D analysis of seismic response of RC beam-column exterior joints. - In: Alexander, M.G.; Beushausen, H.-D.; Dehn, F.; Moyo, P. (Eds): *Concrete, Repair, Rehabilitation and Retrofitting II; Proceedings of the 2nd Conf. (ICCRRR), Cape Town, South Africa, November 24-26, 2008*. Boca Raton : CRC Press, 2009, S. 1141-1147

Fischer, C.; Ozbolt, J.; Gehlen, C.: Modelling reinforcement corrosion - numerical modelling of bond strength of corroded reinforcement. - In: Alexander, M.G.; Beushausen, H.-D.; Dehn, F.; Moyo, P. (Eds): *Concrete, Repair, Rehabilitation and Retrofitting II; Proceedings of the 2nd Conf. (ICCRRR), Cape Town, South Africa, November 24-26, 2008*. Boca Raton : CRC Press, 2009, S. 421-426

Fuchs, W.: Transportankersysteme für Betonfertigteile - einheitliche und praxisgerechte Regelungen. - In: *Betonwerk und Fertigteiltechnik* (2009), Nr. 4, S. 26-33

Fuchs, W. : Geschichtliche Entwicklung der Bemessungsmethoden für Dübel in Deutschland. - In: Pregartner, T.: *Bemessung von Befestigungen in Beton*. Berlin : Ernst & Sohn, 2009. - (BiP Bauingenieur Praxis), S. 6-8

Grassegger, G.; Ozbolt, J.; Reinhardt, H.-W.: Wie belastbar und heterogen ist Sandstein? : Ergebnisse von experimentellen Daten und FE-Simulationen an baden-württembergischen Schilfsandsteinen. - In: Grassegger, G.; Werner, W.; Wölbert, O. (Hrsg.): *Arkus 2009 : Die Naturwerksteinvorkommen Baden-Württembergs und ihr Einsatz für Denkmalpflege, Technik und Architektur*. Stuttgart : IRB, 2009, S. 59-80

Grosse, C. U.; Krüger, M.; Bachmaier S. (2008): Wireless monitoring of structures including acoustic emission techniques. In: Alexander, M.G.; Beushausen, H.-D.; Dehn, F.; Moyo, P. (Eds): *Concrete, Repair, Rehabilitation and Retrofitting II; Proceedings of the 2nd Conf. (ICCRRR), Cape Town, South Africa, November 24-26, 2008*. Boca Raton : CRC Press, 2009, S. 533–539.

Grosse, C.U.; Krüger, M.; Bachmaier, S.: Wireless sensing techniques for an efficient monitoring of structures and plants. - In: *Werkstoff- und Bauteilverhalten in der Energie- und Anlagentechnik : 35. MPA-Seminar am 9. Oktober 2009 in Stuttgart*. Stuttgart : MPA, 2009

Hofmann, J.; Eligehausen, R.: Tragfähigkeit von randnahen Kopfbolzen bei der Versagensart seitlicher Betonausbruch. - In: *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (2009), Nr. 7, S. 386-393

Huß, A., Reinhardt, H.W.: Mischungsentwurf von Selbstverdichtendem Beton (SVB) mit gebrochener Gesteinskörnung. In: Stark, J. (Hrsg.): *IBAUSIL, 17. Baustofftagung, 23.-26. September 2009, Weimar; Tagungsbericht, Bd. 2*. Weimar : F:A: Finger Inst. für Baustoffkunde, 2009, S. 2-0013 - 2-0018

Huß, A., Reinhardt, H.W.: SVB vom Mehlkorntyp mit gebrochener Gesteinskörnung – Entwurfskonzept und Fließeigenschaften von SVB. In: *Betonwerk + Fertigteile-Technik* 75 (2009), Nr. 8, S. 4-12, Nr. 9, S. 22-34

Ichimiya, K., Reinhardt, H.W., Assmann, A.: Influence of void constitution in concrete mixed with superabsorbent polymers on compressive strength, water absorption capacity and oxygen permeability. In: *Cement Science and Concrete Technology* 63 (2009), pp 599-606

Krüger, Markus; Grosse, Christian U.; Bachmaier, Sebastian (2009): Development of a wireless sensor network to monitor historic structures. In: Chang, F.-K. (Ed.): *Structural health monitoring 2009 : from system integration to autonomous systems, 7th International Workshop, Stanford University, Stanford, USA, CA, September 09 - 11, 2009*. Lancaster, Pa. : DEStech Publ., 2009, S. 2083-2090

Mielich, O., Reinhardt, H.W.: Alkali-Kieselsäure-Reaktion als Rissursache in einem Beton mit gebrochener Grauwacke bzw. gebrochenem Quarzporphyr als Gesteinskörnung. In: Raupach, M. (Hrsg.): *1. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, TA Esslingen, 27./28.01.2009*. Ostfildern : TAE, 2009, S. 265-272

Mielich, O., Reinhardt, H.W.: Alkali-silica reaction causing cracks in concrete with crushed greywacke and quartz porphyry. In: Kovler, K. (Ed.): *Concrete Durability and Service Life Planning – ConcreteLife '09*. Bagneux : RILEM Publ., 2009. (RILEM Proceedings ; PRO 66), S. 188-195

Mielich, O., Reinhardt, H.-W.: Einfluss einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion auf den statischen E-Modul von Beton. In: Stark, J. (Hrsg.): *IBAUSIL, 17. Baustofftagung, 23.-26. September 2009, Weimar; Tagungsbericht, Bd. 2*. Weimar : F:A: Finger Inst. für Baustoffkunde, 2009, S. 2-0705-2-0710

Müller, H.S., Reinhardt, H.W.: Beton. In: Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.-D. (Hrsg.): *Beton-Kalender 2010; Teil 1*. 99. Jahrg. Berlin : Ernst & Sohn, 2009, S. 291-436

- Nürnberg, U.: Hochfeste Zugglieder aus unlegiertem und nichtrostendem Stahl bei seilverspannten Konstruktionen. In: *Hochfeste Werkstoffe - Chancen und Risiken, GfKORR Jahrestagung 3. und 4. 11. 2009, Frankfurt am Main*. Frankfurt am Main : GfKORR, 2009, S. 62-80
- Nürnberg, U.: Hydrogen induced cracking of prestressing steel in concrete constructions - Reasons and prevention. In: *Corrosion from the nanoscale to the plant, Eurocorr 2009, 5.-10.9.2009, Nice/France. Nice, 2009.* – (EFC Event ; 310)
- Nürnberg, U.: Korrosionsverhalten der Baumetalle in der Atmosphäre und bei Kontakt mit Holz. In: *Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage an der Universität Karlsruhe 2009*. Köln : Bruder-Verl., 2009, S. 47-64
- Nürnberg, U., Reinhardt, H.W.: *Corrosion Protection of Reinforcing Steel*. Lausanne : International Federation of Structural Concrete (fib), 2009. – (fib bulletin ; 49)
- Ozbolt, J.: Behaviour and modeling of concrete at high loading rates. In: Choi, C.K.; Meyer, C.; Bicanic, N. (Eds.): *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Computational Technologies in Concrete Structures, Jeju, Korea, 24-27 May 2009*, S. 124-134
- Ozbolt, J.; Balabanic, G.; Periskic, G.: 3D Chemo-thermo-hygro-mechanical model for concrete. - In: Smojver, I.; Soric, J. (Eds.): *6th ICCSM Int. Congress of Croatian Society of Mechanics*. Zagreb : Croatian Society of Mechanics, 2009
- Ozbolt, J.; Balabanic, G.; Periskic, G.: Modelling of effect of damage on chloride penetration into concrete. In: Choi, C.K.; Meyer, C.; Bicanic, N. (Eds.): *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Computational Technologies in Concrete Structures, Jeju, Korea, 24-27 May 2009*, S.1362-1371
- Ozbolt, J.; Balabanic, G.; Periskic, G.: Numerical analysis of effect of damage on chloride penetration into concrete. In: Kuczma, M. (Ed.): *CMM 2009 Computer Method in Mechanics, 8 - 21 May 2009, Zielona Gora, Poland*. Zielona Gora : Univ. Press, 2009
- Ozbolt, J.; Grassegger, G.; Van der Veken, P.; Periskic, G.; Reinhardt, H.-W.: An overview - experimental and numerical study of hygro-thermo-mechanical properties of "Schilfsandstein" from Baden-Württemberg. - In: Grzeszczyk, S.; Tukiendorf, M. (Eds.): *Environmental protection and technology*. Opole : Politechnika Opolska Studia I, 2009. - (Monografie ; 248), S. 93-106
- Ozbolt, J.; Periskic, G.; Jelcic, J.; Reinhardt, H.-W.: Modelling of concrete exposed to high temperature. In: Dehn, F.; Koenders, E.A.B.: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure – From Real Life Experiences and Practical Applications to Lab-scale Investigations and Numerical Modelling*. Leipzig : Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen, 2009, S. 461-469
- Ozbolt, J.; Travas, V.; Kozar, I.; Eligehausen, R.: Fracture of concrete at high loading rates. - In: Smojver, I.; Soric, J. (Eds.): *6th ICCSM Int. Congress of Croatian Society of Mechanics*. Zagreb : Croatian Society of Mechanics, 2009

Periskic, G.; Ozbolt, J.; Jelcic, M.: Modelling of concrete at high temperature. - In: Smojver, I.; Soric, J. (Eds.): *6th ICCSM Int. Congress of Croatian Society of Mechanics*. Zagreb : Croatian Society of Mechanics, 2009

Periskic, G.; Ozbolt, J.; Jelcic, M.: Numerical modeling of explosive failure of concrete of concrete due to fire. In: Choi, C.K.; Meyer, C.; Bicanic, N. (Eds.): *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Computational Technologies in Concrete Structures, Jeju, Korea, 24-27 May 2009*, S.1362-1371

Reinhardt, H.-W.: Fritz Leonhardts Kontakte zur Materialprüfungsanstalt in Stuttgart. - In: Kleinmanns, J.; Weber, C. (Hrsg.): *Fritz Leonhardt 1909-1999 : Die Kunst des Konstruierens*. Stuttgart : Menges, 2009, S. 156-159

Reinhardt, H.-W.; Assmann, A.: Enhanced durability of concrete by superabsorbent polymers. - In: Brandt, A.M.; Olek, J.; Marshall, I.H. (Eds.): *Proc. of the 9th Int. Symposium on Brittle Matrix Composites BMC 9, Warsaw, Poland, 25-28 October 2009*. Cambridge : Woodhead, 2009, S. 291 - 300

Reinhardt, H.-W.; Assmann, A.: Superabsorbierende Polymere (SAP) als Betonzusatzstoff. In: Stark, J. (Hrsg.): *IBAUSIL, 17. Baustofftagung, 23.-26. September 2009, Weimar; Tagungsbericht, Bd. 1*. Weimar : F:A: Finger Inst. für Baustoffkunde, 2009, S. 1-0303 – 1-0311

Reschke, T.; Fischer, C.: Chlorideindringwiderstand von Betonen, Spritzbetonen und Instandsetzungsmörteln bei Verkehrswasserbauwerken. - In: Raupach, M. (Hrsg.): *1. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, 27. und 28. Januar 2009*. Ostfildern : TAE, 2009

Reinhardt, H.W., Wüstholtz, T.: Stress induced shrinkage of concrete in tension. In: T.-A. Tanabe et al. (Eds.) *Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Vol. 1*. Boca Raton : CRC Press 2009, pp 65-71

Sharma, A.; Eligehausen, R.; Reddy, G.D.; Vaze, K.K.; Ghosh, A.; Kushawa, H.S.: Simplistic non-linear modeling of RC beam-column joints strengthened with FRP based pushover analysis. - In: *Proc. of Theme Meeting on Retrofitting & Rehabilitation of Structures (TMRRS) and International seminar on Structural Rehabilitation (ISSR) held at Mangalore during March 30-31, 2009*, S. 58-67

Sharma, A.; Genesio, G.; Reddy, G.R.; Eligehausen, R.: Nonlinear dynamic analysis using micro-plane model for concrete and bond slip model for prediction of behavior of nonseismically detailed RCC beam-column joints. - In: *Journal of Structural Engineering* 36 (2009), No. 4, S. 250-257

Travas, V.; Ozbolt, J.; Kozar, I.: Failure of plain concrete beam at impact load: 3D finite element analysis. - In: *International Journal of Fracture* 160 (2009), Nr. 1, S. 31-41

Travas, V.; Ozbolt, J.; Kozar, I.: Penetration of steel anchor into a concrete block - numerical simulation. - In: Smojver, I.; Soric, J. (Eds.): *6th ICCSM Int. Congress of Croatian Society of Mechanics*. Zagreb : Croatian Society of Mechanics, 2009

Wu, Y.; Nürnberger, U.: Corrosion-technical properties of high strength stainless steels for the application in prestressed concrete structures. - In: *Materials and Corrosion* 60 (2009), Nr. 10, S. 771-780

## 2010

Assmann, A.; Reinhardt, H.-W.: Some aspects of superabsorbent polymers (SAPs) in concrete technology. - In: Fisher, G.; Geiker, M.; Hededal, O.; Ottosen, L.; Stang, H.: *8th Int. PhD Symposium in Civil Engineering; June 20-23, 2010, Techn. Univ. of Denmark ; Proceedings*. Lyngby : Techn. Univ. of Denmark, 2010, S. [299-304]

Bachmaier, S. A.: A report on system and radio transmission issues in a star topology WSN. - In: Kolla, R. (Hrsg.): *9. Fachgespräch Sensornetze der GI/ITG Fachgruppe Kommunikation und Verteilte Systeme; 16. -17. September 2010*, S. 63-66

Bekalo, S.; A.; Reinhardt, H.-W.: Fibers of coffee husk and hulls for the production of particleboard. - In: *Materials and Structures* 43 (2010), Nr. 8, S. 1049-1060

Eligehausen, R.; Fuchs, W.: Design of fastenings for use in concrete - actual state of codes. - In: Hirt, M.A.; Radic, J.; Mandic, A.: *Codes in Structural Engineering : developments and needs for international practice ; Joint IABSE - FIB Conference Dubrovnik 2010, Cavtat, May 3-5, 2010*. Zagreb : SECON-CSSE, 2010, S. 599-606

Fischer, C.; Ozbolt, J.; Gehlen, C.: Numerical investigations on bond behavior of corroded reinforcement. - In: Oh, B.H.; Choi, O.C.; Chung, L. (Eds.): *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FRAMCOS-7), Jeju, Korea, May, 23-28, 2010*. Seoul : Korea Concrete Institute, 2010, S. 779-785

Fischer, C.: Experimental investigations on the effect of corrosion on bond of deformed bars. - In: Fisher, G.; Geiker, M.; Hededal, O.; Ottosen, L.; Stang, H.: *8th Int. PhD Symposium in Civil Engineering; June 20-23, 2010, Techn. Univ. of Denmark ; Proceedings*. Lyngby : Techn. Univ. of Denmark, 2010, S. [99-104]

Fischer, C.; Ozbolt, J.; Gehlen, C.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Einfluss der Bewehrungskorrosion auf das Verbundverhalten zwischen Stahl und Beton. - In: *Beton- und Stahlbetonbau* (2010), Nr. 5, S. 284-293

Fuchs, W.: Die neue VDI / BV-BS 6205 Guideline for transport anchors : eine praxisgerechte Richtlinie?. - In: *Betonwerk und Fertigteiltechnik* (2010), Nr. 254. *Betontage, Ulm*, S. 106-107

Fuchs, W.: Transportanker und Transportankersysteme für Betonfertigteile : Grundlagen, Bemessung, Anwendungen. - In: *Bauingenieur* 85 (2010), Nr. 4, S. A 8 - A 10

Fuchs, W.; Kintscher, M.; Roik, M.: Inserts for Lifting and Handling of Precast Elements – Where are the European Codes? A State of the Art. In: Hirt, M.A.; Radic, J.; Mandic, A.: *Codes in Structural Engineering : developments and needs for international practice ; Joint IABSE - FIB Conference Dubrovnik 2010, Cavtat, May 3-5, 2010*. Zagreb : SECON-CSSE, 2010, S. 1357-1364

Genesio, G.; Eligehausen, R.; Akgüzel, U.; Pampanin, S.: Application of post-installed anchors for seismic retrofit of RC frames. - In: *14th European Conference on Earthquake Engineering, August 30-September 03, 2010, Ohrid, Republic of Macedonia*. Skopje : Macedonian Association for Earthquake Engineering, 2010

Genesio, G.; Eligehausen, R.; Pampanin, S.: Seismic assessment of pre-1970s RC beam-column joints. - In: *14th European Conference on Earthquake Engineering, August 30-September 03, 2010, Ohrid, Republic of Macedonia*. Skopje : Macedonian Association for Earthquake Engineering, 2010

Genesio, G.; Eligehausen, R.; Sharma, A.; Pampanin, S.: Experimental and numerical study towards a deformation-based seismic assessment of substandard exterior R.C. beam-column joints. - In: Oh, B.H.; Choi, O.C.; Chung, L. (Eds.): *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FRAMCOS-7), Jeju, Korea, May, 23-28, 2010*. Seoul : Korea Concrete Institute, 2010, S. 1794-1801

Genesio, G.; Sharma, A.; Eligehausen, R.; Pampanin, S.; Reddy, G.R. Development of seismic retrofit technique of rc frame using fully fastened haunch elements: static to dynamic testing. In: Kumar, A. (Ed.): *Earthquake engineering : proceedings of 14th Symposium on Earthquake Engineering, held at Indian Institute of Technology, December 17 - 19, 2010, Roorkee, India*. New Delhi : Elite Publ. House, 2010

Grosser, P.; Eligehausen, R.; Ozbolt, J.: 3D FE Analysis of anchor channels and headed anchors under shear load close to an edge. - In: Oh, B.H.; Choi, O.C.; Chung, L. (Eds.): *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FRAMCOS-7), Jeju, Korea, May, 23-28, 2010*. Seoul : Korea Concrete Institute, 2010, S. 560-567

Hofmann, J.: Die Qual der Wahl. In: *Fassadentechnik* 16 (2010), Nr. 2, S. 20-23

Huss, A.; Reinhardt, H.W.: Design and flow of powder-type SCC with crushed aggregates. - In: Khayat, K.H.; Feys, D. (Eds.): *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete : Proceedings*. Dordrecht : Springer, 2010. - (RILEM Bookseries ; 1), S. 3-11

Jensen, O.M.; Mechtcherine, V.; Reinhardt, H.-W.: Preface. - In: Jensen, O.M.; Hasholt, M.T.; Laustsen, S.: *Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete : Proceedings of the Int. RILEM Conf., Lyngby, Denmark, August 15-18, 2010*. Bagneux : RILEM Publ.RILEM, 2010. - ( Proceedings PRO ; 74), S. XIII-XIV

Krüger, Markus; Grosse, Christian U.; Bachmaier, Sebastian A.; and Willeke, Jan (2010): Wireless Monitoring of the Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd. In: N. Banthia; A. Mufti (Eds.): *Conservation of Heritage Structures. 3rd International Workshop on Civil Structural Health Monitoring. Vancouver: The University of British Columbia. Vancouver : University of British Columbia, 2010, S. 467–480.*

Mahrenholtz, C.; Eligehausen, R.; Sharma, A. (2010): Behavior of post-installed concrete undercut anchors subjected to high loading rate and crack cycling frequency. In: *9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, 2010. Oakland, Calif. : Earthquake Engineering Research Institute, 2010, Proceeding Paper No 1589*

Mahrenholtz, P.; Eligehausen, R.: Behavior of anchor groups installed in cracked concrete under simulated seismic actions. - In: Oh, B.H.; Choi, O.C.; Chung, L. (Eds.): *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FRAMCOS-7), Jeju, Korea, May, 23-28, 2010. Seoul : Korea Concrete Institute, 2010, S. 816-822*

Maierhofer, C., Reinhardt, H.-W., Dobmann, G. (Hrsg.): *Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Vol. 1 + Vol. 2. Woodhead Publishing 2010*

Nürnberger, U.: Anwendungstechnisches Verhalten verzinkter und nichtrostender Betonstähle. - In: *GfKORR: Korrosionsschutz der Stähle im Kontakt mit Beton : neue Entwicklungen und Forschungsergebnisse; Tagung 7. und 8. Oktober 2010, VDI-Haus Stuttgart. Frankfurt a.M. : DE-CHEMA, 2010, S. 62-81*

Nürnberger, U., Bütetführ, M., Beul, W.: Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes verzinkter Bauteile in Hallenschwimmbädern. In: *Feuerverzinken - Korrosionsschutz zwischen Tradition und Moderne, Hannover, GAV-Forschungskolloquium 8. - 9. März 2010. Düsseldorf : Gemeinschaftsausschuss Verzinken, 2010*

Nürnberger, U., Köse, C.: Korrosionsverhalten von Anschweißankern aus nichtrostendem Stahl bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen aus Naturwerkstein. In: *Bautechnik 87 (2010), Nr. 7, S. 373-382*

Nürnberger, U., Köse, C.: Korrosionsverhalten geschweißter nichtrostender Stähle bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen. In: *Nichtrostende Stähle - Spezielle Anwendungen und angepasste Lösungen, Dreiländer-Korrosionstagung, Berlin, 19. -20.04.2010. Frankfurt am Main: GfKORR, 2010, S. 117 -121*

Nürnberger, U., Wu, Y.: Corrosion properties of high strength stainless steels in view of a use as prestressing steel. In: *Proceedings of the 3rd. International fib Congress and PCI Annual Convention2010, Washington 29.5-2.6.2010. Chicago, Ill. : PCI, 2010*

Ozbolt, J.; Balabanic, G.; Periskic, G.; Kuster, M.: Modelling the effect of damage on transpost processes in concrete. - In: *Construction and Building Materials 24 (2010), S. 1638-1648*

Periskic, G.; Ozbolt, J.; Eligehausen, R.: 3d FE analysis of fasteners at elevated temperatures. - In: Oh, B.H.; Choi, O.C.; Chung, L. (Eds.): *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FRAMCOS-7), Jeju, Korea, May, 23-28, 2010*. Seoul : Korea Concrete Institute, 2010, S. 835-842

Rao, A., G.; Navya, V.; Hofmann, J.: Strengthening of Non-Seismically Designed Reinforced Concrete Beam-Column Joints, In: *Proceedings of International Conference on Innovative World of Structural Engineering. (ICIWSE-2010, 17.-19.09.2010, Aurangabad, Maharashtra, India, S. 72 -81*

Reinhardt, H.-W.: Behaviour of special concretes in fire. - In: Miao, Ch. (Ed.): *Advances in civil engineering : the 50-year teaching and research anniversary of Prof. Sun Wei, Nanjing, China, October 15, 2008*. Bagnaux : RILEM Publ., 2010. – (RILEM Proceedings PRO ; 71), S. 235-249

Reinhardt, H.-W.: Fully prestressed concrete members with transverse cracks. - In: Forde, M.C. (ed.): *Structural Faults & Repair 2010; 13th Int. Conf.; 15th-17th June 2010*. Edinburgh : Engineering Technics Press, 2010

Reinhardt, H.-W.: *Ingenieurbaustoffe*. 2. Auflage, Berlin: Ernst & Sohn, 2010. - ISBN 978-3-433-02920-6, 382 Seiten

Reinhardt, H.W.: Concrete materials: high-tech and sustainable. - In: Wu, Z.; Wu, G.; Miao, Ch. (Eds.): *Progress in Concrete Structures and Materials : the 4th Int. Forum on Advances in Structural Engineering*, S. 58-79

Reinhardt, H.W.: Perspektiven für nachhaltiges Bauen. In: *Jahresbericht Konstruktiver Ingenieurbau 2010*. Kaiserslautern :Techn. Univ., 2010, S. 31

Reinhardt, H.W.: When to use non-destructive testing of reinforced concrete structures: an overview. - In: Maierhofer, Ch.; Reinhardt, H.W.; Dobmann, G. (Eds.): *Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures. Vol. 1: Deterioration processes and standard test methods*. Boca Raton : Woodhead, 2010, S. 24-27

Reinhardt, H.W., Aicher, S.: Cellulose fiber gypsum boards and wall panels under cyclic loading. In: Parra-Montesinos, G.J.; Balaguru, P. (Eds.): *Antoine E. Naaman Symposium – Four decades of progress in prestressed concrete, fiber reinforced concrete, and thin laminate composites*. Farmington Hills, MI, 2010. (ACI Special Publication ; 272), S. 269-280

Reinhardt, H.-W.; Assmann, A.: Application of superabsorbent polymers in lightweight concrete with porous matrix. - In: Jensen, O.M.; Hasholt, M.T.; Laustsen, S.: *Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete : Proceedings of the Int. RILEM Conf., Lyngby, Denmark, August 15-18, 2010*. Bagnaux : RILEM Publ., 2010. - (RILEM Proceedings PRO ; 74), S. 207-212

Reinhardt, H.W.; Assmann, A.: The effects of SAPs on drying shrinkage, porosity and setting of concrete. - In: Brameshuber, W. (Ed.): *International RILEM Conference on Materials Science : Vol. III: AdIPoC Additions Improving Properties of Concrete; Aachen, Germany, September 6-8, 2010*. Cachan : RILEM, 2010. - (RILEM Proceedings PRO ; 77), S. 155-162

Reinhardt, H.-W., Assmann, A.: *Improved durability of concrete due to SAP*. In: Castro-Borges, P. et al. (Eds.): *Concrete under Severe Conditions - Environment and Loading, Proceedings of the 6<sup>th</sup> Conference CONSEC'10, Merida, Yucatan, Mexiko, 07-09 June 2010*. Boca Raton : CRC Press, 2010, S. 823-830

Reinhardt, H.-W.; Ozbolt, J.; Travas, V.: Response of concrete members to impact loading. - In: Oh, B.H.; Choi, O.C.; Chung, L. (Eds.): *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FRAMCOS-7), Jeju, Korea, May, 23-28, 2010, Vol. 3*. Seoul : Korea Concrete Institute, 2010, S. 1707-1714

Reinhardt, H.-W.; Piehl, Ch.; Schwarte, J.: Online-Informationssystem "NBB-Info". - In: *Betonwerk und Fertigteiltechnik* (2010), Nr. 254. *Betontage, Ulm*, S. 26-27

Schmid, K.; Eligehausen, R.: Technical specifications (TS) for anchor channels. - In: Hirt, M.A.; Radic, J.; Mandic, A.: *Codes in Structural Engineering : developments and needs for international practice ; Joint IABSE - FIB Conference Dubrovnik 2010, Cavtat, May 3-5, 2010*. Zagreb : SECON-CSSE, 2010, S. 1349-1356

Sharma, A.; Genesio, G.; Reddy, G.R.; Vaze, K.K. Eligehausen, R.; Pampanin, S. Experimental investigations on seismic retrofitting of reinforced concrete beam-column joints. In: Kumar, A. (Ed.): *Earthquake engineering : proceedings of 14th Symposium on Earthquake Engineering, held at Indian Institute of Technology, December 17 - 19, 2010, Roorkee, India*. New Delhi : Elite Publ. House, 2010

Sharma, A.; Mahrenholtz, C., Eligehausen, R.; Reddy, G.R.; Vaze, K.K.; Ghosh, A.K.; Kushwaha, H.S.: Evaluation of load on anchor for concrete structures corresponding to maximum crack width - A probabilistic approach. In: *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 3 (2010); Nr. 4, S. 798-811

Sharma, A.; Reddy, G.R.; Eligehausen, R.; Vaze, K.K.; Ghosh, A.K.; Kushwaha, H.S.: Experiments on *reinforced concrete* beam-column joints under cyclic loads and evaluating their response by nonlinear static pushover analysis. - In: *Structural Engineering and Mechanics* 35 (2010), Nr. 1

Sharma, A.; Reddy, G. R.; Vaze, K. K.; Ozbolt, J.; Hofmann J.: *Behaviour of plain and reinforced concrete under high rate loading – numerical simulation*. Mumbai, India : Bhaba Atomic Research Centre, 2010. BARC Report BARC/2010/E/014

Wiggenhauser, H., Reinhardt, H.W.: NDT in civil engineering: experience and results of the FOR 384 research group. In: Thompson, D.O. Chimenti, D.E. (Eds.) *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Volume 29*. Melville, NY : American Inst. of Physics, 2010. (AIP Conference Proceedings ; 1211), pp 47-54

**DIPLOMARBEITEN****2008**

Nr.	Kandidat	Betreuer	Thema
1	Jetter, Elke	Gehlen	Betonkorrosion am Beispiel von Naturzugkühltürmen mit Reingaseinleitung und Ansätze zur Berechnung der Abtragsraten infolge des chemischen Angriffs durch angesäuertes Kondensat
2	Assmann, Alexander	Mönnig	Untersuchung des Einflusses kleiner, mittlerer und großer Kapillarporen auf die Betonfestigkeit
3	Sönmez, Mutlu	Genesio	Befestigungssysteme unter Erdbebenbeanspruchung – Simulation der Anwendungsbedingungen
4	Özan, Oktay	Mönnig	Untersuchung der Frischbetonrheologie eines HPC mit SAP-Beimischung mittels Messungen mit dem Btrheom.
5	Holfert, Eric	Jüngert	Ultraschall-Echo-Messungen an Rotorblättern von Windenergieanlagen- Untersuchung und Qualifizierung der Unterschiede unterschiedlicher Koppelmittel und Koppelverfahren
6	Jung, Magdalena	Aicher	Verstärkung von Durchbrüchen in Brettschichtholzträgern mit innen liegenden Stahlstäben

**2009**

Nr.	Kandidat	Betreuer	Thema
1	Hezel, Jürgen	Aicher	Schadenserkennung sowie Sanierung von gealterten gerissenen Brettschichthalbbauwerken- ein Fallstudie
2	Richter, Ronald	Große / Jüngert	Einsatz der Schallemissionsanalyse zu Detektion des Riss- und Abplatzungsverhaltens von Beton unter Brandeinwirkung
3	Lehan, Anne	Krüger	Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen bei Stahlbetonbauwerken im Hinblick auf das Risiko der Bewehrungskorrosion
4	Köse, Cenk	Nürnberger	Einfluss von Anlauffarben und Spalten auf das Korrosionsverhalten von Anschweißankern aus nichtrostendem Stahl
5	Hörsting, Kai	Dill-Langer	Zerstörungsfreie Untersuchung von Holzbauteilen auf Fehlstellen und Fäulnisschädigungen unter Verwendung von Ultraschallverfahren

**2010**

Nr.	Kandidat	Betreuer	Thema
1	Sippel, Tjark Sören	Assmann	Bestimmung der Eigenschaftsverläufe von Betonmischungen variierender Rohdichte für den Einsatz in funktional gradierten Bauteilen
2	Pakded, Hamed	Menzel, Frick, Lehmann	Potentialmessungen an Natursteinen
3	Schreiner, Michael	Frick, Sawade	Untersuchung von Bodenversagen mittels Last-Setzungs-Sensor

In Kooperation mit dem KIT Karlsruher Institut für Technologie entstanden am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) im Jahre 2010 die beiden Diplomarbeiten:

Nr.	Kandidat	Betreuer	Thema
1	Ortmann, Pascal	C. Mahrenholtz	Untersuchungen zum Tragverhalten von chemischen Befestigungsmitteln bei Montage bei tiefen Temperaturen unter Langzeitbeanspruchung
2	Senftleben, Sabrina	Grosser	Zum Tragverhalten von randnahen Reihenbefestigungen beansprucht durch eine Querlast parallel zum Bauteilrand

**DISSERTATIONEN / THESES****2008****Appl, Jörg-Jochen**

Tragverhalten von Verbunddübeln unter Zugbelastung

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Rolf Eligehausen

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2008

URL: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2009/4775/>

**Potthoff, Michael**

Tragverhalten und Bemessung von Ankerschienen unter Querbelastrung

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Rolf Eligehausen

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Konrad Bergmeister

Tag der mündlichen Prüfung: 11.01.2008

URL: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2008/3819/>

**Wu, Yuan**

Korrosionstechnische Eignung hochfester nichtrostender Stähle für den Spannbetonbau

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Ulf Nürnberger

Mitberichter: Prof. Dr.- sc. techn. Bernhard Elsener

Mitberichter: Prof. Dr. Ing. Christof Gehlen

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 24.08.2008 / Otto-Graf-Institut ; 92

**2009****Beutel, Ralf**

Zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen im jungen und erhärteten Zustand mit der Impact-Echo-Technik

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Peter Gröbl

Tag der mündlichen Prüfung: 29.07.2009

URL: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2009/4806/>

**Mielich, Oliver**

Beitrag zu den Schädigungsmechanismen in Betonen mit langsam reagierender alkaliempfindlicher Gesteinskörnung

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jochen Stark

Tag der mündlichen Prüfung: 14.12.2009 / Deutscher Ausschuss für Stahlbeton ; 583

**Mönnig, Sven**

Superabsorbierende Zusätze in Beton : Anwendungen, Modellierung und Vergleich von unterschiedlichen internen Wasserquellen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt

Mitberichter: Prof. Dr. Ing. Harald S. Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 31.07.2009

URL: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2009/4781/>

**Periskic, Goran**

Entwicklung eines 3D thermo-hygro-mechanischen Modells für Beton unter Brandbeanspruchung und Anwendung auf Befestigungen unter Zuglasten

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Josko Ozbolt

Mitberichter: Prof. Dr. Ing. Rolf Eligehausen

Mitberichter: Prof. Dr. Ing. Mario Fontana

Tag der mündlichen Prüfung: 16.11.2009

URL: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2009/4781/>

**Schmid, Klaus**

Tragverhalten und Bemessung von Befestigungen am Bauteilrand mit Rückhängebewehrung unter Querlasten rechtwinklig zum Rand

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Rolf Eligehausen

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski

Tag der mündlichen Prüfung: 11.12.2009

URL: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2010/5796/>

**2010****Huss, Andreas**

Mischungsentwurf und Fließigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (SVB) vom Mehlkorn-typ unter Berücksichtigung der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Brameshuber

Tag der mündlichen Prüfung: 21.12.2010

URL: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2011/5915/>

**Jüngert, Anne**

Untersuchung von GFK-Bauteilen mit akustischen Verfahren am Beispiel der Rotorblätter von Windenergieanlagen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Christian U. Große

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Martin Kühn

Tag der mündlichen Prüfung: 10.02.2010

URL: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2010/5289/>

**PERSONAL / STAFF****Institutsleitung am 01.07.2011**

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt	Geschäftsführender Direktor i.V.
Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann	Stellvertretender Direktor
Simone Stumpp	Sekretariat Prof. Reinhardt
Silvia Choynecki	Sekretariat Prof. Eligehausen

**Professoren emeritus und im Ruhestand**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing E.h. Dr.-Ing. h.c. Gallus Rehm  
 Prof. Dr.-Ing. Rolf Eligehausen

**Außerplanmäßige Professoren**

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Ulf Nürnberger  
 apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Josko Ožbolt

**Abteilung Werkstoffe und Konstruktion, Wissenschaftliche Mitarbeiter**

Assmann, Alexander	Dipl.-Ing.	seit 31.03.2008
Bachmaier, Sebastian	Dipl.-Ing. (BA)	
Fischer, Christian	Dipl.-Ing. (FH), MSc	
Jüngert, Anne	Dipl.-Geophys.	bis 01.10.2009
Kessler, Sylvia	Dipl.-Ing.	bis 31.01.2009
Mönnig, Sven	Dipl.-Ing.	bis 31.05.2008
Piehl, Christian	Dipl.-Ing.	
Schwarte, Joachim AOR	Dr.-Ing.	
Sippel, Sören	Dipl.-Ing.	seit 15.05.2010
Tevesz; Judit	Dipl.-Ing	seit 01.10.2008
Weirich, Tim	Dipl.-Ing.	bis 31.03.2008
Wu, Yuan	Dipl.-Ing.	seit 01.06.2005

**Abteilung Befestigungstechnik, Wissenschaftliche Mitarbeiter**

Bezecny, Lubor	Dipl.-Ing.	bis 29.02.2008
Berger, Walter	Dipl.-Ing.	bis 01.01.2008
Biocic, Zlatko	Dipl.-Ing.	von 01.03.2008 – 30.09.2009
Blochwitz, Ronald	Dipl.-Ing.	
Bosnjak, Josipa	Dipl.-Ing.	seit 01.05.2008
Fuchs, Werner	Dr.-Ing.	
Genesio, Giovacchino	Ing.	
Grosser, Philipp	Dipl.-Ing.	
Herzog, Martin	Dipl.-Ing.	
Hüer, Thorsten	Dipl.-Ing.	bis 29.02.2008
Jebara, Khalil	Dipl.-Ing.	von 01.04.2008 – 30.09.2009
Kontzi, Christian	Dipl.-Ing.	bis 31.12.2010
Köse, Cenk	Dipl.-Ing.	seit 01.11.2010
Kurz, Carolin	Dipl.-Ing.	seit 01.09.2010
Mahrenholtz, Philipp	Dipl.-Ing.	seit 01.10.2006
Mahrenholtz, Christoph	Dipl.-Ing.	seit 01.01.2007
Negele, Anita	Dipl.-Ing.	bis 15.01.2008
Periskic, Goran	Dipl.-Ing.	
Sandor, Denes Tamas	Dipl.-Ing.	seit 15.06.2010
Schlottke, Bernd AOR	Dipl.-Ing.	
Schmid, Klaus	Dipl.-Ing.	bis 29.02.2008
Senftleben, Sabrina	Dipl.-Ing.	seit 15.12.2010
Stipetic, Marina	Dipl.-Ing.	seit 15.02.2010
Welz, Georg	Dipl.-Ing.	bis 31.12.2009
Wildermuth, Anke	Dipl.-Ing.	bis 15.12.2010
Zieringer, Franz-Josef	Dipl.-Ing.	seit 01.07.2010

**Nichtwissenschaftliche Mitarbeiter**

Bahr, Gerhard		
Bauer, Heidi		seit 15.09.2008
Baur, Gisela		
Choynacki, Silvia		
Geiger, Paul		
Jäger, Regina		
Langenfeld, Mike		bis 31.01.2008
Lindenmeier, Eugen		
Scherf, Peter		
Toll, Valentin		von 01.03.2008 - 01.11.2009
Werner, Monika		



Am 1. Oktober 2009 hat Jan Hofmann die W3-Professur für „Befestigungstechnik und Verstärkungsmethoden“ am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) übernommen.

1973 in Ruit auf den Fildern geboren, studierte er an der Universität Stuttgart Bauingenieurwesen mit Schwerpunkt „Konstruktiver Ingenieurbau“. Nach seinem Diplom 1999 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Befestigungstechnik am IWB in den Bereichen Bewehrungs- und Befestigungstechnik. 2004 promovierte er mit dem Thema „Tragverhalten und Bemessung von Befestigungen unter beliebiger Querbelastung in ungerissenem Beton“.

Im Anschluss an seine Promotion arbeitete er für das Referat „Lager und Übergänge im Bauwesen“ der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart und wechselte 2005 als Entwicklungsleiter für Stahldübel, Sanitär- montage- und Fassadentechnik in die Industrie zu einem namhaften Hersteller von Befestigungsmitteln.

Schwerpunkte der Forschung von Jan Hofmann sind das Tragverhalten von mechanischen und chemischen Befestigungen für Beton, Mauerwerk und Plattenbaustoffe, des Weiteren das Tragverhalten und die Berechnung von Einlageteilen in Beton sowie nach-

On the 1<sup>st</sup> of October 2009 Jan Hofmann has taken over the professorship for “Fastening and strengthening methods” at the Institute of Construction Materials (IWB).

Born in 1973 in Ruit he studied civil engineering at the University of Stuttgart with a focus on structural engineering. After his diploma in 1999 he worked as a research assistant in the department for “fastening technique” at the IWB and was responsible for research projects in the field of reinforcement and fasteners. In 2004 he finished his doctoral thesis about the „Behavior and Design of Fasteners Loaded Arbitrary to the Edge for Uncracked Concrete“.

After finishing his doctoral thesis he worked at the laboratories of the University of Stuttgart at the unit for bridge bearings and bridge-joints before he became the head of the department for research and development for steel anchors, advanced curtain wall technique and sanitary fixing systems for a market leading company in this field.

The main areas of research of Jan Hofmann are the behavior of mechanical and bonded anchors for concrete and masonry as well as the behavior and design of cast in anchors or post installed rebars. Besides these traditional research topics his interest is to focus

träglich eingeklebte Bewehrungsstäbe. Neben weiteren, traditionell schon über Jahrzehnte am Institut behandelten Forschungsschwerpunkten, wird er sich verstärkt mit den Themen Bauwerksverstärkung und Kleben beschäftigen. Zielsetzung ist dabei, gemeinsam mit der Industrie neue Systemkonzepte und Technologien für das Befestigen und Verstärken zu entwickeln. Ein besonderer Schwerpunkt soll hierbei auf die Schnittstelle zwischen Befestigungs-, Verstärkungs- und Klebetechnologie gesetzt werden.

Als Mitglied im Sachverständigenausschuss "Befestigungsmittel" und Arbeitskreis „Klebertechnik“ des Deutschen Instituts für Bautechnik, der Arbeitsgruppe „Fastenings to Concrete and Masonry Structures“ (fib) sowie dem Arbeitsausschuss Bemessung und Konstruktion des DIN wird er künftig die gewonnenen Forschungsergebnisse in nationale und internationale Regelungen umsetzen.

on the strengthening of buildings and engineered adhesives. The aim of the research is to develop with leading industry partners, new concepts and technologies for the field of fastening technology. A special focus therefore is given to the interdisciplinary research between mechanical fastening, adhesives, and strengthening methods.

As a member of the expert group of the German approval body (DIBt) for fastening technique and the expert group for adhesives, as a member of the fib group „Fastenings to Concrete and Masonry Structures“ and the national working group “Design and Construction of Concrete Structures” he will ensure that the research will be implemented in current national and international design codes.

**Verzeichnis**

der bisher in der Schriftenreihe „IWB-Mitteilungen“ erschienenen Hefte:

- 1986/1     Institutsbericht 1983-1985 Activities
- 1987/1     Verdrehfähigkeit plastizierter Tragwerksbereiche im Stahlbetonbau, von Peter Langer
- 1987/2     Jahresbericht 1986 Activities
- 1987/3     Übertragbarkeit von Werkstoffkennwerten bei Glasfaser-Harz-Verbundstäben, von G. Rehm und B. Schlottke
- 1988/1     Zum Tragverhalten kunstharzgebundener Glasfaserstäbe im Bereich von Endverankerungen und Rissen in Beton, von Martin Faoro  
(ISBN 3-9801833-0-0)
- 1988/2     Einfluß der Stahlkennlinie auf den möglichen Grad der Schnittkraftumlagerung bei Stahlbetontragwerken  
Teil 1: Theoretische Untersuchungen, von R. Eligehausen, H. Kreller  
Teil 2: Versuchsbericht, von R. Eligehausen, H. Kreller, P. Langer  
(ISBN 3-9801833-1-9)
- 1989/1     Beiträge zur Befestigungstechnik  
- Moderne Befestigungstechnik im Bauwesen - Systeme und Anwendungsbedingungen, von R. Eligehausen, W. Fuchs, M. Reuter  
- Tragverhalten von Dübelbefestigungen bei Zugbeanspruchung - Loadbearing Behaviour of Anchor Fastenings in Tension, von R. Eligehausen, W. Fuchs, B. Mayer  
- Tragverhalten von Dübelbefestigungen bei Querkzug-, Schrägzug- und Biegebeanspruchung - Loadbearing Behaviour of Anchor Fastenings under Shear, Combined Tension and Shear or Flexural Loading, von R. Eligehausen, W. Fuchs  
- Bemessung von Befestigungen mit Stahldübeln - Zukünftiges Konzept - design of Fastenings with Steel Anchors - Future Concept, von R. Eligehausen
- 1989/2     Zum Weiterreißverhalten von beschichteten Geweben, von Walter Bidmon  
(ISBN 3-9801833-2-7)
- 1989/3     Zum Tragverhalten von Übergreifungsstößen in Stahlbetonbauteilen bei Brandeinwirkung, von Roland Gerster  
(ISBN 3-9801833-3-5)
- 1989/4     Zum nichtlinearen Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen unter Last- und Zwangseinwirkung, von Helmut Kreller  
(ISBN 3-9801833-4-3)
- 1989/5     Untersuchungen zum Verbundverhalten gerippter Bewehrungsstäbe mit praxisüblicher Betondeckung, von Rolf Eligehausen, Helmut Kreller, Peter Langer  
(ISBN 3-9801833-5-1)
- 1989/6     Jahresbericht 1987-1988 Activities
- 1990/1     SBETA Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, von V. Cervenka, R. Eligehausen, R. Pukl  
(ISBN 3-9801833-6-X)
- 1990/2     Tragverhalten von Befestigungen unter Querlast in ungerissenem Beton, von Werner Fuchs  
(ISBN 3-9801833-7-8)
- 1991/1     Funktionsersatzprüfungen für die Beurteilung der Eignung von kraftkontrolliert spreizenden Dübeln, von Burkhard Mayer  
(ISBN 3-9801833-8-6)
- 1991/2     Jahresbericht 1989-1990 Activities
- 1992/1     Zur Korrosion von verzinktem Stahl in Kontakt mit Beton, von Klaus Menzel  
(ISBN 3-9801833-9-4)
- 1993/1     Tragverhalten und Anwendung von Dübeln unter oftmals wiederholter Belastung, von Dieter Lotze  
(ISBN 3-9803044-0-X)

- 1994/1 Tragverhalten von randfernen Kopfbolzenverankerungen bei Betonbruch, von Guochen Zhao (ISBN 3-9803044-2-6)
- 1994/2 Zum Trag- und Verschiebungsverhalten von Kopfbolzen bei zentrischem Zug, von Johannes Furcher (ISBN 3-9803044-3-4)
- 1994/3 Tragverhalten von Metallspreizübeln im ungerissenen und gerissenen Beton bei der Versagensart Herausziehen, von Rolf Lehmann (ISBN 3-9803044-1-8)
- 1994/4 Ein energetisches Materialmodell zur Berechnung des Tragverhaltens von zugbeanspruchtem Beton, von Gottfried Sawade (ISBN 3-9803044-4-2)
- 1994/5 Zur bruchmechanischen Modellierung des Kurzzeit-Bruchverhaltens von Holz im Reißöffnungsmodus I, von Tino Schatz (ISBN 3-9803044-5-0)
- 1995/1 Rotationsfähigkeit von plastischen Gelenken im Stahl- und Spannbetonbau, von Longfei Li (ISBN 3-9803044-6-9)
- 1995/2 Maßstabeffekt und Duktilität von Beton- und Stahlbetonkonstruktionen, von Josko Ozbolt (ISBN 3-9803044-7-7)
- 1995/3 Jahresbericht 1993-1995 Activities
- 1996/1 Gas Permeability as a Means to Assess The Performance Properties of Concrete, von Abebe Dinku (ISBN 3-9803044-8-5)
- 1996/2 Nachbehandlungsunempfindlicher Hochleistungsbeton, von Silvia Weber (ISBN 3-9803044-9-3)
- 1996/3 Zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetontragwerken unter Betriebsbelastung, von Thomas M. Sippel (ISBN 3-9805102-0-4)
- 1996/4 Tragverhalten von Ankerschienen ohne Rückhängebewehrung, von Rolf Wohlfahrt (ISBN 3-9805102-1-2)
- 1997/1 Jahresbericht 1996-1997 Activities
- 1999/1 Bemessung von zugbeanspruchten Befestigungen bei Versagensart Spalten des Betons, von Jörg Asmus (ISBN 3-9805102-2-0)
- 1999/2 Jahresbericht 1998-1999 Activities
- 2000/1 Ökobilanzierung von Baustoffen am Beispiel des Recyclings von Konstruktionsleichtbeton, von Julian Kümmel (ISBN 3-9805102-4-7)
- 2001/1 Dichtheit von Heißwasser-Langzeitspeichern aus Hochleistungsbeton, von Martin Jooß (ISBN 3-9805102-3-9)
- 2001/2 Zum Trag- und Rotationsverhalten von Stahlbetontragwerken mit nicht-linearer Schnittgrößenermittlung, von Eckhart Fabritius (ISBN 2-9805102-5-5)
- 2001/3 Jahresbericht 2000-2001 Activities
- 2001/4 Brandverhalten von Befestigungen mit großem Randabstand in Beton bei zentrischer Zugbeanspruchung, von Michael Reick (ISBN 3-9805102-6-3)
- 2002/1 Zum Einfluß der Oberflächengestalt von Rippenstählen auf das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen, von Utz Mayer (ISBN 3-9805102-7-1)

- 2002/2 Zum Durchstanzen von Flachdecken im Bereich von Rand- und Eckstützen, von Henrik Vocke (ISBN 3-9805102-8-X)
- 2002/3 Tragverhalten und Bemessung von eingemörtelten Bewehrungsstäben, von Hannes A. Spieth (ISBN 3-9808542-1-3)
- 2002/4 Tragverhalten von Einzelverbunddübeln unter zentrischer Kurzzeitbelastung, von Juraj Meszaros (ISBN 3-9808542-0-5)
- 2002/5 met@BiM - Ein semantisches Datenmodell für Baustoff-Informationen im World Wide Web (Anwendungen für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung), von Marcus Schreyer (ISBN 3-9805102-9-8)
- 2003/1 Tragverhalten von Verbunddübeln unter zentrischer Zugbelastung im ungerissenen Beton – Gruppenbefestigungen und Befestigungen am Bauteilrand, von Bernhard Lehr (ISBN 3-9808542-2-1)
- 2003/2 Tragverhalten von Kunststoffdübeln im ungerissenen und gerissenen Beton, von Thilo Pregartner (ISBN 3-9808542-3-X)
- 2005/1 Jahresbericht 200/04 Activities
- 2006/1 Zum Tragverhalten von Injektionsdübeln in Mauerwerk, von Andrea Meyer (ISBN 3-9808542-5-6)
- 2006/2 Behavior and Testing of Fastenings to Concrete for Use in Seismic Applications, von Matthew S. Hoehler (ISBN 3-9808542-7-2)
- 2007/1 Ein Verbundelement für nichtlineare Finite Elemente Analysen – Anwendung auf Übergreifungsstöße, von Steffen Lettow (ISBN 978-3-9808542-9-0)
- 2007/2 Anwendung von Ankerstäben in Rahmenecken, Rahmenendknoten und Stütze-Fundament-Verbindungen, von Markus J. Bruckner (ISBN 978-3-9811682-0-4)
- 2007/3 Verbundverhalten von eingemörtelten Bewehrungsstäben unter zyklischer Beanspruchung, von Isabelle N. Simons (ISBN 978-3-9811682-1-1)
- 2008/1 Jahresbericht 2005/07 Activities
- 2011/1 Jahresbericht 2008/10 Activities



