Institut für Werkstoffe im Bauwesen



# **MITTEILUNGEN**

2008/1



Universität Stuttgart Jahresbericht 2005/07 Activities

## Jahresbericht

## 2005/07

## Activities

#### Mitteilungen des Institut für Werkstoffe im Bauwesen; Band 2008/1

#### JAHRESBERICHT 2005/07 ACTIVITIES

| Herausgeber: | Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart<br>Prof. DrIng. Christoph Gehlen<br>Prof. Dr. Ing. Bolf. Eligobauson  |
|--------------|---|
| Anschrift:   | Institut für Werkstoffe im Bauwesen<br>Pfaffenwaldring 4<br>70569 Stuttgart<br>oder:<br>Universität Stuttgart<br>Institut für Werkstoffe im Bauwesen<br>70550 Stuttgart<br>Telefon: (0711) 685 63324<br>Telefax: (0711) 685 68086 |
| Redaktion:   | DrIng. Joachim Schwarte<br>DiplIng. Tim Weirich   |

© IWB; Stuttgart 2008 Alle Rechte vorbehalten ISSN 0932-5921

## EINFÜHRUNG

Das Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) 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 Berichtes erstreckt sich, wie beim letzten Male, über die vergangenen drei Jahre, d. h. in diesem Fall, über die Jahre 2005, 2006 und 2007. In Zukunft werden wir alle zwei Jahre berichten.

Der üblichen Aufgabenteilung eines jeden Hochschulinstituts entsprechend, wird in diesem Bericht in gewohnter Ausführlichkeit wieder sowohl über Aktivitäten in der Lehre, als auch über Aktivitäten in der Forschung berichtet. Auch werden Informationen über uns veranstalteten die von Tagungen/Symposien gegeben. Im Berichtszeitraum haben diesmal besonders viele Veranstaltungen stattgefunden. Dazu beigetragen hat insbesondere ein seltenes, aber immer wieder mal stattfindendes Ereignis:

Ein Wechsel in der Institutsleitung. Am 31.03.2006 schied nach langjähriger, überaus erfolgreicher Tätigkeit Prof. Reinhardt altersbedingt aus dem aktiven Dienst aus. Als sein Nachfolger durfte ich pünktlich und damit auch nahtlos am 01.04.2006 den Staffelstab übernehmen. Ausführlicher werde ich mich Ihnen auf den Seiten 184 und 185 dieses Berichtes vorstellen.

In Hinblick auf Lehre und Forschung waren die letzten Jahre geprägt von zahlreichen Veränderungen und Umstellungen. In der Lehre bereiten wir uns seit längerem auf die Umstellung der Studiengänge von Diplom auf Bachelor / Master vor. Eine gründliche Überarbeitung des Lehrangebotes hat stattgefunden und Modulbeschreibungen wurden geschrieben, die nun in so genannten Modulhandbüchern zusammengefasst darauf warten, akkreditiert zu werden.

## INTRODUCTION

The Institute 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 institute and its members.

The present report covers the last three years, in this case the years 2005, 2006 and 2007. In future the Institute will report all two years.

Due to the fact that every institute, that is part of a university, is involved in both, research and teaching, this report describes the activities in both fields.

Also information about the conferences/ symposia organised by us is given.

In the last three years many conferences, symposia and other events have taken place. A reason for it was an event taking place over and over again:

A change in the institute management.

On 31.6.2006 Prof. Reinhardt retired after long and successful work as director of the institute.

As his successor I was allowed to take over the institute management on 01.04.2006.

On the pages 184 and 185 of this report I will introduce myself in more detail.

Within the scope of teaching and research the last years were marked by numerous changes and rearrangements.

In the teaching we prepare 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 and wait to be accredited.

Then an introduction of the lecture courses for a Bachelor / Master degree is easily possible to the WS 2008/2009.

Also many discussions about Elite-Universitäten in Germany as well as the introduction of the new HochschulrahmengeDanach steht einer Einführung von Bachelor/Master Studiengängen zum WS 2008/2009 nichts mehr im Wege.

Auch die vielen Diskussionen um Elite-Universitäten in Deutschland haben uns ebenso stark beschäftigt, wie die Einführung des neuen Hochschulrahmengesetzes und des im November 2006 eingeführten neuen Tarifrechtes. Alle angesprochenen Punkte werden in Zukunft auch kleine und große Auswirkungen auf das IWB haben. Das IWB, als bekannt äußerst drittmittelstarkes Institut geht jedoch mit großer Zuversicht an die Aufgabe, diese neuen Herausforderungen, die sich mittelfristig für unsere Arbeit in Forschung und Lehre ergeben, zu meistern.

Um diesen Herausforderungen auch strukturell entsprechend zu begegnen, um uns an die sich ändernden Randbedingungen besser anpassen zu können, wird es notwendig sein, zukünftig Aktivitäten des IWB noch stärker mit denen der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (Otto-Graf-Institut) zu verzahnen. Nicht zuletzt auch aus diesem Grund wurde u. a. die langjährig am IWB von Herrn PD Dr.-Ing. Christian Große geführte Arbeitsgruppe "Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP)" zum Jahreswechsel 2006/2007 in das Otto-Graf-Institut integriert. Herr Große wurde gleichzeitig das Amt des "Stellvertretender Direktors" der Materialprüfungsanstalt übertragen. Durch diesen Wechsel, aber auch durch andere, inzwischen vereinbarte Kooperationen zwischen dem IWB und der MPA, werden sich beide Institutionen vor allem in dem immer härter umkämpften, ständig globaler werdendem Forschungsmarkt gemeinsam behaupten können. Dies wird wiederum positiven Einfluss auf die Qualität der Lehre und Attraktivität der Materialprüfstelle an der Universität Stuttgart haben.

Nach all diesen einführenden Worten möchte ich nun, an dieser exponierten Stelle dieses Berichtbandes, mich bei meinem Vorgänger für die überaus erfolgreiche Schafsetz and the new introduced Tarifrecht in November, 2006 have occupied us.

All these issues will have consequences on the IWB in near future.

Nevertheless the IWB, which is strongly promoted by third-party-funds, has large confidence to master these new challenges in research and teaching in the next years.

In order to solve these challenges structurally and to adapt us better to the changing boundary conditions, it will be necessary to connect future activities of the IWB even stronger with those of the Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (Otto-Graf-Institut).

For this reason the working group "Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP)", which was led many years at the IWB by PD Dr.-Ing. Christian Große, was integrated to the turn of the year 2006/2007 into the Otto-Graf-Institut.

Dr.-Ing. Große assumed at the same time the office of the "Deputy Director" of the Materialprüfungsanstalt.

By this change, but also by other cooperations between the IWB and the MPA, both institutions will be able to assert themselves together in the hard-fought, global research market.

This will have again positive influence on the quality of the teaching and attraction of the Materialprüfstelle at the University of Stutt-gart.

After all these introductory words I would like to thank, at this point of report, my predecessor for the exceedingly successful work on the institute and wish a successful continuation of the business together with my partner in the institute management, Prof. Eligehausen, and the numerous employees.

With further so committed application we can be very confident.

All members of the institute, colleagues at the university, institutions, companies and persons outside the university I would like to thank at this point for your engagement, the steady cooperation and support. fenszeit am Institut bedanken und mir gemeinsam mit meinem Partner in der Institutsleitung, Prof. Eligehausen, und den zahlreichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern eine erfolgreiche Weiterführung der Geschäfte wünschen.

Bei weiterhin so engagiertem Einsatz aller kann man sehr zuversichtlich sein.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, Kollegen an der Universität, Institutionen, Firmen und Personen außerhalb der Universität sei an dieser Stelle für Ihr Engagement, die stetige Kooperation und Unterstützung herzlich gedankt. Ich wünsche Ihnen für die anstehenden Aufgaben viel Geschick und Glück und vor allem Gesundheit.

Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen Geschäftsführender Direktor des IWB I wish you for the upcoming tasks much ability and luck and above all health.

Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen Managing Director of IWB

## INHALT / CONTENT

| Lehrveranstaltung | gen |
|-------------------|-----|
|-------------------|-----|

| Werkstoffe im Bauwesen I                                 | 8  |
|--|----|
| Werkstoffe im Bauwesen II                                |    |
| Bauschäden und Instandhaltung                            |    |
| Befestigungstechnik                                      | 14 |
| Betontechnologie   |    |
| Korrosionsschutz   | 17 |
| Maßstabseffekt in Beton- und Stahlbetonkonstruktionen    |    |
| Numerische Modellierung von Stahlbeton                   | 19 |
| Baustoffauswahl nach ökologischen Gesichtpunkten         | 20 |
| Ingenieurwerkstoffe – Metall, Beton, Boden [COMMAS – C7] | 21 |
| Ingenieurwerkstoffe – Beton [COMMAS – E7]                | 22 |
| Einführung in die Informatik.                            | 24 |
| Anwendungen der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen    | 25 |
| 5 5 5  |    |

## Forschung

| Datenerfassung und -verarbeitung durch drahtlose Sensornetze für das                |     |
|---|-----|
| Bauwerksmonitoring  | 27  |
| Einfluss der Betonfeuchte auf das Tragverhalten von Verbunddübeln                   |     |
| (Epoxidharz-System)   | 37  |
| Dübel unter Zuglast in Leicht- und Normalbeton                                      | 43  |
| Probabilistische Dauerhaftigkeitsuntersuchungen an einem 2-Schicht-Instandsetzungs- |     |
| system für Stahlbetonbauteile   | 51  |
| Das Versagen von Verbunddübeln infolge Spaltens des Betons                          | 61  |
| Zum Tragverhalten von Vierfachbefestigungen unter Torsionsbeanspruchung             | 69  |
| Untersuchung der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit akustischen Verfahren      | 79  |
| NBB – Nachhaltig Bauen mit Beton - Lebensdauermanagement                            | 85  |
| Erforschung der Eigenschaften neuer salzstabiler superabsorbierender Polymere       | 91  |
| Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf den Betonausbruch von                    |     |
| Kopfbolzenbefestigungen   | 98  |
| 3D thermo-hygro-mechanisches Modell für Beton                                       | 108 |
| Zum Tragverhalten von Befestigungsmitteln unter Querlasten im bewehrten Beton       | 118 |
| Tragverhalten von Injektionsdübeln im Mauerwerk unter Querlasten                    | 128 |
| Korrosionsuntersuchungen an hochfesten nichtrostenden Stählen zur Anwendung als     |     |
| Spannstahl im Spannbetonbau   | 138 |
|   |     |
| Vortragsveranstaltungen, Symposien, Workshops, Konferenzen                          | 146 |
| Umstrukturierung des Bereichs "Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen"                | 154 |
| Publikationen   | 158 |
| Diplomarbeiten  | 176 |
| Dissertationen  | 178 |
| Personal  | 181 |

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

Prof. Gehlen

Im Diplomstudiengang 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.

Die Vorlesungsreihe beginnt mit dem Themengebiet "Allgemeine Grundlagen", welches eine Einführung in Bautechnische Bestimmungen, Materialparameter sowie Materialprüfung und statistische Auswertungsmethoden beinhaltet.

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 Frischund Festbetoneigenschaften wird bereits Wert auf eine Sensibilisierung für Dauerhaftigkeitsaspekte gelegt. Weiterhin werden Herstellung und Eigenschaften von Leichtbeton und diverse Sonderbetonen behandelt. Abgerundet wird der Komplex der mineralischen Werkstoffe mit den Themen Mauerwerk und Mörtel. 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 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 and statistical methods.

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 complex of the mineral binder materials is rounded down with the topics of masonry and mortar. 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.

Geschlossen wird die Vorlesungsreihe mit der Vorstellung des Werkstoffes Stahl, in all seinen für das Bauwesen relevanten Ausführungen. Ausgehend von der Herstellung über Aufbau, Eigenschaften und Fügetechniken werden Stahl und Gusseisen ausführlich erläutert. Ergänzend dazu werden auch die Nichteisenmetalle mit Ihren Eigenschaften behandelt. Die Themen Korrosion und Korrosionsschutz beinhalten Werkstoffübergreifend, von Beton über Stahl und Nichteisenmetalle, die korrosiven Gefährdungen sowie wiederum Schutzmaßnahmen, die den Grundsatz der Dauerhaftigkeit vermitteln.

Das Brandverhalten von Baustoffen und die Möglichkeiten des Brandschutzes der behandelten Werkstoffe werden werkstoffübergreifend präsentiert. 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.

The lecture course is enclosed with the presentation of steel at all its, for the construction industry relevant, details. 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 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.

| Übung / Exercise:        | Themen / Topics:   |  |
|--------------------------|--|--|
| Ü1: Beton I              | <ul> <li>Bestimmung der Festigkeitseigenschaften von Zement</li> <li>Frischbetonkennwerte</li> </ul>   |  |
| Ü2: Bitumen              | <ul> <li>Asphaltproben</li> <li>Druckversuch (Marshall-Versuch)</li> <li>Penetrationsversuch, Ermittlung von Erweichungs- und Brechpunkt</li> </ul>  |  |
| Ü3: Beton II             | <ul> <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> <li>Druckversuche mit unterschiedlichen Kraft / Faser-Winkeln</li> <li>Versuche zur Tragfähigkeitsermittlung von Nagel-, Dübel- und<br/>Leimverbindungen</li> <li>Zugversuche an unterschiedlichen Kunststoffen</li> <li>Temperatureinfluss auf Kunststoff: Kriechen, Relaxation</li> </ul> |  |
| Ü5: Stahl                | <ul> <li>Zugversuche, Recken</li> <li>Wärmebehandlung: Vergüten</li> <li>Zähigkeit: Biegen von Betonstahl</li> <li>Vorführungen zum Schweißen</li> </ul>   |  |

| · · · · · · · · · · · · · · · · · · · |
|---------------------------------------|
|---------------------------------------|

Jede Gruppe nimmt an 5 Veranstaltungen (Dauer jeweils 120 min) mit unterschiedlichen Themenschwerpunkten teil. Zusätzlich werden Einführungsvorträge angeboten. Die Themen der einzelnen Übungsveranstaltungen sind in der oben 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. Each group visits the laboratories for 5 events (duration of each event 120 min). Several experiments with different centres of interest are demonstrated. Additionally introducing lectures are given. The topics covered in the exercises 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.

| Semester       | Teilnehmerzahl<br>Number of participants | Einteilung<br>Division         |  |  |
|----------------|--|--------------------------------|--|--|
| WS 2005/06     | 112                                      | 6 Gruppen mit 17 bis 19 Teiln. |  |  |
| WS 2006/07     | 93                                       | 6 Gruppen mit 7 bis 18 Teiln.  |  |  |
| <br>WS 2007/08 | 104                                      | 6 Gruppen mit 13 bis 19 Teiln. |  |  |

Tabelle 2: Teilnehmerzahlen der praktischen Übungen

## 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 statt. Darin wird anhand von 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. 34 questions to topics from all contents of the lectures are to be answered.

## VORLESUNGSREIHE "WERKSTOFFE IM BAUWESEN II" (OBERSTUFE) LECTURE COURSE "WERKSTOFFE IM BAUWESEN II" (ADVANCED LEVEL)

Prof. Gehlen / Dr. Schwarte

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 zu den relevanten Deformations- und Schädigungsprozesse sowie zugehörige Rechenverfahren müssen erarbeitet werden.

Die Grundfachvorlesung "Werkstoffe im Bauwesen II" richtet sich an Studierende im 6. und 7. Fachsemester.

Der Themenbereich "Schweißen/Löten/Kleen/Formgebung/Schalung" wird workshopartig mit Beiträgen der Studierenden gestaltet.

Die Vorlesungen über "Betriebsfestigkeit", "Bruchmechnik", "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 for relevant defomation and damage processes an related calculation methods have to be developed.

The lecture course "Werkstoffe im Bauwesen II" is offered for students in the  $6^{th}$  an  $7^{th}$  term.

The topics "welding", "soldering"; "gluing", "shaping" and "formwork" are covered by a workshop with contributions by the students.

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

| Semester / Term                     | Themen / Topics  |
|-------------------------------------|--|
| 6. Semester<br>(Stand SS 2007)      | <ul> <li>Einführung</li> <li>Rheologie (Viskoelastizität; Plastizität; praktische Anwendun-<br/>gen; Numerische Verfahren; Übungen)</li> <li>Transportvorgänge</li> <li>Dauerhaftigkeitsbemessung</li> <li>Bautenschutz</li> <li>Instandsetzung</li> </ul>   |
| 7. Semester<br>(Stand WS 2007/2008) | <ul> <li>Bruchmechanik (linear-elastische Bruchmechanik; elastisch-<br/>plastische Bruchmechanik; Übungen)</li> <li>Betriebsfestigkeit (mit Übungen)</li> <li>Workshop "Schweißen/Löten/Kleben/Formgebung/Schalung"</li> <li>Beton (Leichtbeton; Faserbeton; Selbstverdichtender Beton;<br/>Hochleistungsbeton; Straßenbeton)</li> </ul> |

| Tabelle 3: | Vorlesungsinhalte   | Werkstoffe      | im E | Bauwesen II" |
|------------|---------------------|-----------------|------|--------------|
| rabono o.  | • on ooungoin marco | "•••••••••••••• |      | Juunooonin   |

Im Fach "Werkstoffe im Bauwesen II" findet zweimal jährlich eine zweistündige schriftliche Prüfung statt.

Twice a year a two hours written examination is held.

## VORLESUNGSREIHE "BAUSCHÄDEN UND INSTANDHALTUNG" / "ERHALTUNG VON IMMOBILIEN" LECTURE COURSE "STRUCTURAL DAMAGE AND RESTORATION" / "MAINTENANCE OF PROPERTY"

Prof. Gehlen

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 Immobilientechnik im 6. Semester angeboten. Der Vorlesungsumfang beträgt 3 SWS. Die Vorlesungsreihe schließt mit einer 1,5-stündigen Prüfung ab.

The lecture treat 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 symptons, the mechanism and the progress of the damage. Afterwards will be presented durable techniques of repair and possibilities to avoid structural damages during the phase of design. The main focus of building materials in the lecture is reinforced conrete, but there are also clases about repair of structures built by natural stone and timber. The lecture 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  $1\frac{1}{2}$  hours.

## VORLESUNGSREIHE "BEFESTIGUNGSTECHNIK" LECTURE COURSE "FASTENING TECHNIQUES"

Prof. Eligehausen

Die Universität Stuttgart bietet als einzige Universität der Bundesrepublik Vorlesungen über Befestigungstechnik im Massiv- und Mauerwerksbau an. Der Studienplan "Bauingenieurwesen" trägt diesem Gebiet Rechnung und sieht folgende Vorlesungen vor:

- a) Grundvorlesung (Wahlvorlesung) "Moderne Befestigungstechnik im Ingenieurbau"
   für Studenten des 3. Semesters (2 Semesterwochenstunden, Prof. Eligehausen)
- b) Vertiefervorlesung "Befestigungstechnik I" für Studenten der Vertiefungsfachrichtung "Konstruktiver Ingenieurbau" im Rahm des Vertiefungsfaches "Werkstoffe/Bauphysik" als Kernfach. Die Vorlesung wird laut Studienplan angeboten für Hörer des 7. Semesters. (3 SWh, Prof. Eligehausen)
- c) Vertiefervorlesung "Befestigungstechnik II" für Studenten der Vertiefungsfachrichtung "Konstruktiver Ingenieurbau" als Ergänzungsfach. Die Vorlesung wird laut Studienplan angeboten für Hörer des 8. Semesters. (3 SWh, Prof. Eligehausen)

Die Vorlesungen "Befestigungstechnik I" und "Befestigungstechnik II" sollen einen Überblick über den Stand der Befestigungstechnik im In- und Ausland geben und es dem Hörer ermöglichen, für eine gegebene Anwendung das richtige Befestigungselement auszuwählen und zu bemessen. Behandelt werden Einlegeteile (u. a. Kopfbolzen, Ankerschienen), Dübel (Spreiz-, Hinterschnitt-, Verbund-Kunststoff- und Injektionsdübel), Setzbolzen und Betonschrauben für Anwendungen in Beton und Mauerwerk, sowie die Verstärkung von Bauteilen mittels geklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen, als auch nachträgliches Anschließen von Bauteilen mit eingemörtelten Bewehrungsstäben.

Stuttgart is Germany's only University offering lectures in Fastening Techniques for reinforced concrete and masonry structures. Following lectures are included in the civil engineering department's educational programme.

- a) Basic course (facultative) "Modern Fastening Techniques in structures" for students of the 3<sup>rd</sup> Semester (2 hours per week, Prof. Eligehausen)
- b) Graduate course "Fastening Techniques I" for students of the 7th Semester graduating in structural engineering is a (facultative) part of the graduate course "Construction Materials/Physics relating to Construction". (3 hours per week, Prof. Eligehausen)
- c) Graduate course "Fastening Techniques II" for students of the 8th Semester graduating in structural engineering is a (facultative) part of the graduate course relating to Construction". (3 hours per week, Prof. Eligehausen)

The lectures "Befestigungstechnik I" and "Befestigungstechnik II" offer a survey of FasteningTechniques in Germany and foreign countries and provide the student with the knowledge how to select and design the right fastenings for a problem at hand. During the course following topics are treated: castinplace systems (e.g. headed studs, anchor channels), post-concreting systems/anchors (expansion, undercut and bonded anchors, plastic and injection fasteners), powderactuated fasteners and concrete screws for applications in concrete and masonry, both strengthening of existing r.c. structures with adhesive bonding and CFRM (Carbon-Fibre Reinforced Materials) and post-installed rebar connections.

Die Vorlesungen werden regelmäßig durch Exkursionen ergänzt. Diese führten in den vergangenen Jahren zur Fa. Fischerwerke. In der folgenden Tabelle sind die Themen, die von den Vorlesungen "Befestigungstechnik I" und "Befestigungstechnik II" abgedeckt werden, zusammengestellt.

Für die Vorlesungen werden jeweils schriftliche Prüfungen angeboten. Beside the lectures possibility is given to the students to participate in technical excursions. The company "fischerwerke" was visited in the last years.

The subjects of the lectures given during the courses "Fastening Techniques I" and "Fastening Techniques II" are listed in the table below.

Written examinations complete the above mentioned courses.

| Befestigungstechnik I  | – Befestigungssysteme   |
|------------------------|---|
|                        | - Zugfestigkeit des Betons  |
|                        | <ul> <li>Tragverhalten und Bemessung von Befestigungen f ür mittlere</li> </ul>         |
|                        | und hohe Lasten im ungerissenen und gerissenen Beton                                    |
|                        | - Einfluss der Lasteinleitung durch Befestigungen auf das Trag-                         |
|                        | verhalten des als Ankergrund dienenden Bauteils   |
|                        | <ul> <li>Korrosionsschutz und Feuerwiderstand</li> </ul>                                |
|                        | <ul> <li>Praktische Übungen im Labor</li> </ul>   |
| Befestigungstechnik II | – Mauerwerksarten   |
|                        | <ul> <li>Tragverhalten und Bemessung von Befestigungen in Beton</li> </ul>              |
|                        | und Mauerwerk für niedrige und mittlere Lasten  |
|                        | <ul> <li>Verstärken von Bauteilen (geklebte Stahllaschen, CFK-<br/>Lamellen)</li> </ul> |
|                        | <ul> <li>Anschließen von Bauteilen mit eingemörtelten Bewehrungs-</li> </ul>            |
|                        | stäben  |
|                        | <ul> <li>Probabilistisches Sicherheitskonzept</li> </ul>                                |
|                        | <ul> <li>Wirtschaftlichkeit von Befestigungen</li> </ul>                                |
|                        | <ul> <li>Befestigungstechnik im Ausland</li> </ul>                                      |
|                        | – Qualität  |

Tabelle 4: Vorlesungsinhalte:

## VORLESUNGSREIHE "BETONTECHNOLOGIE" LECTURE COURSE "TECHNOLOGY OF CONCRETE"

Prof. Gehlen

Die im Wintersemester 1996/97 erstmalig, damals noch von Prof. Reinhardt, angebotene Vorlesung "Betontechnologie" behandelt ausführlich den Werkstoff Beton. Hierbei werden detailliert alle Facetten des Betons, wie z.B. Betonkomponenten, Zusatzmittel /stoffe, Erhärtungsvorgänge, Festigkeiten, etc. behandelt.

Neben den theoretischen Grundlagen wird auch auf die für die Praxis wichtigen Bereiche wie Prüfverfahren, Verarbeitung, etc. eingegangen. Ziel der Vorlesung "Betontechnologie" soll es sein, dem Studenten eine vertiefte Ausbildung in betontechnologischen Fragen zu geben.

Seit dem Sommersemester 1998 wird im Rahmen eines Praktikums den Studenten die Möglichkeit geboten, den theoretischen Teil des E-Scheins (erweiterte Betontechnologischen Ausbildung) zu erlangen.

Die Vorlesung hat einen Umfang von drei Semesterwochenstunden und wird durch eine eineinhalbstündige schriftliche Prüfung beendet.

Zum Bestehen des E-Schein-Praktikums ist eine erfolgreiche Teilnahme an einem Kolloquium erforderlich. The lecture "technology of concrete", which has been provided by Prof. Reinhardt in the winter-term 1996/97 for the first time, discusses the characteristics of concrete. In this course all faces of concrete are discussed in detail: Components of concrete, additives, hardening process, strengths e.g. In addition to the theoretical basics the practical aspects are also taken into account, being testing methods, handling, etc. discussed. The aim of this lecture should be to give the students a recessed training in the main questions of concrete.

Since the summer term 1998, our institute offer the possibility of a practical training to get the theoretical conditions of the E-Schein.

The extent of the lecture "technology of concrete" comes to three lecture hours per week. At the end, there is an one and a half hour written examination.

To receive the E-Schein, the students have to withstand a colloquium.

## VORLESUNGSREIHE "KORROSIONSSCHUTZ" LECTURE COURSE "CORROSION PROTECTION"

Prof. Nürnberger

Die Vorlesungen im "Korrosionsschutz" werden im Rahmen der Vertiefung "Werkstoffe/ Bauphysik" 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.

Neben Studierenden des Bauingenieurwesens wendet sich die Vorlesung 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" wird abwechselnd mit zwei unterschiedlichen thematischen Schwerpunkten angeboten:

#### Themen im Sommersemester:

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

#### Themen im Wintersemester:

Korrosionsschutz durch metallische Überzüge (Verzinken), organische 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. Sie wird durch eine einstündige schriftliche Prüfung abgeschlossen. The lecture courses "corrosion protection" are offered as a part of the graduate level topic "materials and physics of buildings and structures". By the lectures one can attain knowledge which helps to solve problems concerning preventive corrosion protection as well as maintenance and repair of constructions in civil engineering.

Beside students of the structural engineering the lecture also turns to employees of engineer and architecture offices as well as to construction companies which search an entrance in the theme "corrosion" in civil engineering or would like to refresh / deepen their knowledge.

The lecture course "corrosion protection" is offered with two different central aspects of interest.

#### Topics in summer terms.

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

#### Topics in winter terms:

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

The lecture course may be visited either in the summer or in the winter term. Two lecture hours per week are offered. The course is ended with a one hour written examination.

## VORLESUNGSREIHE "MASSSTABSEFFEKT IN BETON- UND STAHLBETONKONSTRUKTIONEN" LECTURE COURSE "SIZE EFFECT IN CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE STRUCTURES"

Prof. Ožbolt (IWB)

Die Vorlesung "Maßstabseffekt 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 Betonund Stahlbetonkonstruktionen
- Maßstabseffekt 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. The lecture "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 lecture consists 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.

#### Literatur:

Karihaloo, B.L. (1995). Fracture Mechanics & Structural Concrete. Concrete Design and Construction Series, Longman Group Ltd.

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

## VORLESUNGSREIHE "NUMERISCHE MODELLIERUNG VON STAHLBETON" LECTURE COURSE "NUMERICAL MODELLING OF REINFORCED CONCRETE"

Prof. Ožbolt (IWB)

Die Studierenden, und zwar insbesondere später als konstruierende solche. die Ingenieure tätig werden, sollen die Grundlage über die numerische Modellierung von Stahlbeton kennen lernen (2 SWS). Die aewonnenen Kenntnisse werden die FE Anwendung von nichtlinearen 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.

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-hygromechanical models for concrete
- Examples
- Summary

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

#### Literatur:

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

- Karihaloo, B.L. (1995). Fracture Mechanics & Structural Concrete. Concrete Design and Construction Series, Longman Group Ltd.
- **Ožbolt, J. (1995).** Maßstabseffekt und Duktilität von Beton- und Stahlbeton- Konstruktionen. Habilitationsschrift, Universität Stuttgart.

## VORLESUNGSREIHE "BAUSTOFFAUSWAHL NACH ÖKOLOGISCHEN GESICHTSPUNKTEN" LECTURE COURSE "SELECTION OF BUILDING MATERIALS ON THE BASIS OF ECOLOGICAL CRITERIA"

Dr. Lünser (Wirtschaftsministerium)

Die Vorlesung "Baustoffauswahl nach ökologischen Gesichtspunkten" wurde im Wintersemester 1999/2000 erstmals angeboten.

Planende Bauingenieure und Architekten müssen die zu verwendenden Baustoffe aus einer Vielfalt von Möglichkeiten auswählen. Dies geschieht in Kenntnis von Eigenschaften wie Festigkeit, Dauerhaftigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Brandverhalten oder Kosten. Zunehmend werden auch die ökologischen Eigenschaften von Baustoffen hinterfragt. In der Vorlesung werden hierzu Kenntnisse vermittelt und folgende Themen behandelt:

- Einführung in die Bauökologie
- Baustoffherstellung
- Verarbeiten von Baustoffen
- Verhalten von Baustoffen während der Nutzung
- Recycling und Entsorgung von Baustoffen
- Ökologische Eigenschaften an Beispielen

The Course "Selection of building materials on the basis of ecological criteria" is offered for the first time in winter 1999/2000.

When selecting building materials civil engineers and architects have the choice between a large variety of opportunities. Selection criteria are the properties and characteristics of the materials such as strength, durability, thermal conductibility, behavior under fire as well as costs. Increasingly ecological properties of building materials are taken into account. This course shows the state of the art and highlights the following topics:

- Introduction to building ecology
- Manufacturing of building materials
- Working with building materials
- Behavior of building materials during utilization
- Recycling and disposal of building materials
- Examples of ecological properties



## VORLESUNGSREIHE "INGENIEURWERKSTOFFE – METALL, BETON, BODEN" LECTURE COURSE "ENGINEERING MATERIALS – METAL, CONCRETE, SOILS" [COMMAS – C7]

Prof. Eligehausen (IWB), Prof. Gehlen (IWB)

Das IWB unterstützt mit dem Einführungskurs "Ingenieurwerkstoffe - Beton" das "Master of Science" Programm "Computerunterstützter Mechanik von Materialien und Strukturen" (COMMAS). Der Kurs "C7" ist eine Einführung in Werkstoffe, die oft bei Entwurf und Analyse von Modellen verwendet werden. Die Vorlesung ist in folgende drei Abschnitte unterteilt: Metall, Beton, Boden. Eine Zusammenfassung des Kursinhalts ist in Tabelle 5 dargestellt. Ziel des Kurses ist es das Verständnis für das Materialverhalten der gezeigten Werkstoffe zu fördern. Da die Studenten von COMMAS aus verschiedenen Studienfächern des Ingenieurwesens stammen, wird mit C7 ein allgemeines grundlegendes Wissen über Werkstoffe vermittelt.

Die Vorlesung wird gemeinsam vom Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB), dem Institut für Geotechnik (IGS) und dem Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF) abgehalten. The Institute of Construction Materials supports the master of science program "computer-aided mechanic of materials and structures" with its lecture "Engineering material – concrete".

The course is an introduction into materials that are used often for the design and analyses of models. The lecture is split into these three parts: metals, soils, concrete. An overview of the contents of the lectures is shown in table 5. The aim of the course is to improve the understanding of the behavior of the materials presented. Because the COMMAS students have different engineering backgrounds the C7 course presents a basic knowledge of the materials.

It is organized by the Institute of Construction Materials, the Institute of Geotechnical Engineering and the Institute for Materials Testing, Materials Science and Strength of Materials.

| Concrete | - | Introduction<br>Properties of concrete<br>Classifications  |
|----------|---|--|
|          | - | Compressive behavior<br>Compressive failure of concrete<br>Stress-strain behavior in uniaxial compression  |
|          | - | Time dependent behavior<br>Rheological models for concrete<br>Shrinkage/Swelling<br>Creep/Relaxation<br>Fatigue                                      |
|          | - | Tensile behavior & fracture mechanics<br>Tensile failure of concrete<br>Stress-strain behavior in uniaxial tension<br>Fracture mechanics of concrete |
|          | - | Special concretes<br>High strength concrete<br>Lightweight concrete<br>Fiber reinforced concrete   |

| Tabelle 5: Inhalt der Vo | rlesung / Course Outline |
|--------------------------|--------------------------|
|--------------------------|--------------------------|

## VORLESUNGSREIHE "INGENIEURWERKSTOFFE – BETON" LECTURE COURSE "ENGINEERING MATERIALS - CONCRETE" [COMMAS – E7-2]

Prof. Ožbolt (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 guasispröden Materialen, 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 dem Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF) betreut wurde, ist in den vergangen Jahren in drei getrennte Wahlkursen (E7-1, E2-7, E7-3) unterteilt wurden.

E7-2 handelt von der detaillierten 3D numerischen Modellierung von guasi-spröden Materialen. 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 guasi-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, Conctete, 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 Institute for Materials Testing, Materials Science and Strength of Materials (IMWF), 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.

| Introduction and course organi-<br>zation                               | <ul> <li>Course organization and outline</li> <li>Quasibrittle materials and motivation for nonlinear analysis</li> </ul>  |
|---|--|
| Concrete material properties  | <ul> <li>Review of concrete behavior in tension and compression</li> <li>Extension to 3D</li> </ul>  |
| Modeling of concrete and frac-<br>ture mechanics                        | <ul> <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> <li>Associated vs. non-associated flow</li> <li>Failure surfaces for quasibrittle materials</li> </ul>  |
| Damage mechanics  | <ul> <li>Simple isotropic damage</li> <li>Mazar's damage model for concrete</li> <li>Other damage models</li> </ul>  |
| "The Smeared Crack Models"  | <ul><li>Fixed / Multi-direction fixed / Rotating</li><li>Stress locking</li></ul>  |
| Microplane theory   | <ul> <li>Concept and fundamental equations</li> <li>Relaxation of kinematic constraint / Anisotropy / Model validation</li> </ul>  |
| Objectivity of the analysis<br>(regularization) and new<br>developments | <ul> <li>Crack band and higher order methods</li> <li>Adaptive meshing</li> </ul>  |
| Course summary  |  |

Tabelle 6: Inhalt der Vorlesung / Course Outline

## VORLESUNGSREIHE "EINFÜHRUNG IN DIE INFORMATIK" LECTURE COURSE "INTRODUCTION TO INFORMATICS"

Dr. Schwarte / Dipl.-Ing. Piehl

Im Wintersemester 2006/2007 wurde die Lehrveranstaltung "Einführung in die Informatik" für Studierende im ersten Semester des Bauingenieurwesens sowie der Immobilientechnik und –wirtschaft von Mitarbeitern des IWB durchgeführt. Die Veranstaltung setzt sich zusammen aus Vorlesungen (Dr. Schwarte) und Hörsaalübungen (Dipl.-Ing. Piehl) im Umfang von je zwei Semesterwochenstunden sowie virtuellen Gruppenübungen, die unter Benutzung des Online- Kooperationssystems BSCW abgewickelt werden.

Am Ende der Lehrveranstaltung steht eine zweistündige schriftliche Prüfung.

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

In winter term 2006/2007 the course "Introduction to Informatics" for students of civil engineering and engineering and economy of real estates in their first year was held

by members of the IWB. The course consists of lectures (Dr. Schwarte) and exercises (Dipl.-Ing. Piehl) with an extend of two hours per week each. These lectures and exercises are additionally supplemented by virtual group exercises, which are organized using the online cooperations software system BSCW.

At the end of the course a two hours written examination has to be passed.

The following table shows the topics covered by the lectures.

| Nr. | Thema / Topic                        | Stichworte / Keywords   |
|-----|--------------------------------------|---|
| 1   | Algorithmen und Turing-<br>Maschinen | Bsp.: Euklidischer Algorithmus; Berechenbarkeit; Halteproblem   |
| 2   | Computer                             | Geschichtliche Entwicklung; von-Neumann-Rechner;<br>Betriebssysteme; Dateien und Dateisysteme; Kompatibilität                                     |
| 3   | Programmiersprachen                  | Maschinenorientierte Programmierung; Assembler; Interpreter;<br>Compiler; nichtprozedurale Sprachen; Programmierparadigmen                        |
| 4   | Programmierprinzipien                | "Top-Down_Methode"; Rekursion; Iteration; Backtracking-<br>Verfahren; Heuristik; "Teile und Herrsche"; Simulationen                               |
| 5   | Vom Algorithmus zum<br>Programm      | Unterprogramme; Prozeduren; Funktionen; Ausdrücke;<br>Operatoren; Beispiele in Qbasic   |
| 6   | Tabellenkalkulation                  | Arbeiten mit Excel - Anwendungsbeispiele  |
| 7   | Datenstrukturen                      | Graph; Baum; Liste; Adjazenzmatrix; Inzidenzmatrix; "Königsberger<br>Brückenproblem"; Netzplan; Petri-Netze                                       |
| 8   | Relationale Datenbanken              | Normalformen; Entity-Relationship-Modell; Bsp.: Verwaltung eines Mietwohnhauses   |
| 9   | Computernetzwerke                    | Topologien; Leistungsvermittlung; Paketvermittlung;<br>Schichtenmodelle; Internet   |
| 10  | Internet Anwendungen 1               | Ethernt; IP; ICMP; DNS  |
| 11  | Internet Anwendungen 2               | UDP; TCP; FTP; E-Mail   |
| 12  | Internet Anwendungen 3               | Usenet; WWW; Dynamische Webseiten   |
| 13  | Wissensbasierte Systeme              | Daten; Informationen; Wissen; Aussagenlogik; Prädikatenlogik;<br>Bsp.: Prolog; Wissensrepräsentationen; Semantisches Netz;<br>Thesaurus; Glossare |
| 14  | Online Datenbanken                   | Suchen im WWW; Metadaten; "Semantic Web"  |
| 15  | Sicherheit                           | Datenschutz; Viren; Zertifizierung; Redundanz; Kryptographie  |

Tabelle 7: Themen und Stichworte / Topics and Keywords

## VORLESUNGSREIHE "ANWENDUNGEN DER ZERSTÖRUNGSFREIEN PRÜFUNG IM BAUWESEN TEIL I + II" LECTURE COURSE "APPLICATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS IN CIVIL ENGINEERING PART I + II"

PD Dr.-Ing. Große

Die Vorlesung ist in zwei Teile unterteilt (WS/SS), die sich schwerpunktmäßig mit den Grundlagen der zerstörungsfreien Prüfung, mit Verfahren zur Qualitätssicherung, Inspektion und Dauerüberwachung sowie mit Praxisanwendungen befassen. Grundsätzlich wird empfohlen, die Vorlesungen nacheinander beginnend mit dem WS zu hören.

Der Besuch nur einer Vorlesung ist jedoch auch möglich. Neben den Vorlesungen in Vortragsform, die einen Überblick über die Prüfmethoden geben sollen und die Grundlagen vermitteln, werden umfangreiche Übungen zu fast allen genannten Techniken durchgeführt. Ziel im 1. Teil der Vorlesung (WS) ist insbesondere die Erarbeitung von Kenntnissen in den Bereichen Qualitätssicherung von Baumaterialien und Bauteilen und deren Inspektion und im 2. Teil in den Bereichen Inspektion und Dauerüberwachung.



Die Vorlesung richtet sich an Studierende des Bauingenieurwesens oder der Immobilientechnik ab dem 6. Semester und hat einen Umfang von 2 Semesterwochenstunden. Sie schließt mit einer einstündigen Prüfung ab.

Inhalt des ersten Teils der Vorlesung sind die Qualitätssicherung von Bauprodukten (vor allem von Betonwaren) und die Inspektion des Bauwerkszustands. Kenntnisse der Methoden für die Qualitätssicherung und den



Erhalt von Bauwerken werden darüber hinaus zu einer wichtigen Zusatzqualifikation von Ingenieurinnen und Ingenieuren. Besonders wichtig für die Prüfung von Bauteilen und Bauwerken sind zerstörungsfreie Prüfmethoden. Die Vorlesung behandelt deswegen die meisten der in der Praxis relevanten Verfahren (wie z. B. Ultraschall, IR-Thermografie und Radar). Neben einem einführenden Grundlagenteil werden die Messverfahren in Form von Übungen vorgeführt; eigene Messungen sind möglich.



Ziel des zweiten Vorlesungsteils ist neben weiteren Inspektionsverfahren die Überwachung von Bauwerken. Dieses Thema bekommt derzeit durch die zunehmende Überalterung von Bauwerken in Deutschland eine besondere Relevanz – vor allem vor dem Hintergrund einiger Schadensfälle wie die Einstürze von Hallen (Bad Reichenhall, Kattowitz) und Brücken (Minneapolis). Die Bauministerkonferenz hat 2006 Vorgaben gemacht, wie Bauwerke zukünftig zu überwachen sind und vor diesem Hintergrund bietet die Vorlesung einen Überblick über den aktuellen Stand der entsprechenden Methoden.

| Teil I (WS)  | Zerstörungsfreie Prüfmethoden für die Qualitätssicherung und Inspektion                          |
|--------------|--|
|              | - Einführung: Hintergründe, Historisches, Vorlesungsplan   |
|              | <ul> <li>Motivation f ür Pr</li></ul>  |
|              | <ul> <li>Grundlagen I: Schwingungen und Wellen</li> </ul>  |
|              | <ul> <li>Grundlagen II: Wellenausbreitung in endlichen Medien</li> </ul>                         |
|              | <ul> <li>Messtechnik und Sensorik</li> </ul>   |
|              | <ul> <li>Signalaufzeichnung und Auswertung</li> </ul>  |
|              | <ul> <li>Pr üfverfahren f ür die Qualit ätssicherung von Frischbeton mit US</li> </ul>           |
|              | <ul> <li>Charakterisierung von Bauteilproben I: Ultraschall</li> </ul>                           |
|              | <ul> <li>Charakterisierung von Bauteilproben II: Schwingungsanalyse</li> </ul>                   |
|              | <ul> <li>Inspektion von Bauwerken I: Schadensdetektion mit Impact-Echo</li> </ul>                |
|              | – Inspektion von Bauwerken II: Schadensdetektion mit IR-Thermografie                             |
|              | <ul> <li>Inspektion von Bauwerken II: Schadensdetektion mit IR-Thermografie</li> </ul>           |
| Teil II (SS) | Zerstörungsfreie Prüfmethoden für die Inspektion und Dauerüberwachung                            |
|              | – Einführung: Hintergründe, Motivation für Prüfaufgaben im Bauwesen                              |
|              | <ul> <li>Grundlagen I + II der zerstörungsfreien Pr</li></ul>                                    |
|              | <ul> <li>Messtechnik und Sensorik</li> </ul>   |
|              | <ul> <li>Schallemissionsanalyse I (Grundlagen)</li> </ul>  |
|              | <ul> <li>Schallemissionsanalyse II (Detektion von Rissen)</li> </ul>                             |
|              | <ul> <li>Messung der Bewehrungskorrosion (Potentialfeldmessung)</li> </ul>                       |
|              | <ul> <li>Detektion von Spannstahlbrüchen (Magnetische Streufeldmessung)</li> </ul>               |
|              | <ul> <li>Inspektion von Bauwerken I: Radar</li> </ul>  |
|              | <ul> <li>Inspektion von Bauwerken II: IR-Thermografie</li> </ul>                                 |
|              | <ul> <li>Eigenschwingungs- und Modalanalyse</li> </ul>   |
|              | <ul> <li>Überwachung von Bauwerken: Bauschäden aus jüngster Zeit</li> </ul>                      |
|              | (Bad Reichenhall und die Folgen)   |
|              | Uberwachung von Bauwerken: Einführung und Konzepte     (vieuelle Bröfung, SIR, Clasfonartechnik) |
|              | (visuelle Prulung, SIB, Glasiasertechnik)  |
|              | - wooerne Oberwachungsverrahren (kabeliose Datenubertragung, Motes)                              |

## DATENERFASSUNG UND -VERARBEITUNG DURCH DRAHTLOSE SENSORNETZE FÜR DAS BAUWERKSMONITORING DATA ACQUISITION AND PROCESSING FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING

## USING WIRELESS SENSOR NETWORKS

von/by Panagiotis Chatzichrisafis, Sebastian Bachmaier

### Einleitung

Viele Ingenieurbauwerke werden in regelmäßigen Abständen inspiziert, um größtmögliche Sicherheit zur gewährleisten und außerdem einen reibungslosen Betrieb des Bauwerks zu ermöglichen. Potentiell geeignete Bauwerke kommen aus dem Hoch- und Tiefbau und dem Brückenbau. Wird der Zustand eines Bauwerks falsch eingeschätzt, kann dies dramatische Folgen haben, wie z.B. die Unfälle in Bad Reichenhall 2006 [1] oder in Minneapolis (USA) 2007 [2] zeigen.

Bauwerksmonitoring mittels drahtloser Sensornetze, wie es in [3], [5] und [6] dargestellt wird, stellt eine kostenoptimierte Möglichkeit dar, den Zustand von Bauwerken zu überwachen. Der Kostenvorteil resultiert aus der einfachen, kabellosen Montage am Bauwerk, sowie aus der Verwendung moderner, aber dennoch preiswerter Komponenten in den Sensorknoten. Um spezifische Aussagen über (potentielle) Schäden oder Schädigungsprozesse treffen zu können, tauschen die einzelnen Knoten ihre Daten mit den Nachbarknoten aus. Durch diese Aggregation kann eine verbesserte, intelligentere Auswertung erreicht werden.

Im Folgenden werden die Datenerfassung und die dabei möglichen physikalischen Größen dargestellt, dann Möglichkeiten der Verarbeitung der Daten und die verwendeten Algorithmen aufgezeigt und schließlich wird in zwei Feldversuchen beispielhaft der aktuelle Stand der Entwicklung verdeutlicht.

#### Datenerfassung

Verschiedene physikalische Größen können Aufschluss über Aspekte der Bauwerksschädigung geben. In der Abteilung Zerstörungsfreie Prüfung der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart stehen zurzeit die dy-

#### Introduction

Many engineering buildings are inspected at regular intervals to ensure a maximum degree of safety and furthermore to render possible a smooth operation of the structure. Potentially suitable buildings comprise those from structural and underground engineering and bridge buildings. If the health condition of the structure is misjudged, this can have fatal consequences, as show the breakdowns of Bad Reichenhall, Germany in 2006 [1] or of Minneapolis, USA in 2007 [2].

Structural health monitoring by means of wireless sensor networks, as shown in [3], [5] and [6], represent a cost-effective possibility of monitoring the state of structures. The cost advantage results from the easy, wireless installation on site, as well as from the usage of state-of-the-art but nevertheless cheap components within the sensor nodes. To still make a reliable judgment of the (potential) damages or damage processes, the nodes communicate their data with their neighbors. By this information aggregation an improved and more intelligent analysis can be achieved.

In the following, we start by depicting the possible physical dimensions, then the possibilities of processing this data and the related algorithms are pointed out and finally the last chapter makes clear the current development status by exemplarily describing two field trials.

#### Data acquisition

Different physical measurands can offer insight into the aspects of the structural damage. The department Non-destructive Testing and Monitoring Techniques of the Institute of Material Testing, University of Stuttgart, curnamische Dehnungsmessung und die Schallemissionsanalyse im Vordergrund, da sie die höchsten Anforderungen an das System stellen. Diese Methoden benötigen hohe Abtastraten, um die dynamischen Vorgänge im Bauwerk zu erfassen. Andere denkbare Größen sind u.a. Beschleunigung und Verschiebung. Zusätzlich dazu werden in periodischen Abständen sich langsam ändernde Umgebungsgrößen gemessen. Dazu gehören nicht nur Temperatur und Feuchtigkeit, sondern auch interne Parameter der Sensorknoten, wie die Betriebsspannung. Diese Größen können zur Plausibilisierung der dynamischen Messgrößen herangezogen werden.

Die Datenspeicherkapazität in den Sensorknoten (im Folgenden auch Motes genannt, abgeleitet vom englischen Staubkorn) ist stark begrenzt. Auf den verwendeten Telos-Motes sind nur 10 KiB RAM vorhanden. Das Produkt aus Aufzeichnungsdauer, Abtastrate und Abtastauflösung muss deshalb innerhalb des verfügbaren Speichers bleiben.

 $t_{Aufzeichnung}[s] \cdot f_{Abtast}[1/s] \cdot N_{Auflösung}[bits] < M_{RAM}[bits]$ Es ist deshalb – und außerdem aus Energieeffizienzgründen – notwendig, nur Messwerte aufzuzeichnen, wenn auch dynamische Änderungen zu erwarten sind. Das Auslösen einer Messung wurde wegen der unterschiedlichen Anforderungen für die dynamische Dehnungsmessung und für die Körperschallmessung auf zweierlei Art gelöst.

#### Dynamische Dehnungsmessungen

Bei den üblicherweise zum Einsatz kommenden Dehnmessstreifen in Wheatstone-Brückenschaltung ist der ständig fließende Brückenstrom ein sich auf die Energieeffizienz negativ auswirkender Faktor. Daher ist die Brücke während der nicht-aktiven Zeiten stromlos. Für das Anstoßen der Dehnungsmessung wurde deshalb eine Beschleunigungserkennungskomponente entwickelt, die sich durch einen mittleren Energieverbrauch von weniger als 10  $\mu$ W auszeichnet (abhängig vom verwendeten Modus). Bei Erkennung einer Bewegung schaltet diese Komponente die Brückenspannung ein und die Deh-

rently focuses on dynamic strain measurements and acoustic emission measurements due to the high system requirements. These methods need high sampling frequencies to acquire the dynamic processes in the structure. Further quantities that could be measured with the sensor network include acceleration and displacement. In addition to these measurands, ambient quantities will be measured in periodic intervals. This not only comprises temperature and humidity, but also internal parameters of the sensor nodes, like battery voltage. These quantities can be used for the validation of the dynamic measurands. The memory capacity of the sensor nodes (which will also be called motes in the following) is very restricted. On the Telos-motes, which were used, only 10 KiB of RAM are present. The product of recording time, sampling rate and sampling resolution must therefore fit into the available memory.

 $t_{recording}[s] \cdot f_{sampling}[1/s] \cdot N_{resolution}[bits] < M_{RAM}[bits]$ That is why it is essential to record only measurement readings if dynamic changes are to be expected. The energy efficiency is another reason to sample as scarcely as possible. As cause of the different requirements for the dynamic strain measurements and for the acoustic emission measurements, the triggering of a measurement has been solved in two separate ways.

#### Dynamic strain measurements

If the commonly used strain gauge measurement strips in Wheatstone bridge circuit wiring are employed, the continuously flowing bridge current is a factor with negative impact on the mote's energy efficiency. Hence, the bridge is inactive during the non-active times. As a result, an acceleration detection component was developed which is used for the triggering of the strain measurements. The component excels by its small mean power consumption of less than 10  $\mu$ W (depending on power mode used). On detection of acceleration, this component switches on the bridge voltage and the strain measurement

nungsmessung kann starten. Die Komponente ist für den Einsatz an Eisenbahnbrücken konzipiert, da dort die Schwingungen bei Einfahren des Zugs in den Brückenbereich stark genug sind, um noch rechtzeitig (d.h. nach wenigen µs) die eigentliche dynamische Dehnungsmessung zu starten. Die Komponente basiert auf dem Beschleunigungssensor Bosch Sensortec SMB380, der verschiedene Stromspareinstellungen erlaubt. Ungelöst ist im Moment noch die Vermeidung von Einschwingvorgängen, die durch das Unterstromsetzen der Brückenschaltung direkt vor dem Messzeitpunkt auftreten.

Ist die Messung gestartet, werden je nach Abtastrate zwischen einigen Sekunden bis zu wenigen Minuten lang Daten aufgezeichnet, die dann in einem zweiten Schritt weiterverarbeitet (siehe Abschnitt Datenverarbeitung) oder als Rohwerte zu einer zentralen Datenbank übertragen werden können.

#### Schallemissionen

Bei der Schallemissionsanalyse ist die gemessene Größe der durch das Bauwerk geleitete Körperschall. Dadurch, dass die Abtastrate um ein Vielfaches höher liegt als bei der Dehnungsmessung, ist die Messdauer noch stärker beschränkt. Andererseits sind die betrachteten Schallereignisse kurz, sodass die kurze Messdauer nicht ins Gewicht fällt. Allerdings ist in diesem Fall kein externes Triggern möglich, wie es mit dem SMB380 möglich war. Denn die mit der Schallemissionsanalyse zu detektierenden Brüche haben sehr geringe Bruchenergien und regen das Bauwerk nur bedingt zum Schwingen an. Um dennoch das energieaufwändige ständige Digitalisieren der Schalldetektoren zu vermeiden, wird ein analoger Schwellwertauslöser verwendet. Überschreitet der anliegende Schallpegel einen bestimmten, analogen, aber digital einstellbaren Wert, löst ein Komparator einen Interrupt aus. Erst dann wird der Mikroprozessor aus dem Energiesparmodus aufgeweckt und die Analog-Digital-Wandlung beginnt für die Dauer von wenigen Millisekunden.

can start. The component is designed for the employment on railway bridges, as the accelerations during the entering of the train into the bridge section are high enough to start the actual dynamic strain measurements in due time, i.e. within few  $\mu$ s. The component is based on the Bosch Sensortec SMB380 acceleration sensor, which supports several energy saving settings. However, presently the avoidance of transient phenomena regarding the start-up of the Wheatstone bridge directly before starting sampling is unresolved.

Once the measurement is started, data is recorded for several seconds to a couple of minutes – depending on the sampling rate. The data can then be processed further in a second step (refer to section data processing) or can be transmitted to a central database as raw values.

#### Acoustic Emissions

The physical measurand in case of acoustic emission is the sound traveling through the structure. As the sampling rate is many times higher than that of the strain measurements, the recording time is even more restricted. On the other hand, the acoustic events considered are short, so that the short recording time is of no consequence. However, for acoustic events, no external triggering is feasible, as it was possible with the SMB380 for strain measurements, because the fracture processes to be detected cause acoustic events of very small crack energies only. These do not lead to macroscopically measurable vibrations of the construction. Nevertheless, in order to avoid the energy consuming continuous sampling of the acoustic detectors, an analogue threshold trigger is used. As soon as the recorded sound level exceeds a certain analogue - but digitally adjustable value, a comparator triggers an interrupt. Only then the microprocessor is reactivated from energy saving mode and the analog-to-digital conversion begins for the period of several milliseconds.

Dann werden die Rohwerte an eine Datenbank übertragen. Alternativ dazu soll in Zukunft eine Vorverarbeitung in den Motes stattfinden (siehe nächster Abschnitt).

#### Datenverarbeitung

Da in der Akquisition der Schallemissionsdaten die meisten Daten pro Zeiteinheit anfallen wurde das Augenmerk im letzten Jahr hauptsächlich auf die Bearbeitung dieser Signale gerichtet. Aufgrund der pulsartigen, transienten Natur von Brüchen werden Schallemissionen oft mit sehr kleinen Abtastintervallen aufgezeichnet (1 µs) und anschließend bearbeitet. Diese hohe Abtastrate ist für ein drahtloses Sensornetz mit begrenzten Energiekapazitäten untragbar. Da das Bauwerk als Signalfilter wirkt und hochfrequente Anteile des Signals am stärksten abschwächt, kann der Hauptteil der Signalenergie im unteren Frequenzbereich bis zu etwa 100 kHz erwartet werden. Die Analog-Digital-Wandler auf den Telos-Motes arbeiten bis zu einer Abtastrate von 50 kHz pro Kanal für vier Kanäle, können demnach Signalbandbreiten bis 25 kHz aufzeichnen ohne Ambiguitäten zu erzeugen. Da die Hauptenergie der Signale sich ohnehin im niederfrequenten Bereich befindet. bietet es sich an. die Sianalkomponenten im akustischen Bereich zu benutzen, um für die Inspektion interessante Informationen aus diesen Frequenzen zu extrahieren und zugleich die Aufzeichnungshardware einfach zu halten. Die Fragen die sich dabei stellen sind, ob die aufgezeichneten Frequenzen ausreichen, um auf wichtige Informationen schließen zu können, wie

- 1. die Position der Schall emittierenden Quelle
- 2. oder auf die eigentliche Signalform.

Diese Fragen konnten durch die Daten einer Reihe von Experimenten [7] hier am Institut mit simulierten Quellen (HSU-Nielsen), aber auch in einem "Concerto" genannten Feldversuch an einer realen Struktur in Zusammenarbeit mit dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) der Universität Braunschweig positiv beantwortet Then, the raw values are transmitted to a database. In combination to this, a preprocessing in the motes will take place in future (refer to next section).

### Data processing

Due to the fact that acoustic emissions produce the most data per time unit, the main effort of last year's work was focused on signal processing strategies for acoustic emissions. The pulse-like, transient nature of fracture processes that cause acoustic emissions is the reason that acoustic emissions of cracks are often recorded and subsequently processed with very small sampling intervals (1 us). Such high sampling rates are prohibitive for the use in wireless sensor networks with very restrictive energy requirements. Given that the building structure acts as a signal filter, attenuating high frequency components stronger than low frequency components, the main signal energy can be expected in the lower part of the spectrum up to approximately 100 kHz. The analog digital converter on the Telos motes can work with a sampling frequency of up to 50 kHz for four channels, and thus are able to record signals with bandwidths up to 25 kHz without ambiguities. Because the strongest energetic part of the signals is in the lower part of the spectrum, it would be convenient to use the signal components in the acoustic range of the spectrum, in order to extract interesting information for the inspection and at the same time keep the recording hardware simple. The main questions that arise are if the frequency components are adequate in order to extract important information like

- 1. the position of the sound emitting source,
- 2. or the shape of the original signal.

These questions could be answered affirmatively with the data of a series of experiments [7] that were performed here at the institute with simulated sources (HSU Nielsen), but also in a field test named "Concerto" on a bridge like structure with real fractures in cooperation with the Institut für Baustoffe, Maswerden. Die Signale wurden zunächst mit Transienten-Rekordern bei einer Abtastrate von 1 MHz aufgezeichnet und in Laborversuchen dann später auf 20 kHz gefiltert und zugleich die Abtastungsrate auf 40 kHz verringert. Die Signalrichtung wurde durch einen konventionellen Interpolations-Beamformer [8], [9] im Zeitraum mit Einheitsgewichtungen der Sensorkanäle geschätzt. Diese Vorgehensweise wurde hauptsächlich deswegen favorisiert, weil sie keine weitere Analyse der Signale erfordert und somit weniger Rechenleistung in Anspruch nimmt. In Hinblick auf die geschätzte Richtung der Quelle ist diese Vorgehensweise allerdings nicht optimal, da die Auflösung der Methode hauptsächlich von der niedrigsten resonanten Frequenz abhängig ist. Diese führt zu einer kleineren Auflösung als die höchstmögliche Frequenz für welche die Sensoranordnung erstellt wurde und vergrößert das Nahfeld der Anordnung. Dies, die deutliche Präsenz niederfrequenten Rauschens unter 5 kHz und die Tatsache, dass die in [7] benutzte Arrayanordnung eine als ausreichend eingestufte Diskriminierung von Oberflächenwellen von ca. 2000 m/s und Longitudinalwellen von etwa 4000 m/s erst ab 7 kHz zuließ, führte zu dem Entschluss die Signale zusätzlich durch einen Hochpassfilter bei ca. 7 kHz laufen zu lassen. In den Experimenten [7] konnten mit Hilfe der Fernfeldannahme die Richtungen der 45 simulierten Quellen mit einem Median-Fehler von 7.2° und einer Standardabweichung des Fehlers von etwa 13°, mit der besten Variation des Algorithmus lokalisiert werden. Dazu wurde als Schätzer der Ankunftsrichtung die maximale Energie eines Signalpaketes von 100 Tastpunkten benutzt, während die Signale von 40 kHz auf 200 kHz interpoliert worden waren. Somit konnte der erste Teil der gestellten Fragen positiv beantwortet werden, da die geschätzten Richtungen ein gutes Indiz der tatsächlichen Richtungen der Schallquellen lieferten.

Auch auf die Frage, ob man durch diese Signale mit kleineren Abtastraten und kleinerem Frequenzspektrum einen (automatisierten) sivbau und Brandschutz (IBMB) of the University of Brunswick. The acoustic emissions were recorded with a recording device for transient signals at a sampling rate of 1 MHz and later filtered to 20 kHz bandwidth and downsampled to a sampling rate of 40 kHz in the laboratory. The direction of arrival of the signal waveforms was then estimated using a conventional time domain interpolation beamformer [8], [9] with uniform shading of the sensor channels. This approach was preferred mainly because no further signal processing is needed and thus less arithmetic operations are used to obtain the estimate. For the estimation of the direction of arrival of the source, this approach is unfortunately not optimal because the resolution of this method depends mainly on the lowest resonant frequency which results in a smaller resolution than the highest possible frequency that the array was designed for. This, the presence of noise in the lower part of the spectrum below 5 kHz and the fact that the array structure of the experiments [7] was judged to discriminate adequately surface waves with approximately 2000 m/s from longitudinal waves of approximately 4000 m/s only after 7 kHz, resulted in the decision to filter the data with an additional highpass filter at approximately 7 kHz. In the experiments [7] the directions of arrival of the 45 simulated sources could be estimated with a median error of 7.2 degrees and a standard deviation of the error of approximately 13 degrees for the best case of the algorithmic variation using the farfield assumption. The estimator of the direction of arrival of this approach used the maximum energy of a signal packet of 100 samples while the signal was interpolated from 40 kHz to 200 kHz. Thus the first of the two questions that arose could be answered affirmatively because the estimates of the directions of arrival indicate very well the true direction of the acoustic sources.

Also the second question, if it is possible to deduce the shape of the signal waveforms (in an automated way) from the signals with lower frequency content and sample rate Rückschluss auf die Form der eigentlichen Signale ziehen kann, konnte beantwortet werden. In diesem Fall wurden die Signale des "Concerto"-Experimentes als Referenz benutzt, da sie den Signalen einer Gebäudeüberwachung eher entsprechen, und zugleich eine große Anzahl von Signalreihen aufgezeichnet wurde. Zur Einteilung der Signale wurde der K-means [10] Algorithmus benutzt, wobei die Güte der Clustermethoden durch die einer Clustermethode verglichen wurde, die im Vergleich zur Klassifizierung durch Expertenmeinung vergleichbar abschnitt. Es wurden zuvor drei Signalkategorien unterschieden:

- Signale die durch Expertenmeinung mit großer Wahrscheinlichkeit einem Bruch zuzuordnen sind (Category-1),
- Emissionen welche wahrscheinlich einem Bruch zuzuordnen sind, der z.B. eine größere Distanz als im ersten Fall aufweist und deshalb eine geringere Gewissheit über die Quelle der Emission zulässt (Category-2),
- und jenen Signale von denen man ausgeht, dass diese durch etwas anderes als einen Bruch zustande kamen (Category-N).

Während für Signale mit hohem Frequenzinhalt und großer Abtastungsrate sehr gute automatisierte Klassifizierungen erzielt werden konnten, erwies sich die Lage für Signale mit geringerem Frequenzanteil und geringer Abtastungsrate schwieriger. Hier wurden zwei Klassifizierungsschemata identifiziert: eines, das Category-N Signale gut von Signalen aus Brüchen (Category-1 und Category-2) unterscheiden konnte und eine 90% Reduzierung der Category-N Signale zur Folge hatte, und eines, das gut Category-1 von Category-2 Signalen unterscheiden konnte (etwa 94% der Category-2 Signale wurden richtig erkannt während etwa 75% der Category-1 Signale richtig zugeteilt wurden und weitere 24% als Category-2 eingeteilt wurden). Im Zusammenspiel können diese eine akzeptable Klassifizierung der erwähnten Signalklassen erzeugen [3][4] und dies mit relativ gerincould be answered. In this case, the signals from the Concerto experiment were used as reference because they correspond better to samples that can be expected from monitoring buildings in real situations and the large number of signal samples obtained by this experiment. For the classification of the signals the K-means algorithm [10] was used while the quality of the clustering methods was compared to a clustering procedure that gave comparable results as a classification by expert opinion. Three signal categories were distinguished a priori:

- Signals that were assigned by expert opinion to be a result of a crack with high probability (Category-1),
- Emissions that were assigned to a probable crack formation with, for example, greater range as in the first case and thus lower certainty of the origin of the emission (Category-2)
- and those signals that were believed to have originated from something other than a crack (Category-N).

While for signals with high frequency content and high sampling rates, classification schemes with very good results could be established easily, the situation proved more difficult for signals with lower frequency content and sampling rates. Two classification schemes could be identified as useful for this purpose, one that was able to distinguish Category-N signals from signals that probable were generated by cracks (Category-1 and Category-2) and resulted in a 90% reduction of Category-N signals, and one that could distinguish Category-1 signals from Category-2 signals but was not able to distinguish Category-N signals (94% of Category-2 signals were rightly recognized, while 75% of the Category-1 signals were identified as such, but 24% percent were classified as Category-2). Both schemes in combination can provide an acceptable [3][4] classification of the mentioned signal classes with relatively low arithmetic complexity. Better classification criteria can be expected by the use of more complex training methods than the used K-

gem arithmetischem Aufwand. Noch bessere Klassifizierungsschemata können durch den Einsatz komplexerer Trainingsverfahren als den hier benutzten K-means erwartet werden, die Plausibilität und Machbarkeit eines solchen Vorgehens ist mit den erzielten Ergebnissen allerdings bereits geliefert. Somit konnte auch die zweite Frage positiv beantwortet werden. Die Nutzung einer Abtastrate von 40 kHz benötigt 96 % weniger Daten im Vergleich zu einer Abtastrate von 1 MHz und erlaubt Rückschlüsse auf die Fragen wie Signalform und Richtung der Quellen der Schallemissionen. Es muss hier darauf hingewiesen werden, dass die erwähnten Methoden zwar die Datenmenge reduzieren, aber keine Datenkompression im Sinne einer angepassten Transformations- und Entropiekodierung erzeugen, welche eine weitere Reduktion der Datenmenge erlauben.

#### Feldversuche

Im Juli 2007 wurden Feldversuche durchgeführt, die den Stand der Entwicklung der dynamischen Dehnungsmessung und die Schallemissionsanalyse unter realen Umgebungsbedingungen aufzeigen sollten.

#### Dynamische Dehnungsmessungen

An einer Eisenbahnbrücke über den Keräsjoki-Fluss in Nordschweden wurden acht Dehnmessstreifen angebracht, sechs davon auf den Längsträgern, zwei auf den Grundträgern. Hauptmessgröße war die dynamische Dehnung. Die Speicherzeit war dabei auf 30 s eingestellt, d.h. 30 s ab Erkennung des Zugs wurde die Dehnung mit einer Abtastrate von 100 Hz aufgezeichnet. Dabei wurde die oben vorgestellte Zugerkennung verwendet. Weiterhin wurden die Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Routinginformation sowie Betriebsspannung der Motes im Abstand von jeweils 2 min aufgenommen. Abbildungen 1 und 2 zeigen die Brücke und die Position von vier der acht Motes.

means algorithm, but the plausibility and the feasibility of such an approach is already proved by the provided results. In this way the second of the raised questions could also be answered affirmatively. The use of a sampling rate of 40 kHz needs 96% less storage capacity in comparison to a sampling rate of 1 MHz and allows to deduce the signal shape of the waveforms with higher frequency contents, and to estimate the direction of arrival of the acoustic emissions. It must be noted that the mentioned methods significantly reduce the data, but that no data compression in the sense of a specialized transformation and entropy coding was used, that would reduce the amount of data further.

### **Field trials**

In July 2007 field trials have been conducted with the purpose to demonstrate both the development status of the dynamic strain measurements as well as for acoustic emission under environmental conditions.

#### Dynamic strain measurements

Eight strain gauges were attached to a railway bridge which crossed the Keräsjoki-river in northern Sweden. Six of them were attached to the stringer, two of them to the floor beam. Main measurand was the dynamic strain of the bridge. The recording time was set to 30 s, i.e. 30 s from the time of the traindetection on, the strain was sampled with 100 Hz. Thereby the train detection component, as presented earlier, was used. In addition, temperature, humidity, routing information as well as operating voltage was recorded in 2 min intervals. Figure 1 and 2 show the bridge and the position of four of the eight motes.



Abbildung 1: Eisenbahnbrücke in Nordschweden; links im Bild ist die Stützsolarzelle für die Stromversorgung der Basisstation zu sehen Figure 1: Railway bridge in northern Sweden; in the left the supporting solar cell for the battery of the base station can be seen

In Abbildung 3 ist exemplarisch eine Messkurve der dynamischen Dehnung gezeigt. Der Anfang des Zugkopfes ist nicht mit abgebildet, als Effekt der Zugerkennung, die erst anspricht, wenn die Brücke schon leicht vibriert. Die Ansprechschwelle lag bei ca. 62 mm/s<sup>2</sup>. Die Brückenüberfahrt jeder einzelnen Achse lässt sich anhand der Dehnung ablesen. Von Position A bis B ist der Achsenabstand geringer als zwischen Position B und C als Resultat unterschiedlicher Waggontypen. Die Dehnung beträgt maximal 130 µstrain und ist damit weit unterhalb der Dehngrenze von Stahl.



Abbildung 2: Anbringung und Position (verdeutlicht durch rote Ellipsen) der Motes Figure 2: Mounting and position (highlighted by red ellipses) of the motes

Figure 3 gives an example of a measurement curve of the dynamic strain. The beginning of the train is not depicted as an effect of the train detection mechanism, which only reacts after the bridge is already vibrating slightly. The response threshold was set to about 62 mm/s<sup>2</sup>. Die bridge crossing of every single axle can be deducted from the strain values. From position A to B the axle spacing is inferior to between position B and C, which results from different wagon types. The strain adds up to 130 µstrain at maximum and is therefore far below the elastic limit of steel.



Figure 3: Strain behaviour during a train crossing

#### Schallemissionsanalyse

Wie bereits beschrieben bot sich im "Concerto"-Experiment die Möglichkeit, Daten zu gewinnen welche aus echten Brüchen in einer brückenähnlichen Struktur durch Applikation von Last zu Stande kamen. Das Concerto-

#### Acoustic emission

As it is already described, the Concerto experiment gave the opportunity to obtain data from real fractures that resulted from the application of load to a bridge-like structure. The concerto experiment was developed at the

Experiment wurde an der TU Braunschweig in Zusammenhang mit dem SFB 477 entwickelt [11], wobei in Kooperation mit der TU Braunschweig nachfolgend einige Untersuchungen durchgeführt wurden. Insgesamt wurden bei einem Belastungstest 19664 Signalformen aufgezeichnet, von denen 8304 als Category-1, 9717 als Category-2 und 1643 als Category-N durch einen Klassifizierungsalgorithmus eingestuft wurden, der auf die unbearbeiteten Signale angewandt wurde. Ein kreuzähnliches Array welches für Freguenzen bis 20 kHz erstellt wurde, kam in dem Experiment zur Anwendung. Die Ergebnisse die aus den Daten gewonnen wurden, insbesondere die der Category-1 Signale, gaben eine gute Indikation der realen Stellen der Brüche, welche während des Experimentes von Spezialisten beobachtet wurden. In Abbildung 4 wird ein Überblick der Ergebnisse geliefert.

TU Braunschweig in connection with the SFB 477 [11] and successively conducted in cooperation with the TU Braunschweig. In total 19664 signal waveforms were recorded, of whom 8304 were classified as Category-1, 9717 as Category-2 and 1643 as Category-N. The classification scheme that was used operated on the unprocessed signal waveforms. A cross-like array was used that was designed to operate at frequencies of up to 20 kHz. The results that were obtained from the data, especially the Category-1 signals, gave good indications for the direction of the cracks that were observed by specialized personnel during the experiment. In Figure 4 a synopsis of the results is provided.



Abbildung 4: In der longitudinalen Sektion der brückenähnlichen Struktur wird die Position des Arrays angezeigt (oben). Links unten wird die Anzahl der aufgezeichneten Signale in Relation zur Experimentzeit angezeigt, die Erhöhung der Laststufe lässt sich durch die abrupten Sprünge erkennen. Rechts unten sind die Schätzungen der Bruchrichtungen zu erkennen, wie sie für die verschiedenen Signalkategorien gefunden wurden. (Abbildung aus [4] übernommen).
Figure 4: The position of the array is displayed on the longitudinal section of the bridge like structure (top). On the left bottom side the number of recorded events per experiment time is displayed. Every time the load was raised there was an abrupt rise of signals that triggered a record. The right bottom picture depicts the estimated directions of the cracks as they were found for the different signal categories. (Picture adopted from [4]).

### Literatur / References

- [1] *Kerstin Joenssen (AP), Ulrich Meyer (ddp):* "Eishalle eingestürzt verzweifelte Suche nach Verschütteten" ("Ice rink arena collapsed despaired search for the trapped people"), http://www.spiegel.de/panorama/0,1518,393227,00.html, Zugriff/Access: 16.8.2007.
- [2] keine Referenz zu den Autoren bereitgestellt, (no reference to the authors provided) jdl/als/AFP/dpa: "Mississippi-Brücke stürzt ein - viele Tote und Verletzte" ("Missisipi bridge col lapsed – many dead and injured"), http://www.spiegel.de/panorama/0,1518,497735,00.html, Zugriff/Access: 16.8.2007.
- [3] C. Grosse, M. Krüger, P. Chatzichrisafis: Acoustic emission techniques using wireless sensor networks, Proc. International Conference "Sustainable Bridges – Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives", Wrocław, Poland, October 10-11, 2007 (in print)
- [4] M. Krüger, P. Chatzichrisafis, C. Grosse: "Data Analysis and Reduction Methodologies for Wireless Sensor Networks", Doc. No.: WP5-18-T-070714-F-Algorithms for data reduction, data analysis and diagnostics (Part B), 14.07.2007. (To be published under http://www.sustainablebridges.net/)
- [5] C. Grosse, M. Krüger: Structural health monitoring in civil engineering applications using wireless sensor networks, Proc. Conf. Emerging Technologies in Non-Destructive Testing (ETECH), Stuttgart, April 2007
- [6] C. Grosse, S.D. Glaser, M. Krüger: Wireless acoustic emission sensor networks for structural health monitoring in civil engineering, Proc. European Conf. on Non-Destructive Testing (ECNDT), DGZfP BB-103-CD, Berlin, Sept. 2006, Tu.1.7.3, pp 1-8.
- [7] C. Grosse, M. Schmidt, G. Bahr : "SE-Experimente-Monitoring-Rampe 03 -05", Technischer Bericht IWB, 12.07.2006.
- [8] Johnson, D., Dudgeon, D.: "Array Signal Processing", Prentice Hall Signal Processing Series, 1993, ISBN: 0-13-048513-6.
- [9] Pridham R., Mucci R.: "Digital Interpolation Beamforming for Lowpass and Bandpass Signals", Proceedings of the IEEE, vol. 67, no. 6, June 1979.
- [10] Strintzis, M.: "Pattern Recognition" (in Greek), Kyriakidis Bros. Publishing, 1999, ISBN: 960-343-290-3.
- [11] Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, SFB477: "Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung" http://www.sfb477.tu-bs.de/

## EINFLUSS DER BETONFEUCHTE AUF DAS TRAGVERHALTEN VON VERBUNDDÜBELN (EPOXIDHARZ-SYSTEM) INFLUENCE OF THE CONCRETE HUMIDITY ON THE LOAD BEARING BEHAVIOR OF BONDED ANCHORS (EPOXY RESIN SYSTEM)

von/by Lubor Bezecný

#### Einleitung

Verbunddübel werden in der nachträglichen Montage verwendet. Sie bestehen aus einer Gewindestange, die im Bohrloch mittels eines Reaktionsharzes verklebt wird.

Die Zulassungsversuche für diese chemischen Befestigungen erfolgen weltweit in vielen Prüflabors. Um repräsentative und reproduzierbare Ergebnisse der einzelnen Prüfstellen zu gewährleisten, sind heute bereits einige qualitative Anforderungen an den Verankerungsgrund (Beton) definiert. Diese Anforderungen sind in der Leitlinie für Europäische Technische Zulassungen (ETAG 001, [1]) zusammengefasst und beinhalten z.B. folgende Parameter: Betonfestigkeit, w/z-Wert, Zuschlageigenschaften, Sieblinie, Zementart und -gehalt und Herstellung der Betonprüfkörper.

Da trotz dieser Leitlinie in den verschiedenen Laboratorien unterschiedliche Versuchsergebnisse erzielt wurden, müssen nach ETAG 001 Zulassungsversuche mit chemischen Befestigungen in mehreren Betonchargen durchgeführt werden. Um diese aufwendigen Prüfungen zu vermeiden, ist es erforderlich, ETAG-Anforderungen an Betonprüfkördie per so zu ergänzen, dass Prüfungen in Betonen von unterschiedlichen Betonherstellern als Ergebnis das gleiche Tragverhalten von Verbunddübeln gewährleisten.

#### Voruntersuchungen

Die am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart im Jahr 2001 durchgeführten Untersuchungen mit dem Injektionsdübel 3 (Epoxidharz) in Betonen aus Deutschland, England, Finnland, Frankreich, Holland und USA haben eine hohe Streuung der Ausziehlasten (Verhältnis von maximaler mittlerer Höchstlast zu kleinster mittlerer Höchstlast) von 1,3 ergeben (Bild 4). Nach einer Wiederholung dieser Versuche in denselben Betonkörpern nach 3.5 Jahren haben sich die Höchstlasten der verschiedenen Betone nur noch relativ wenig unterschieden [2]. Auch in den Versagensmechanismen war kein Unterschied mehr zu sehen. Der Verbund kann entweder zwischen der Gewindestange und Mörtel, oder zwischen Mörtel und Beton versagen. Bei den wiederholten Versuchen handelte es sich ausschließlich um Versagen in der Fuge Gewindestange/Mörtel, was auf einen sehr guten Verbund mit dem Beton hindeutete.

Es wurde vermutet, dass die bereits ausgeglichene und sehr niedrige Betonfeuchte die Ursache der Versuchsunterschiede im Jahr 2001 war. Um dies zu überprüfen wurden weitere Versuche durchgeführt.

## Randbedingungen der durchgeführten Versuche

Alle neuen experimentellen Untersuchungen wurden mit dem Injektionsdübel 3 (Epoxidharz) durchgeführt. Die Dübel wurden als Einzeldübel in der Fläche in ungerissenen niederfesten Betonplatten geprüft. Die Betone stammten aus Deutschland und Frankreich. Die Bohrlochreinigung wurde nach Herstellerangaben (3x Bürsten, 3x Ausblasen mit Handblasvorrichtung) oder eine sehr gute sog. Superreinigung (mehrmaliges Ausblasen mit Druckluft und maschinellbetriebene Stahlbürste) durchgeführt.

Die Versuchsdurchführung erfolgte nach

ETAG-Vorgaben. Die Löcher wurden im Hammerbohrverfahren erstellt. Die Einbindetiefe betrug 60 mm. Bei den Versuchen wurde die aktuelle Betonfeuchte gemessen.

Im französischen Beton wurden zusätzlich Versuche im nassen Ankergrund durchgeführt. Der Beton wurde dabei gemäß E-TAG 5.1.2.1(b) vor dem Bohren mit Wasser gesättigt.

#### Einfluss der Betonfeuchte

Bisherige Ergebnisse haben auf einen Einfluss der Betonfeuchte auf die Höchstlasten beim Injektionsdübel 3 hingedeutet. Die Betonfeuchte wird durch das Restwasser im Betongefüge gebildet und ändert sich mit dem Alter des Betons, der durch Wasserverdunstung und fortschreitende Hydratation seine Restfeuchte kontinuierlich verliert. Dieser Vorgang verlangsamt sich mit der Zeit.

Neue Versuche im unterschiedlich feuchten deutschen Beton haben den Einfluss der Betonfeuchte bei dem Injektionsdübel 3 (Epoxidharz) bestätigt. Mit wachsender Betonfeuchte sinken die Höchstlasten (Bild 1).

Die Versuchskörper nD1, D2 und CM stammten aus einem Betonwerk (Rau Ebhausen). Es wurden die gleichen Rohstoffe und die gleiche Betonrezeptur verwendet.



**Bild 1** Höchstlasten der Ausziehversuche mit Injektionsdübel 3 (Epoxidharz) bei unterschiedlicher Betonfeuchte,  $h_{ef} = 60$  mm, Reinigung nach Herstellerangaben

Das Injektionssystem 3 (Epoxidharz) hat ein sehr gutes Eindringvermögen in trockenem Beton, wie bereits im Rahmen dieses Projekts in zahlreichen mikroskopischen Untersuchungen [3] nachgewiesen wurde.





**Bild 2** Injektionssystem 3 (Epoxidharz) mit Fluoreszenzmittel, reduzierte Bohrlochreinigung, Betonalter 5 Monate

Gleiche Stelle des Verbundes (oben normal, unten fluoreszierend).

Der Mörtel dringt auch durch eine Staubschicht bis in den umliegenden Beton ein (Bild 2), härtet gut aus und verfestigt dabei die penetrierte Zone. Sind die Betonporen jedoch mit Wasser gefüllt, wird vermutlich das Eindringen des Mörtels behindert und gleichzeitig das sonst sehr gute Adhäsionsvermögen vermindert (Einfluss der Wassertrennschicht). Nach [4] hängt die Qualität der FestigkeitseiDiese Einflüsse können sich dann negativ auf das Tragverhalten auswirken und gegenüber Beton geringer Feuchte zu einem Abfall der maximal übertragenen Last führen.

Auch der Versagensmechanismus ändert sich mit zunehmender Betonfeuchte. Der Anteil des Versagens in der Fuge zwischen Beton und Mörtel erhöht sich dabei. Dies ist eine Konsequenz der niedrigeren Qualität des Verbundes zwischen Mörtel und Beton im feuchten Beton.

Wenn man alle Versuche, die mit derselben Reinigung durchgeführt wurden, in einem Diagramm aufträgt (Bild 3), wird sichtbar, dass die Höchstlasten bei einer Betonfeuchte ≤ 5,5% in einem Bereich von ca. 80 kN liegen. Erst mit einer höheren Betonfeuchte kommt es zu einem Abfall der Höchstlasten.



**Bild 3** Höchstlasten der Ausziehversuche mit Injektionsdübel 3 (Epoxidharz) bei unterschiedlicher Betonfeuchte,  $h_{ef} = 60 \text{ mm}$ 

Ganz rechts im Bild 3 (graue Punkte) sind die Ergebnisse der erwähnten im 2001 durchgeführten Versuche in Betonen unterschiedlicher Herkunft (EU und USA) aufgetragen. Die Betonfeuchte dieser Versuchsbetone ist unbekannt. Das Streuband der Höchstlasten stimmt aber mit dem der nachträglich erfolgten Versuche überein.

Ein detaillierter Überblick der Versuche aus dem Jahr 2001 ist Bild 4 zu entnehmen. Es ist

zu erkennen, dass nur die Höchstlasten, die in Betonen aus Finnland und Holland gemessen wurden, von dem "normalen" Wert (ca. 80 kN) abweichen. Der Beton aus Holland (w/z-Wert = 0,6) war bis zur Versuchsdurchführung in einer Schalung dicht abgeschlossen, und hatte somit wahrscheinlich trotz eines Alters von 113 Tagen zum Zeitpunkt der Versuche eine relativ hohe Betonfeuchte wahrscheinlich. Der Beton aus Finnland hatte einen relativ hohen w/z-Wert von 0,7. Er war zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung noch jung (29 Tage), und die Nachbehandlung wurde laut Herstellerangaben sehr intensiv durchgeführt. Daher lag hier vermutlich ein hoher Anteil an Restwasser und damit eine relativ hohe Betonfeuchtigkeit vor.

Man kann also davon ausgehen, dass diese beiden Versuchsbetone die ,kritische Höhe der Betonfeuchte' zum Versuchszeitpunkt überschritten hatten.



**Bild 4:** Höchstlasten der Ausziehversuche aus dem Jahr 2001 mit Injektionsdübel 3 (Epoxidharz) in Betonen unterschiedlicher Herkunft,  $h_{ef} = 60 \text{ mm}$ , vorgeschriebene Bohrlochreinigung

Auch die Versagensmechanismen bestätigen eine schlechtere Qualität des Verbundes zwischen Mörtel und Beton in diesen beiden Betonen.

Weitere Versuche wurden mit einer sog. Superreinigung (mehrmaliges maschinelles Bürsten und Druckluft-Reinigung) durchgeführt. Dadurch sollte der Bohrstaub möglichst vollständig aus dem Bohrloch entfernt werden, um den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Höchstlasten noch besser zu verdeutlichen.

Die Ergebnisse sind dem Bild 5 zu entnehmen. Im deutschen Beton (nD1, D2) kommt es mit steigender Betonfeuchte zur Abnahme der übertragbaren Last. Im französischen "feuchten" Beton beträgt die mittlere Höchstlast bei etwa gleicher Betonfeuchte wie im deutschen Beton (f = 7,0%) ca. 78 kN. Erst bei Versuchen im nassen französischen Beton (Behandlung des Betons nach ETAG 001 Teil 5: 5.1.2.1(b), d.h. Beton vor Bohrlocherstellen mit Wasser gesättigt) sinkt die mittlere Bruchlast auf N<sub>u</sub> = 60 kN ab.

Die unterschiedlichen Höchstlasten im deutschen und französischen Beton bei etwa gleicher Betonfeuchte sind vermutlich auf die unterschiedliche Porosität und somit unterschiedlicher Sättigungsgrad der Poren mit Wasser zurückzuführen. Detaillierte Untersuchungen dazu laufen noch.

Bei gleichem Beton steigt mit ansteigender Betonfeuchte der Anteil des Versagens zwischen Mörtel und Beton an. Dies deutet auf eine Abnahme der Verbundqualität Mörtel/Beton hin. Es kommt zur Abnahme der übertragbaren Last.



**Bild 5** Höchstlasten der Ausziehversuche mit Injektionsdübel 3 (Epoxidharz) bei unterschiedlicher Betonfeuchte, Super- Bohrlochreinigung,  $h_{ef} = 60$ mm

Die in den Versuchen verwendeten Betone wiesen unterschiedliche Betondruckfestigkeiten auf.

Der Einfluss der Betondruckfestigkeit auf die

Höchstlasten wurde vernachlässigt, d.h. die Höchstlasten wurden nicht auf eine einheitliche Betondruckfestigkeit umgerechnet. Die bisherigen Auswertungen ergaben keine eindeutige Abhängigkeit der Höchstlasten von der Betondruckfestigkeit.

#### Zusammenfassung

Die Tragfähigkeit eines Verbunddübels im Beton hängt von vielen Faktoren ab. Sehr viele davon sind bereits in ETAG 001 berücksichtigt und geregelt. Im Rahmen dieses Projekts wurde festgestellt, dass die Anforderungen an die Prüfbetone und an die Durchführung der Versuche ergänzt werden sollten um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

Der Injektionsdübel 3 (Epoxidharz) ist empfindlich auf das im Beton vorhandene Restwasser. Mit steigender Betonfeuchte sinkt die Höchstlast ab. Dies ist durch den Verbundmechanismus zu erklären. Der Injektionsmörtel 3 dringt in den bohrlochumgebenden Beton ein und verfestigt ihn. Weiterhin weist er eine sehr gute Adhäsion an der Bohrlochwandung auf. Bei einem hohen Feuchtigkeitsgehalt wird das Eindringen des Mörtels wahrscheinlich behindert, weil die Poren mit Wasser gefüllt sind. Weiterhin wird vermutlich die Adhäsion zwischen Mörtel und Bohrlochwand durch Wasser auf der Bohrlochwand, das als Trennschicht wirkt, reduziert. Ein Epoxidharz kann nach [4] auch eine Reaktion oder eine Vermengung mit dem Wasser eingehen.

Wasser bewirkt eine Reduktion der Verbundfestigkeit zwischen Mörtel und Beton und damit eine Zunahme des Versagens in dieser Fuge. Die Betonfeuchte ist ein Parameter, der bisher in den Vorschriften der ETAG 001 nicht ausreichend berücksichtigt wird. Daher können die in diesem Kapitel beschriebene Streuungen auch bei Zulassungsversuchen auftreten.

In erster Linie müssen die Vorgaben in ETAG 001 streng eingehalten werden. Im Rahmen dieses Projekts wurden zahlreiche Abweichungen festgestellt.

Die in ETAG 001 enthaltenen Anforderungen an Prüfbetone sollten erweitert werden um reproduzierbare Ergebnisse zu erreichen:

• Der w/z-Wert des niederfesten Betons ist enger zu begrenzen. Somit wird die Menge des Restwassers weniger streuen.

• Die Nachbehandlung des Betons ist eindeutiger zu beschreiben und sollte über mehrere Tage erfolgen. Danach sollten die Betonkörper ausgeschalt und so gelagert werden, dass sie allseitig austrocknen können.

• Derzeit beträgt das Mindestalter des Betons beim Versuch 21 Tage. Bei diesem Betonalter kann der Beton (insbesondere der niederfeste Beton) noch eine relativ hohe Betonfeuchte aufweisen. Mit zunehmendem Betonalter trocknet der Beton aus, wobei die Geschwindigkeit des Austrocknens von vielen Parametern abhängt (Betonporosität, Temperatur und Feuchte der umgebenden Luft, Lagerungsart). Es wird empfohlen Versuche mit Verbunddübeln erst in einem Betonalter von mindestens 6 Wochen durchzuführen.

#### Literaturverzeichnis

- [1] European Organisation for Technical Approvals (EOTA): ETAG 001, Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for use in Concrete (1997, Amended November 2006).
   Part 1: Anchors in General, Part 5: Bonded Anchors, Annex A, EOTA Brussels
- [2] Bezecný, L.: Einfluss des Betons auf das Tragverhalten von Verbunddübeln, Zusammenfassung der Forschungsergebnisse aus dem Jahr 2005 -, Bericht Nr.: 06/01-2/70 (Forschungskooperation fischerwerke/Hilti/Würth), nicht veröffentlicht, Institut für Werkstoffe im Bauwesen; Universität Stuttgart, 2006
- [3] Bezecný, L.: Einfluss des Betons auf das Tragverhalten von Verbunddübeln, 2. Zwischenbericht -, Bericht Nr.: 02/12-2/45 (Forschungskooperation fischerwerke/Hilti/Würth), nicht veröffentlicht, Institut für Werkstoffe im Bauwesen; Universität Stuttgart, 2002
- [4] Eßer, A.: Füllen von Rissen und Hohlräumen in Betonbauteilen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 527, Beuth Verlag GmbH 2006

## DÜBEL UNTER ZUGLAST IN LEICHT- UND NORMALBETON FASTENINGS UNDER TENSION LOAD IN LIGHTWEIGHT AND NORMALWEIGHT CONCRETE

von/by Rolf Eligehausen, Werner Fuchs, Anke Wildermuth

#### Summary

Due to its benefits e.g. less need for steel reinforcement, better fire resistance and improved insulation characteristics lightweight concrete has brought an increased use in concrete structures. However, the suitability of lightweight concrete as base material for fastener systems used in modern fastening technology has not been systematically investigated up to now. In order to investigate the load-bearing behavior of post-installed fasteners, different mechanical and chemical fastening systems were tested in uncracked lightweight concrete and the results compared to normal weight concrete. This paper presents the test results and a first proposal to predict the load capacity of fasteners installed in lightweight concrete.

#### Zusammenfassung

Aufgrund einiger vorteilhafter Eigenschaften wie die Reduzierung der Bewehrung, hohe Feuerwiderstandsdauer und ein niedriger Wärmedurchlasskoeffizient kam Leichtbeton in den letzten Jahren vermehrt zur Anwendung. Bisher jedoch wurde die Funktionalität von Leichtbeton als Ankergrund für moderne Befestigungssysteme noch nicht systematisch untersucht. Daher wurde mit verschiedenen, nachträglich montierten Befestigungen, sowohl mechanische als auch chemische, Versuche durchgeführt, um das Tragverhalten in ungerissenem Leichtbeton zu untersuchen und die Ergebnisse mit denen in Normalbeton verglichen. In diesem Bericht werden die Versuchsergebnisse dargestellt und ein erster Ansatz zur Berücksichtigung des Faktors Leichtbeton in der Tragfähigkeit.

In ACI 318-D, D3.4. wird angenommen, dass die Tragfähigkeit von in Leichtbeton montierten, mechanischen Dübeln 78% von in Normalbeton montierten Dübeln für *all-lightweight* und 85% für *sand-lightweight* Beton beträgt. Diese Werte gelten unabhängig von der Lastrichtung, vom Zustand des Betons, von der Anzahl der befestigten Dübel und vom Randabstand.

2005 diskutierten der Verband CAMA und das Komitee ACI 318 über das Tragverhalten von Befestigungen in Leichtbeton. Aufgrund der Entwicklungen in der Befestigungstechnik in den letzten Jahren wurde vermutet, dass die Werte auf der unsicheren Seite liegen. Um die Richtigkeit der Faktoren im ACI, das Tragverhalten der Dübel sowie die Ergebnisse auf Produktabhängigkeit hin zu untersuchen, wurde ein Versuchsprogramm aufgestellt. Es wurden zentrische Zugversuche mit Einzelbefestigungen der Größe M12 ohne Randeinfluss in ungerissenem, hoch- und niederfestem Leicht- und Normalbeton durchgeführt.

Tabelle 1 zeigt das Versuchsprogramm sowie die getesteten Dübelsysteme.

#### Versuchsprogramm

Tabelle 2 zeigt die Zusammensetzung der Leichtbetone, Tabelle 3 die der Normalbetone. Die Dichte des niederfesten Leichtbetons lag bei 1,55t/m<sup>3</sup>, die des hochfesten bei 2,10t/m<sup>3</sup>. Die Betonfestigkeit wurde an Würfeln mit einer Seitenlänge von 150mm gemessen. Details können [2] entnommen werden.

#### Tabelle 1: Versuchsprogramm

|           |                          | Ab-       | h <sub>ef</sub> | Versuchsanzahl |                   |         |                   |  |
|-----------|--------------------------|-----------|-----------------|----------------|-------------------|---------|-------------------|--|
|           | Typ, Größe M12           | stützung  | [mm]            | LC12/13        | C20/25            | LC50/55 | C50/60            |  |
| Ч         | Verbunddübel (epoxy)     | eng+ weit | 80              | 5+5            | 5+5               | 5+5     | 5+3               |  |
| chemiscl  | Verbunddübel (hybrid)    | eng+ weit | 80              | 5+5            | 2+5 <sup>1)</sup> | 5+5     | 5+5 <sup>1)</sup> |  |
|           | Verbunddübel (polyester) | eng+ weit | 110             | 5+5            | 5+5               | 3+4     | 3+5               |  |
|           | Verbundspreizdübel       | weit      | 80              | 5              | 3                 | 5       | 5                 |  |
| echanisch | Spreizdübel (Hülsentyp)  | weit      | 70              | 5              | 5                 | 6       | 5                 |  |
|           | Spreizdübel (Bolzentyp)  | weit      | 80              | 5              | 6                 | 5       | 5                 |  |
|           | Einschlagdübel           | weit      | 50              | 7              | 3                 | 5       | 3                 |  |
|           | Hinterschnittdübel       | weit      | 80              | 5              | 3                 | 5       | 3                 |  |
| ű         | Betonschraube            | weit      | 50              | 5              | 5                 | 5       | 5                 |  |

Tabelle 2: Zusammensetzung des Leichtbetons

| LC 12/13        |      | Platte 1-3 | LC 50/55     |      | Platte 4-6            |
|-----------------|------|------------|--------------|------|-----------------------|
| Fibo exclay 4/8 | 250  | [kg/m³]    | Liapor F8    | 367  | [kg/m³]               |
|                 |      |            | Kies 8/16    | 505  | [kg/m³]               |
| Sand 0/2        | 807  | [kg/m³]    | Sand 0/2     | 515  | [kg/m³]               |
| CEM I 42,5      | 350  | [kg/m³]    | CEM I 42,5   | 480  | [kg/m³]               |
|                 |      |            | Flugasche    | 30   | [kg/m³]               |
|                 |      |            | Superflow 40 | 1,0  | [ltr/m <sup>3</sup> ] |
| Wasser          | 124  | [kg/m³]    | Wasser       | 115  | [kg/m³]               |
| w/z-Wert        | 0,54 | [-]        | w/z-Wert     | 0,30 | [-]                   |

Tabelle 3: Zusammensetzung des Normalbetons

| *                   | f                    | Zemer       |                               | Zuschla                       | Wasser                        |                               |                               |            |
|---------------------|----------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------|
| Platte <sup>5</sup> | [N/mm <sup>2</sup> ] | Тур<br>[-]  | Menge<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 0-2mm<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 2-8mm<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 8-16mm<br>[kgm <sup>3</sup> ] | Menge<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | w/z<br>[-] |
| 1ls                 | C20/25               | CEM I 32,5R | 239,3                         | 770,6                         | 501,0                         | 739,0                         | 169,4                         | 0,71       |
| 2ls                 | C20/25               | CEM I 32,5R | 239,8                         | 765,1                         | 500,0                         | 740,4                         | 165,2                         | 0,68       |
| 3ls                 | C20/25               | CEM I 32,5R | 239,4                         | 766,1                         | 498,3                         | 743,9                         | 182,2                         | 0,76       |
| 4ls                 | C20/25               | CEM I 32,5R | 239,6                         | 766,2                         | 501,5                         | 736,4                         | 145,1                         | 0,61       |
| 1hs + 2hs           | C40/45               | CEM I 42,5R | 365,0                         | 625,0                         | 410,0                         | 605,0                         | 115,0                         | 0,41       |

\*) Is= niederfester Beton, ns= hochfester Beton

Alle untersuchten Befestigungsmittel hatten eine europäische oder deutsche Zulassung und wurden nach den Angaben des Herstellers gesetzt. Bei den Versuchen mit Verbunddübeln wurde sowohl mit enger als auch mit weiter Abstützung (Bild 1) getestet, bei den mechanischen Dübeln nur mit weiter Abstützung. Die Versuche wurden nach [3] durchgeführt.

#### Versuchergebnisse

Die Tabellen 4 und 5 zeigen die Ergebnisse der verschiedenen Dübelarten in niederfestem und hochfestem Beton. Da die Ergebnisse z. T. auf unterschiedlicher effektiver Verankerungslänge und Betonfestigkeit basieren, wurden diese normiert, um eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Bei unterschiedlicher Verankerungslänge wurde die Maximallast bei weiter Abstützung mit dem Faktor  $(h_{ef,lw}/h_{ef,nw})^{1,5}$  und bei enger Abstützung mit  $(h_{ef,lw}/h_{ef,nw})$  angepasst. Bei unterschiedlichen Betonfestigkeiten erfolgte die Normalisierung mit dem Faktor  $(f_{cc,lw}/f_{cc,nw})^{0,5}$  bei Betonversagen und mit  $(f_{cc,lw}/f_{cc,nw})^{0,5}$  bei Herausziehen.

Die Bilder 2 und 3 zeigen typische Last-Verschiebungs-Kurven von Verbunddübeln (Epoxy, weite Abstützung) und mechanischen Dübeln. Der Verbunddübel versagt in beiden Betonarten durch Betonausbruch. Die Anfangssteifigkeit ist dabei dieselbe. Dies gilt auch für den Spreizdübel, der im Leichtbeton jedoch die Versagensart wechselt und herausgezogen wird.

Typische Versagensarten der Versuche werden in den Bildern 4 und 5 gezeigt. Auf Bild 4 ist der in enger Abstützung herausgezogene Epoxydübel zu sehen. Im Leichtbeton versagte der Dübel zwischen Mörtel und Bohrlochwandung. Bild 5 zeigt einen typischen Betonausbruch in Leichtbeton (weite Abstützung). Anders als im Normalbeton laufen die Risse im Leichtbeton auch durch die Zuschläge.

Die Streuung der Versuche wird ausführlich in [2] diskutiert. Es folgt eine kurze Zusammenfassung:

In niederfestem Beton sind die Variationskoeffizienten bei Verbunddübeln in Leichtbeton mit v=0,2% bis 5,1% leicht kleiner verglichen mit denen in Normalbeton. Bei den mechanischen Dübeln ist die Streuung in Leichtbeton bedeutend höher (v=13%) als im Normalbeton (v=1,6% bis 11,7%).

In hochfestem Beton sind die Werte für alle Systeme in Leichtbeton viel höher als in Normalbeton: Verbunddübel v=4,7%-15,6% zu v=1,5%-9,7% in Normalbeton und mechanische Dübel v=7,2%-13,6% zu v=2,0%-5,4% in Normalbeton.

Die Streuung in den Tests macht deutlich, dass die Zuschläge, die in der Nähe der Lasteinleitungsfläche liegen, die Tragfähigkeit und die Versagensart der Befestigungsmittel stark beeinflussen (siehe Bilder 4 und 5).

#### Bewertung der Versuchsergebnisse

#### Chemische Dübel

Die Verhältnisse der mittleren Maximallasten in Leicht- zu denen in Normalbeton werden in Bild 6 und 7 verglichen. Die Tragfähigkeit der Verbunddübel in Leichtbeton mit weiter Abstützung liegt bei 60-64% der Werte in Normalbeton. Dieses produktunabhängige Verhalten kommt daher, dass die Maximallast durch Betonausbruch bestimmt wird. In Versuchen mit enger Abstützung, bei denen die Verbundfestigkeit maßgebend ist und Herausziehen auftritt, variieren die Verhältnisse je nach Mörtelart.

In hochfestem Beton ändert sich die Versagensart der chemischen Dübel von vorwiegend Betonausbruch (weite Abstützung) in Normalbeton zu Herausziehen mit leichtem Betonausbruch in Leichtbeton. Die Verhältnisse bei weiter Abstützung von Polvester und Epoxy liegen bei etwa 57%. Das Hybridsystem kommt auf einen Wert von 87%. Bei enger Abstützung liegen die Werte zwischen 58% und 72% (Stahlversagen). Der Verbundspreizdübel zeigt mit seinen 91% fast keine Abminderung.

Die durchgeführten Versuchen mit Verbunddübeln verdeutlichen, dass in den meisten Fällen, v.a. in niederfestem Beton die reduzierte Tragfähigkeit nach ACI318, App. D nicht erreicht wird.

#### Mechanische Dübel

Bild 8 zeigt die Verhältnisse der Maximallasten der mechanischen Dübel. Festzuhalten ist, dass alle mechanischen Dübel in nieder- und hochfestem Leichtbeton funktionieren. Selbst der Spreizdübel (Hülsentyp), dessen Maximallast stark reduziert wird, zeigt in der Lastverschiebungs-Kurve keine Auffälligkeiten (Bild 3). Es wird jedoch vermutet, dass das Verhalten konstruktionsabhängig ist.

Die Ergebnisse verdeutlichen die Abhängigkeit der Spreizdübel vom Funktionsprinzip und der Härte der Leichtbetonzuschläge im Lasteinleitungsbereich. Der Einschlaganker verhält sich in Leichtbeton leicht besser ( $F_{u,lw}/F_{u,nw}$ =47%) als der Bolzendübel (41%) und dieser wiederum viel besser als der Hülsendübel (25%). Das Verhältnis der getesteten Hinterschnittdübel beträgt 50%, das der Betonschrauben 46%.

In hochfestem Beton (Bild 8b) konnte nur bei den Betonschrauben (47%) ein direkter Vergleich angestellt werden, da die anderen Dübel Stahlversagen zeigten. Die Werte in Klammer stellen somit die untere Grenze der Verhältnisse dar. Die merklich höheren Verhältniswerte in hochfestem Beton können mit einer geringeren Porosität und größeren Härte der Zuschläge erklärt werden.



Bild 1: Versuchsaufbau bei enger (a) und weiter Abstützung (b)



Bild 2: Last-Verschiebungs-Kurve des Verbunddübels (Epoxy) bei weiter Abstützung



Bild 3: Last-Verschiebungs-Kurve des Hülsendübels



a) Leichtbeton b) Normalbeton Bild 4: *Versagensarten des Verbunddübels (Epoxy) bei enger Abstützung* 



Bild 5: Betonausbruch des Verbunddübels (Epoxy) in Leichtbeton, weite Abstützung

|  |            | f <sub>c,200</sub> [N/mm²] |       | Leichtbeton         |                                    | Normalbeton         |  | normalisiert? | Max.last              | Verhältnis |  |
|--|------------|----------------------------|-------|---------------------|------------------------------------|---------------------|--|---------------|-----------------------|------------|--|
|  | Abstützung | LB                         | NB    | N <sub>u</sub> [kN] | last                               | N <sub>u</sub> [kN] | last                                     | *)            | N <sub>u,normal</sub> | 5 / 7      |  |
| anchor type                            | 1          | 2                          | 3     | 5                   |                                    | 6                   |  |               | 7                     | 8          |  |
| Verbunddübel<br>(Epoxyd)               | weit       | 21,47                      | 27,55 | 29,79               | 5 x C                              | 51,86               | 5 x C                                    | +             | 48,12                 | 0,62       |  |
|  | eng        | 21,47                      | 27,55 | 49,39               | 5 x P <sub>M</sub>                 | 99,67               | 5 x P <sub>o</sub>                       | -             | 99,67                 | 0,50       |  |
| Verbunddübel <sup>1)</sup><br>(Hybrid) | weit       | 21,56                      | 27,1  | 25,88               | 5 x C                              | 43,19               | 2 x C                                    | +             | 40,33                 | 0,64       |  |
|  | eng        | 21,56                      | 27,1  | 37,13               | 5 x P <sub>M</sub>                 | 66,66               | 4 x P <sub>o</sub><br>1 x P <sub>M</sub> | -             | 66,66                 | 0,56       |  |
| Verbunddübel<br>(Polyester)            | weit       | 22,44                      | 32,85 | 36,22               | 1 x C<br>4 x P <sub>o</sub> /C     | 67,98               | 5 x P <sub>o/M</sub> /C                  | +             | 60,64                 | 0,60       |  |
|  | eng        | 22,44                      | 32,85 | 49,99               | 4 x P <sub>o</sub> /P <sub>M</sub> | 107,18              | 5 x P <sub>o</sub>                       | -             | 107,18                | 0,47       |  |
| Verbundspreizdübel                     | weit       | 21,99                      | 29,65 | 28,91               | 5 x P <sub>o</sub>                 | 58,90               | 3 x P <sub>o</sub>                       | -             | 58,90                 | 0,49       |  |
| wegkontr. Spreizdübel                  | weit       | 21,99                      | 29,65 | 14,85               | 3 x P <sub>o</sub> /C<br>4 x C     | 34,61               | 3 x C                                    | +             | 31,64                 | 0,47       |  |
| Spreizdübel<br>(Hülsentyp)             | weit       | 21,47                      | 25,25 | 20,63               | 5 x P <sub>o</sub> /C              | 53,35               | 6 x P <sub>o</sub> /C                    | +             | 50,82                 | 0,41       |  |
| Spreizdübel<br>(Bolzentyp)             | weit       | 21,63                      | 30,97 | 10,13               | 5 x P <sub>s</sub>                 | 41,24               | 5 x P <sub>s</sub><br>1 x C              | -             | 41,24                 | 0,25       |  |
| Hinterschnittdübel                     | weit       | 21,71                      | 31,21 | 26,08               | 5 x P/C                            | 58,04               | 3 x C                                    | +             | 52,05                 | 0,50       |  |
| Betonschraube                          | weit       | 21,47                      | 30,97 | 17,11               | 5 x P/C                            | 41,10               | 5 x C                                    | +             | 36,82                 | 0,46       |  |

Tabelle 4: Normierte Versuchsergebnisse in niederfestem Beton - Übersicht

N<sub>u</sub> = Maximallast, C = Betonausbruch, P<sub>o</sub> = Herausziehen ohne Mörtel, P<sub>M</sub> = Herausziehen mit Mörtel, P<sub>S</sub> = Durchziehen

Tabelle 5: Normierte Versuchsergebnisse in hochfestem Beton - Übersicht

|  |            | f <sub>cc 200</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] |       | Leichtbeton         |  | Normalbeton         |  | normalisiert? | normal.<br>Max.last   | Verhältnis |
|--|------------|--|-------|---------------------|--|---------------------|--|---------------|-----------------------|------------|
|  | Abstützung | LB                                       | NB    | N <sub>u</sub> [kN] | Versagens-<br>last                                       | N <sub>u</sub> [kN] | Versagens-<br>last   |               | N <sub>u.normal</sub> | 5/7        |
| anchor type                            |            | (2)                                      | (3)   | (5)                 |  | 6)                  |  |               | Ø                     | 8          |
| Verbunddübel<br>(Epoxyd)               | w eit      | 62,79                                    | 61,28 | 46,24               | 5 x P <sub>M</sub> /C                                    | 79,89               | 3 x P <sub>M</sub> /C<br>2 x P <sub>o</sub> /P <sub>M</sub> /C       | +             | 80,48                 | 0,57       |
|  | eng        | 62,79                                    | 61,28 | 76,73               | 3 x P <sub>o</sub> /P <sub>M</sub><br>2 x S              | 116,17              | 2 x P <sub>o</sub><br>1 x S  | -             | 116,17                | 0,66       |
| Verbunddübel <sup>1)</sup><br>(Hybrid) | w eit      | 62,95                                    | 57,6  | 35,65               | 5 x P <sub>M</sub> /C                                    | 51,76               | 5 x P <sub>M</sub> /C  | +             | 53,16                 | 0,67       |
|  | eng        | 62,95                                    | 57,6  | 49,65               | 3 x P <sub>o</sub> /P <sub>M</sub><br>2 x P <sub>o</sub> | 78,16               | 5 x P <sub>o</sub>   | -             | 78,16                 | 0,64       |
| Verbunddübel<br>(Polyester)            | w eit      | 63,70                                    | 63,1  | 51,9                | 3 x P <sub>o</sub> /P <sub>M</sub>                       | 91,97               | 3 x P <sub>o</sub> /C<br>1 x S/C<br>1xP <sub>o</sub> /P <sub>M</sub> | +             | 92,23                 | 0,56       |
|  | eng        | 63,70                                    | 63,1  | 71,81               | 3 x P <sub>o</sub>                                       | 99,76               | 3 x P <sub>o</sub><br>2 x S  | -             | 99,76                 | 0,72       |
| Verbundspreizdübel                     | w eit      | 63,70                                    | 61,28 | 65,63               | 3 x P <sub>o</sub><br>2 x P <sub>o</sub> /SP             | 72,00               | 5 x P <sub>o</sub>   | -             | 72,00                 | 0,91       |
| w egkontr. Spreizdübel                 | w eit      | 64,75                                    | 61,28 | 34,17               | 5 x C  | 41,71               | 3 x S  | +             | 41,71                 | 0,82       |
| Spreizdübel<br>(Hülsentyp)             | w eit      | 62,79                                    | 60,18 | 62,21               | 5 x P <sub>o</sub> /C                                    | 73,04               | 2 x P <sub>o</sub> /C<br>3 x S                                       | +             | 73,98                 | 0,84       |
| Spreizdübel<br>(Bolzentyp)             | w eit      | 62,95                                    | 61,28 | 45,88               | 3 x P <sub>s</sub><br>3 x S                              | 48,10               | 5 x S  | -             | 48,10                 | 0,95       |
| Hinterschnittdübel                     | w eit      | 62,95                                    | 61,28 | 67,04               | 5 x C  | 74,98               | 3 x S  | -             | 74,98                 | 0,89       |
| Betonschraube                          | w eit      | 62,79                                    | 65,74 | 40,59               | 5 x C  | 55,88               | 5 x C  | +             | 54,61                 | 0,74       |

 $N_u$  = Maximallast, C = Betonausbruch,  $P_o$  = Herausziehen ohne Mörtel,  $P_M$  = Herausziehen mit Mörtel,  $P_S$  = Durchziehen



low-strength concrete

Bild 6: Chemische Dübel – Verhältnis der Maximallasten in niederfestem Beton



Bild 7: Chemische Dübel – Verhältnis der Maximallasten in hochfestem Beton



Bild 8: Mechanische Dübel – Verhältnis der Maximallasten

#### Zusammenfassung

Alle untersuchten chemischen und mechanischen Dübel können für eine Kurzzeit-Belastung in Leicht- und Normalbeton eingesetzt werden. In Leichtbeton jedoch wurde eine beachtliche, produktabhängige Traglastreduzierung, v.a. bei den mechanischen Dübeln, gegenüber den Werten in Normalbeton festgestellt. In hochfestem Beton zeigten die mechanischen Dübel ein besseres Verhalten als die chemischen und der Abnahme der Last war kleiner als im niederfesten Beton. Dies wird auf die höhere Härte der Zuschläge in der Umgebung des Dübels zurückgeführt.

Darüber hinaus zeigen die Versuchsergebnisse deutlich, dass ein allgemeiner Abminderungsfaktor von 0,75 oder 0,85 wie in ACI 318 vorgeschlagen, selbst wenn nur ungerissener Beton betrachtet wird nicht auf der sichern Seite liegt. Als erster Schritt sollten diese Faktoren revidiert werden. Anschließend sollte ein geeignetes Versuchsprogramm und die dazugehörige Bewertungsmethode entwickelt werden, um das produktabhängige Verhalten des Dübels in gerissenem und ungerissenem Leichtbeton mit verschiedener Festigkeit zu berücksichtigen. Bis zu dieser Umsetzung sollten aufgrund der durchgeführten Pilotversuche unter Berücksichtigung der hohen Streuung der Maximallasten, der Mangel an Informationen über das Verhalten von kleinen Dübeln, über das Verhalten unter Dauerlast und über Einflüsse wie Bohrlochreinigung, Feuchtigkeit des Leichtbetons und Härte seiner Zuschläge, Abminderungsfaktoren a=0,3 für Verbunddübel, a=0,2 für Spreizdübel und a=0,4 für Hinterschnittdübel und Betonschrauben verwendet werden. Über das Verhalten von Befestigungen in gerissenem Leichtbeton liegen bisher keine Ergebnisse vor. Daher können auch keine Aussagen darüber getroffen werden, ob und inwieweit Erkenntnisse über Befestigungen in gerissenem Beton von Normal- auf Leichtbeton übertragen werden können.

#### Referenzen

- [1] ACI 318-05, App. D, "Building Codes Requirements for Structural Concrete", American Concrete Insitute, Farmington Hills, MI, 2005
- [2] Wildermuth, A. "Dübel unter Zuglast in Leicht- und Normalbeton", Bericht-Nr. 05/12-6/37 Universität Stuttgart, 2005, not published
- [3] EOTA, ETAG: "Guideline for European Technical Approval of Metal anchors for Use in Concrete", 1997

## PROBABILISTISCHE DAUERHAFTIGKEITSUNTERSUCHUNGEN AN EINEM 2-SCHICHT-INSTANDSETZUNGSSYSTEM FÜR STAHLBETONBAUTEILE PROBABILISTIC LIFE-CYCLE-ANALYSIS ON A 2-LAYER REPAIR SYSTEM FOR RC CONSTRUCTIONS

von/by Christian Fischer

#### Einleitung

Im Rahmen einer Auftragsforschung für die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurden probabilistische Lebensdauerbemessungen für Betone und Instandsetzungsmörtel, die den Einwirkungen der Expositionsklasse XS3 ausgesetzt sind, durchgeführt.

Hintergrund der Untersuchungen war die Schaffung einer Informationsbasis zur Überarbeitung des BAW-Merkblattes "Chlorideindringwiderstand von Beton". Der gegenwärtige Stand des Merkblatts sieht bei Instandsetzungsmaßnahmen der Betondeckung mit Verbleib einer Altbetonschicht vor, dass lediglich die neu aufgebrachte Schicht als Chloridwiderstand angesetzt wird. Die Altbetonschicht wird in den Berechnungen zum Chloridwiderstand gänzlich vernachlässigt. Untersuchungen zeigen [1], dass unter den getroffen Annahmen die Instandsetzungsschicht allein nicht in der Lage ist, eine Dauerhaftigkeit auf relativ hohem Sicherheitsniveau ( $\beta = 1,0$ ) zu gewährleisten.

Um zukünftig den wirklichen Gegebenheiten Rechnung zu tragen, bei denen auch der Altbeton einen Anteil am Widerstand gegen das Chlorideindringen leistet, ist ein Modell erstellt worden, welches ein System aus zwei Betonschichten mit jeweils eigenem effektiven Diffusionskoeffizienten ( $D_{eff,C}$ ) und Alterungsexponenten (a) beschreibt.

#### Grundlagen der Grenzzustandsberechnung

Bemessungs- bzw. Beurteilungsprobleme bei Bauwerken werden prinzipiell durch die Gegenüberstellung der Einwirkungen (S) und der Bauteilwiderstände (R) gelöst, vgl. Gleichung (1).

#### Introduction

Probabilistic life-cycle investigations on concrete and repair mortar exposed to XS3 class were carried out for the Federal Bureau of Water Constructions (BAW).

The task was based on providing information to revise the BAW-Bulletin "Chloride Resistance of Concrete". So far the bulletin advises for concrete cover repair with a remaining concrete layer to calculate the chloride resistance only based on the new repair layer. The remaining concrete layer will be entirely neglected for chloride resistance calculations. Research on this topic shows [1] that under the current assumptions the repair layer alone is not able to provide a life time on a high reliability level ( $\beta = 1.0$ ).

To allow for the real conditions in future where the remaining concrete layer takes part on resisting chloride ingress a new model is designed. This model is a system of two concrete layers each with an own effective diffusion coefficient ( $D_{eff,C}$ ) and an own age exponent (a).

#### **Basics of limit state calculations**

Design and assessment tasks of structures are solved in principal by a comparison of the imposed loads (S) and the member resistances (R), see eq. (1).

(1)

Z = R - S

- Z: Bauteilzustand / Reliability Condition
- R: Widerstand / Resistance
- S: Einwirkung / Imposed Load

Unter der Annahme, dass die Variablen R und S jeweils normalverteilt um einen Mittelwert streuen, ist der Bauteilzustand Z als Differenz der Variablen R und S eine ebenfalls normalverteilte stochastische Variable. Aus dem Mittelwert und der Standardabweichung der Variablen Z ( $\mu_z$ ,  $\sigma_z$ ), deren Berechnung nach den in Abbildung 1 dargestellten Gleichungen möglich ist, lässt sich der so genannte Zuverlässigkeitsindex  $\beta$ , vgl. Gleichung (2), bestimmen.



Abbildung 1: Bauteilwiderstand, Einwirkung, Versagenswahrscheinlichkeit und Zu- verlässigkeitsindex

 Figure 1:
 Member Resistance, Imposed Loads,

 Failure Probability and Reliability Index
 σ

Die Zuverlässigkeit wird über den so genannten Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  ausgedrückt, der mit bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeiten  $p_f$  verknüpft ist. Ein Zuverlässigkeitsindex  $\beta = 0$  ist mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von  $p_f = 50\%$ , ein Zuverlässigkeitsindex  $\beta = 1,0$  mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von rd.  $p_f = 15\%$  verknüpft.

Das oben beschriebene Vorgehen ist dann leicht in eine Bemessungsgleichung zu überführen. Die Forderung lautet:  $\beta \ge \beta_0$ , wobei  $\beta_0$ das z. B. in einer Norm vorgeschriebene Zuverlässigkeitsniveau ist.

Das dargestellte allgemeine Sicherheitskon-

With the assumption of normal distributed variables for R and S which scatter around a mean value the member state Z as the difference of the variables R and S is also a normal distributed stochastic variable. The reliability index  $\beta$ , see equation (2) can be calculated from the mean value and the standard derivation of the variable Z ( $\mu_z$ ,  $\sigma_z$ ) on the basis of the equations in Figure 1, see below.

μ: Mittelwert

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S$$

σ: Standarabweichung

$$\sigma_{z} = \sqrt{\sigma_{R}^{2} + \sigma_{S}^{2}}$$

$$p_{f} = \Phi(-\frac{\mu_{Z}}{\sigma_{z}}) = \Phi(-\beta)$$
<sup>(2)</sup>

- *p<sub>f</sub>:* Versagenswahrscheinlichkeit / failure probability
- Φ(.): Standardnormalverteilung / standard normal distribution
- β: Zuverlässigkeitsindex / reliability index
- $\mu_Z$ : Mittelwert des Bauteilzustandes Z / mean value of the member state Z
- $\sigma_Z$ : Standardabweichung des Bauteilzustandes Z / standard derivation of the member state

The reliability is presented by the so called reliability index  $\beta$  which is connected to a certain failure probability  $p_f$ . A reliability index of  $\beta = 0$  is attached to a failure probability of  $p_f = 50\%$  and a reliability index of  $\beta = 1$  is attached to a failure probability of  $p_f = 15\%$ .

The above mentioned approach is thus simply convertible to a design equation. The requirement is  $\beta \ge \beta_0$ , with  $\beta_0$  as a prescribed reliability level of e. g. a code.

The depicted general safety concept is applicable at its elementary form (consideration of two normal distributed variables R and S) only in a few cases. To solve the partly complex zept ist in seiner einfachen Form (Berücksichtigung von zwei normalverteilten Variablen R und S) nur in wenigen Fällen anwendbar. Zur Lösung der z. T. komplexen Zuverlässigkeitsprobleme sind Erweiterungen des oben beschriebenen allgemeinen Sicherheitskonzeptes nötig. Diese Erweiterungen betreffen den Übergang von zwei Variablen auf viele Variablen, von linearen auf nichtlineare Grenzzustandsfunktionen und von normalverteilten Variablen auf beliebig verteilte Variablen. Es ist in diesem Zusammenhang offensichtlich, dass Erweiterungen dieser Art es nicht mehr zulassen, die Berechnungen von Hand auszuführen. Solche Berechnungen werden mit Hilfe geeigneter Computerprogramme, z.B. [2], durchgeführt.

## Berechnungsmodell und Eingangsparameter

Das Modell zum Eindringverhalten von Chloridionen in ein 2-Schicht-System aus einer Instandsetzungs- und einer Altbetonschicht basiert auf den folgenden beiden Diffusionsgleichungen [3]. reliability problems increments of the above mentioned general safety concept are necessary. These increments concern the change from two variables to various variables, from linear to nonlinear limit state functions and from normal distributed to arbitrarily distributed variables. In this content it is obvious that such increments are not longer applicable for calculations by hand. For those calculations adequate computer programs as [2] are used.

#### Calculation model and input parameters

The model describing the ingress of chloride ions into a 2-layer-system consisting of a repair layer and a remaining layer is based on the following diffusion equations [3]:

$$c_{1}(x,t) = C_{S,\Delta x} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^{n} \left\{ erfc \frac{(2n+1)d_{c,neu} + x}{2\sqrt{D_{eff,1} \cdot t}} - \alpha \cdot erfc \frac{(2n+1)d_{c,neu} - x}{2\sqrt{D_{eff,1} \cdot t}} \right\}$$
(3)

$$c_{2}(x,t) = \frac{2k \cdot C_{S,\Delta x}}{k+1} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^{n} \cdot \operatorname{erfc} \cdot \frac{(2n+1)d_{c,neu} + k \cdot x}{2\sqrt{D_{eff,1} \cdot t}}$$
(4)

mit:

$$k = \sqrt{\frac{D_{eff,1}}{D_{eff,2}}}$$
(5)

$$\alpha = \frac{1-k}{1+k} \tag{6}$$

$$D_{\text{Eff,C}}(t) = k_{e} \cdot k_{t} \cdot D_{\text{RCM,0}} \cdot A(t)$$
(7)

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \tag{8}$$

- C(x,t): Chloridgehalt des Betons in der Tiefe x (Bauteiloberfläche: x = 0 mm) zum Zeitpunkt t in [M.-%/b]. / Chloride content of the concrete in the depth x (Member surface: x = 0 mm) at time t in [M.-%/b].
- $C_{S,\Delta x}$ : Chloridkonzentration in der Tiefe  $\Delta x$  in Abhängigkeit der anstehenden Chlorideinwirkung in [M.-%/b]. / Chloride concentration in the depth  $\Delta x$  depending on the upcoming chloride ingress in [M.-%/b].

| x:                      | Tiefe in [mm], mit einem korrespondierenden Chloridgehalt $C(x,t)$ . / Depth in [mm], with a corresponding chloride content $C(x,t)$ .   |
|-------------------------|--|
| t:                      | Betonalter in [a] / Age of Concrete in [a].  |
| d <sub>c,neu</sub> :    | Dicke der neu aufgebrachten Instandsetzungsschicht, [mm]. / Depth of the new repair layer in [mm].   |
| D <sub>Eff,C</sub> (t): | Effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton zum Beobachtungszeitpunkt t, [10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]. / Effective chloride diffusion coefficient of concrete at time of observation t, [10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s].  |
| k <sub>e</sub> :        | Parameter zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit von $D_{Eff,C}(t)$ , [-]. / Parameter for the consideration of the temperature dependency of $D_{Eff,C}(t)$ , [-].   |
| kı:                     | Übertragungsparameter, um Abweichungen zwischen Chloridmigrationskoeffizienten, die unter<br>beschleunigten Bedingungen ( <u>Rapid Chloride Migration – D<sub>RCM,0</sub></u> ) ermittelt werden, und Diffusi-<br>onskoeffizienten, die unter natürlichen Bedingungen z. B. im Labor bestimmt werden ( <u>Chloride</u><br><u>Profiling Method – D<sub>CPM,0</sub></u> ), berücksichtigen zu können, [-] / Transfer parameter to consider disc-<br>repancies between the chloride migration coefficient (obtained by RCM Test – D <sub>RCM,0</sub> ) and the<br>diffusion coefficient (obtained under natural conditions in a laboratory test, e. g. <u>Chloride</u><br><u>Profiling Method – D<sub>CPM,0</sub>).</u> |
| D <sub>RCM,0</sub> :    | Chloridmigrationskoeffizient von wassergesättigtem Beton, bestimmt zum Referenzzeitpunkt t <sub>0</sub><br>an definiert hergestellten und vorgelagerten Prüfkörpern in [10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s] / Chloride migration coef-<br>ficient of water saturated concrete, measured at reference time t <sub>0</sub> at defined produced and pre-<br>cured specimen in [10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s].   |
| А                       | Alterungsterm [-] / Age term [-]   |
| t <sub>a</sub> :        | Referenzzeitnunkt in [a] / Reference time [a]  |
| ·0·                     | Exponent zur Berücksichtigung der Zeitsbhängigkeit von D(t) Altersexponent [-] / Exponent  |
| <b>C1</b>               |  |

Exponent zur Berucksichtigung der Zeitabhangigkeit von D<sub>Eff,C</sub>(t), Altersexponent [-]. / Exponent to consider the time dependency of D<sub>Eff,C</sub>(t), age exponent [-].
 Die Chloridionenkonzentration in der Instand-

ble Chiondionenkonzentration in der Instandsetzungsschicht (Schicht 1) wird mit Hilfe der Gleichung (3) beschrieben, die der Altbetonschicht (Schicht 2) mit Hilfe der Gleichung (4). Als Randbedingungen gelten für die Oberfläche von Schicht 1 eine konstante Chloridionenkonzentration ( $C_{S,\Delta x}$ ) und ein Konzentrationsgleichgewicht an der Schichtgrenze zwischen 1 und 2 ( $c_1 = c_2$ ). Beide Gleichungen haben das 2. Fick'sche Gesetz zur Grundlage.

In Abbildung 2 ist beispielhaft ein Verlauf der Chloridkonzentration über ein 2-Schicht-System dargestellt. Nach Gehlen [4] befindet sich an der, der Witterung ausgesetzten Oberfläche der Instandsetzungsschicht eine so genannte Konvektionszone, in der die Gesetzmäßigkeiten des 2. Fick'sche Gesetzes keine Gültigkeit besitzen. Im dahinter liegenden Bereich der Schicht 1 wird die Chloridionenkonzentration, beginnend mit der Ersatzoberflächenkonzentration  $C_{S,\Delta x}$  bis zur Schichtgrenze durch Gleichung (3) beschrieben. Die sich daran anschließende Schicht 2 wird durch die Gleichung (4) beschrieben. The chloride ion concentration within the repair layer (layer 1) and the remaining layer (layer 2) are described by equation (3) and (4) respectively. The boundary conditions are a constant surface chloride ion concentration  $(C_{S,\Delta x})$  at layer 1 and a concentration equilibrium at the boundary between layer 1 and 2  $(c_1 = c_2)$ . Both equations are based on Fick's second law.

Figure 2 exemplifies the gradient of the chloride concentration of a 2-layer-system. At the weather surface of the repair layer a so called convection zone is located where Fick's second law is not valid, see Gehlen [4]. At the behind laying region of layer 1 the chloride ion concentration starting with the surface concentration  $C_{S,\Delta x}$  until the layer boundary is described by equation (3). The adjacent layer 2 is described by equation (4).



Abbildung 2: Schematischer Chlorid-Verlauf im 2-Schicht-System mit Schichtdicken von 40 mm (Instandsetzungsschicht) und 20 mm (Altbetonschicht) sowie der 8,9 mm starken Konvektionszone (gestrichelte Linie)

**Figure 2:** Schematical chloride gradient at the 2-layer-system with layer thicknesses of 40 mm (repair layer) and 20 mm (remaining layer) as well as 8.9 mm convection zone (dashed line)

Die Grundlage für die Zuverlässigkeitsanalyse ist im Falle des 2-Schicht-Systems die Gleichung (9), die auf der Grenzzustandsgleichung (1) basiert:

The reliability analysis for the case of a 2-layer-system is based on equation (9) which is founded on equation (1).

(9)

$$g(C_{crit},C(d_c,t) = C_{crit} - C(d_c,t)$$

Der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt C<sub>crit</sub> wird dem tatsächlichen Chloridgehalt an der Bewehrung gegenüber gestellt. Verlässt Gleichung (9) den positiven Bereich, so liegt die Bewehrung depassiviert vor.

Für die Zuverlässigkeitsanalyse eines 2-Schicht-Systems sind folgende Fragen zu stellen:

- 1. Wie weit wird die Betondeckung des Altbetons abgetragen?
- 2. Welcher mittlere kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt wird angesetzt?

Von Seiten des Auftraggebers, der BAW, wurde angegeben, dass i. d. R. der Altbeton bis zu einem Chloridgehalt von 0,4 M.-%/b abgetragen wird. Der mittlere kritische korroThe critical chloride content  $C_{crit}$  is compared to the actual chloride content at the reinforcement. At the point of time as equation (9) becomes negative the reinforcement will be depassivated.

For the reliability analysis of a 2-layer-system two questions will be asked:

- 1. How far does the concrete cover will be removed?
- 2. Which mean value of the critical chloride content will be applied?

The client, the BAW, set the threshold of the chloride content for the removal of the repair layer to a value of 0.4 M.-%/b. The mean value of the critical chloride content is according to Gehlen [3] set to a value of 0.6 M.-%/b.

sionsauslösende Chloridgehalt ist nach Gehlen [3] auf 0,6 M.-%/b festgelegt.



Abbildung 3: Schematische Darstellung der Chloridprofile im Altbeton und dem 2-Schicht-System unter Angabe der CI- Grenzwerte

## **Figure 3:** Schematical description of the chloride profile for the original concrete (removed and remaining concrete) and the 2-layer-system with declaration of the Cl thresholds

In Abbildung 3 sind die Annahmen für die Berechnung der Dauer bis zur Depassivierung des Bewehrungsstahles in einem 2-Schicht-Systems dargestellt. Bild A zeigt die Chloridverteilung im Altbeton. Der Abtrag wird bis zu einem Chloridgehalt des Betons von 0,4 M.-%/b vorgenommen. Bild B zeigt das 2-Schicht-System, das aus der Instandsetzungsschicht (zum Zeitpunkt t = 0 chloridfrei) und der Altbetonschicht besteht. Der Chloridgehalt in der Altbetonschicht zeigt am äußeren Rand einen Wert von rd. 0,4 M.-%/b und fällt zur Bewehrung hin ab. Der Gradient des Restchloridprofils ist unbekannt. In den nachfolgenden Berechnungen wurde aber angenommen, dass die Abtragstiefe entweder nicht so tief liegt, dass sich, üblichen Restchloridprofilverläufen entsprechend, die Chloridkonzentration bis zur Höhe Bewehrungslage noch weiter abschwächt auf Werte von rd. 0,2 M.-%/b, oder so tief liegt, dass in jedem Fall die erste Bewehrungslage in die Instandsetzung mit einbezogen wird (auch aus Gründen der besseren Verankerung). Daraus leitete sich die Annahme ab, dass die Altbetonschicht generell mit einer Chloridbelastung von 0,2 M.-%/b an der Bewehrung angenommen wird.

The assumptions for the calculation of the time to depassivate the reinforcement within a 2layer-system are presented at Figure 3. Picture A shows the chloride profile at the original concrete (removed and remaining concrete). The concrete will be removed until a chloride content of 0.4 M.-%/b is reached. Picture B shows the 2-layer-system with the repair layer (at the moment t = 0, free of chlorides) and the remaining layer. The chloride content at the remaining layer indicates at the outer boundary a value of 0.4 M.-%/b which declines in direction of the reinforcement. The gradient of the chloride profile within the remaining layer is unknown. But for the following calculations it was assumed that the depth of removal is either not as deep that, according to common residual chloride profiles, the chloride concentration at the reinforcement falls below a value of 0.2 M.-%/b or it is as deep that the first reinforcement layer is within the repair arrangements (also for reasons of better anchorage). From this it follows that the chloride content at the reinforcement of the remaining layer is assumed to 0.2 M.-%/b.

#### Ergebnisse

Das Diagramm mit den erforderlichen Migrationskoeffizienten in Abhängigkeit der Nutzungsdauer für das 2-Schicht-System, bestehend aus einer Instandsetzungsschicht und einer Altbetonschicht ist in Abbildung 4 zu sehen. Die Kurvenverläufe stehen für unterschiedliche Kombinationen aus Instandsetzungs- und Altbetonschicht. Über die Nutzungsdauer sind die notwendigen Migrationskoeffizienten (der Instandsetzungsschicht) abgetragen, um mit einem Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 1.0$  einen Chloridgehalt an der Bewehrung von c = 0.6 M.-%/b nicht zu überschreiten.

#### Results

The diagram at Figure 4 shows the required migration coefficients against the aspired service life for the 2-layer-system consisting of a repair layer and a remaining layer. The different curve progressions describe various combinations of repair and remaining layer thicknesses. The required migration coefficients are drawn against the service life to not exceed a chloride content at the reinforcement of c = 0,6 M.-%/b at a reliability index of  $\beta = 1.0$ .



**Abbildung 4:** Erforderliche Migrationskoeffizienten in Abhängigkeit der vorhandenen Schichtdicken ( $d_{c,neu}$ und  $d_{c,alt}$ ) und der gewünschten Nutzungsdauer bei einem Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 1,0$ 

**Figure 4:** Required migration coefficient against the present layer thicknesses ( $d_{c,neu}$  and  $d_{c,alt}$ ) and the aspired service life at a reliability index of  $\beta = 1.0$ 

Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass bei Instandsetzungsschichtdicken von  $d_{c,neu} \ge 30$  mm und einem Instandsetzungsbeton bzw. -mörtel auf Basis eines puzzolanischen bzw. latent hydraulischen Bindemittels die Vorgabe zur Nutzungsdauer von 40 bis 50 Jahren bei einem Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 1,0$  (max. 15% der Bewehrung From the diagram it becomes apparent that the specification for a life time of 40 to 50 years at a reliability index of  $\beta = 1,0$  (max. 15% of the reinforcement might be depassivated) can be maintained with repair layer thicknesses of d<sub>c,neu</sub>  $\geq$  30 mm and a pozzolanic and latent hydraulic respectively based repair concrete or mortar. Merely the combination of dürfen depassiviert vorliegen) eingehalten werden kann. Lediglich die Kombination aus 20 mm Instandsetzungsschicht und 40 mm Altbetonschicht unterschreiten bereits nach rd. 12 Jahren die bisher erreichbaren Werte der Migrationskoeffizienten. 20 mm repair layer and 40 mm remaining layer fall already after 12 years under so far achievable values for the migration coefficient.



**Abbildung 5:** Vergleich der erforderlichen Migrationskoeffizienten für das 1-Schicht-System (Altbeton vernachlässigt) und das 2-Schicht-System (Instandsetzungs- und Altbetonschicht) bei  $\beta = 1,0$ 

**Figure 5:** Comparison of the required migration coefficients of the 1-layer-system (remaining layer neglected) with the 2-layer-system (repair layer and remaining layer) at  $\beta = 1.0$ 

Vergleicht man nun, wie in Abbildung 5 dargestellt, das Modell ohne Ansatz der Altbetonschicht mit dem Modell das sowohl Instandsetzungs- als auch Altbetonschicht beinhaltet, so wird die deutliche Vergrößerung des Chloridwiderstandes beim 2-Schicht-System ersichtlich. Vergleicht man beispielsweise bei einer Nutzungsdauer von 40 Jahren die beiden Modelle mit 40 mm Instandsetzungsschicht miteinander, so kann der Migrationskoeffizient im 2-Schicht-System den dreifachen Wert annehmen. Jedoch sollte auch darauf hingewiesen werden, dass im 1-Schicht-System lediglich mit dem konservativen Alterungsexponenten a von m = 0,3und s = 0,12 gerechnet wurde. Im 2-Schicht-System dagegen ist nur für den Altbeton dieThe comparison of the model approach excluding the remaining layer with the model approach including the repair layer as well as the remaining layer clearly indicates that the chloride resistance at the 2-layer-system increases, see Figure 5. By comparison the two models at a service life of 40 years and a repair layer of 40 mm the migration coefficient of the 2-layer-system can reach the triple value. However it should be pointed out that the 1layer-system is only based on the conservative age exponent a with m = 0.3 und s = 0.12. At the 2-layer-system only the remaining layer is based on this conservative age exponent. Whereas the repair layer is based on an age exponent a with m = 0.45 und s = 0.2 which high coefficient of reasonably variation

ser konservative Alterungsexponent angenommen wurden. Für die Instandsetzungsschicht wurde ein Alterungsexponent a mit m = 0.45 und s = 0.2 angesetzt, dessen relativ hoher Variationskoeffizient von CoV = 44% eine zusätzliche Sicherheit gewährleistet. Um diesen Alterungsexponenten zu erreichen, muss das Bindemittel einen puzzolanischen bzw. latent hydraulischen Anteil besitzen. Würde man nun den Zuverlässigkeitsindex auf  $\beta = 0.5$  absenken, was einer 30%-igen Depassivierungswahrscheinlichkeit entspräche, so ergäben sich die in Abbildung 6 gezeigten erforderlichen Migrationskoeffizienten.

CoV = 44% assures additional safety. To reach this age exponent the binder needs to offer a pozzolanic or latent hydraulic portion. Reducing the reliability index to  $\beta = 0.5$  which would relate to a 30% reliability of depassivation would result in the required migration coefficients seen at Figure 6.



**Abbildung 6:** Erforderliche Migrationskoeffizienten in Abhängigkeit der vorhandenen Schichtdicken ( $d_{c,neu}$ und  $d_{c,alt}$ ) und der gewünschten Nutzungsdauer bei einem Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 0,5$ 

**Figure 6:** Required migration coefficients against the present layer thicknesses ( $d_{c,neu}$  and  $d_{c,alt}$ ) and the aspired service life at a reliability index of  $\beta = 0.5$ 

Es wird ersichtlich, dass mit einem Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 0.5$  auch das 2-Schicht-System aus 20 mm Instandsetzungsschicht und 40 mm Altbetonschicht eine Nutzungsdauer von 40 bis 50 Jahren gewährleisten würde. Jedoch sinkt damit auch die Zuverlässigkeit, sodass anstatt von Thus it appears that with a reliability index of  $\beta = 0.5$  even the 2-layer-system with 20 mm repair layer and 40 mm remaining layer assures a service life of 40 to 50 years. However the reliability is reduced so that 30% instead of 15% of the reinforcement are depassivated.

15% der Bewehrung 30% am Ende der Nutzungsdauer depassiviert vorliegen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei der Betrachtung eines 2-Schicht-Systems, bei dem eine verbleibende Altbetonschicht mit sehr konservativen Ansätzen für den Chlorideindringwiderstand und eine neu aufgebrachte Instandsetzungsschicht auf der Basis eines Betons bzw. Mörtels mit puzzolanischem bzw. latent hydraulischem Bindemittelanteil eine Nutzungsdauer von 40 bis 50 Jahren bei einem Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 1,0$  realisierbar ist. Lediglich für dünne Instandsetzungsschichten kleiner 30 mm kann diese Nutzungsdauer nicht gewährleistet werden. Reduziert man allerdings den Zuverlässigkeitsindex auf  $\beta = 0.5$ , dann ist auch für Instandsetzungsschichtdicken von 20 mm eine Nutzungsdauer von 40 bis 50 Jahren möglich. Voraussetzung für die oben gemachten Aussagen ist stets eine Gesamtbetondeckung (Instandsetzungsschicht plus Altbetonschicht) von 60 mm.

#### Danksagung

Der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wird für die Beauftragung und die gleichzeitige finanzielle Unterstützung des zugrunde liegenden Projektes gedankt. The following concluding remarks can be drawn. A 2-layer-system consisting of a remaining layer with conservative assumed parameters and a new applied repair layer based on a concrete or mortar with a pozzolanic or latent hydraulic binder portion can assure a service life of 40 to 50 years at a reliability index of  $\beta = 1.0$ . Merely thin repair layers with a thickness less than 30 mm can not realise that service life. However reducing the reliability index to  $\beta = 0.5$  a service life of 40 to 50 years becomes realistic even for repair layer thicknesses of 20 mm. Precondition for all above drawn remarks is a overall concrete cover (repair layer plus remaining layer) of 60 mm.

#### Acknowledgement

The Federal Bureau of Water Construction (BAW) is thanked for the assignment and the simultaneously financial support of the underlying project.

#### Literatur / Reference

- [1] Fischer, C.; Gehlen, C.: Überarbeitung des BAW-Merkblatts Chlorideindringwiderstand von Beton. IWB Abschlussbericht A07/1-1, Stuttgart, 2007.
- [2] RCP Consulting: STRUREL, A Structural Reliability Analysis Program System, RCP Consulting, München, 1995.
- [3] Crank, J.: The Mathematics of Diffusion. 2nd Edition, Oxford Science Publications, Oxford, USA, 1975.
- [4] Gehlen C.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 510. Beuth-Verlag, Berlin, 2000.

## DAS VERSAGEN VON VERBUNDDÜBELN INFOLGE SPALTENS DES BETONS THE FAILURE OF BONDED ANCHORS BY SPLITTING OF CONCRETE

von/by Thorsten Hüer

#### Einleitung

Verbunddübel sind ein häufig verwendetes Dübelsystem für Verankerungen in Beton, bei dem in einem zylindrischen Bohrloch eine Gewindestange mit der Bohrlochwandung verklebt wird. Bei auf Zug beanspruchten Verbunddübeln kann der Ankergrund Beton entweder durch einen Betonausbruch oder durch Spalten des Betons versagen. Ziel des hier vorgestellten Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für die Versagensart Spalten bei Verbunddübeln. Die Zugkraft der Ankerstange wird über die geneigten Gewindeflanken als Druckkraft in den Mörtel und von dort weiter in den Beton eingeleitet (Abbildung 1a). Die radiale Komponente dieser Druckkraft wirkt als Spaltkraft. Der parallel zur Ankerstange wirkende Anteil ruft in Mörtel und Beton ein Bestreben zur Querausdehnung hervor, welches ebenso als Spaltkraft wirkt.

Spalten kann bei Verankerungen nahe am Bauteilrand und insbesondere bei geringen Bauteildicken auftreten. Ein Versagen durch Spalten ist gekennzeichnet durch Risse, die durch die Dübelachse zum Bauteilrand verlaufen (Abbildung 1b). Die Bruchlast wird dabei zum einen von den geometrischen Größen Randabstand c, Achsabstand bei Dübelgruppen, Bauteildicke h, Verankerungstiefe  $h_{ef}$  sowie Dübeldurchmesser und zum anderen von den Materialeigenschaften des Betons und Mörtels bestimmt.

#### Versuchsdurchführung

Zugversuche (mit Verbunddübeln) können mit zwei unterschiedlichen Versuchsaufbauten durchgeführt werden: mit enger und mit weiter Abstützung. Bei einer engen Abstützung werden die Kräfte, die von dem Dübel in den Beton eingeleitet werden, in

#### Introduction

Bonded anchors are a commonly used fastening system for anchorage to concrete, that bonds a threaded rod to the wall of a cylindrical borehole. Tensile loaded bonded anchors may fail by a concrete cone breakout or by generating of splitting cracks. The object of this research project is to develop a design approach for bonded anchors that fail by splitting of the concrete.

The tension force of the threaded rod is induced by the inclined thread flanks as a compressive force into the mortar and from there into the concrete (figure 1a). The radial component of the compressive force acts as a splitting force. The component acting parallel to the rod causes an ambition to transverse expansion of mortar and concrete, that also acts as a splitting force.



#### Abbildung 1: Lasteinleitung von Verbunddübeln (a) und Spaltversagen in der Bauteilecke (b) Figure 1: Load transfer of bonded anchors (a) and splitting failure in a corner (b)

Splitting may occur with fastenings close to an edge, especially in thin members. A failure due to splitting is characterized by a crack through the axis of the anchor (figure 1b). The ultimate load is governed by the geometrical parameters edge distance, spacing for anchor groups, member thickness, embedment depth and anchor diameter unmittelbarer Nähe des Dübels in eine Abstützplatte geleitet (Abbildung 2a). Eine weite Abstützung liegt vor, wenn die Distanz zwischen Dübel und Abstützvorrichtung größer als die 1,5-fache Verankerungstiefe ist (Abbildung 2b). Sie ermöglicht im Gegensatz zur engen Abstützung die Ausbildung eines (vollständigen) Ausbruchkegels. Die Dübelkräfte müssen jedoch über einen (vergleichsweise) weiten Weg zur Abstützung "laufen". Dadurch entsteht Biegung im Bauteil. Die Höhe der auftretenden Biegespannungen hängt von der Abstützweite und der Geometrie der Abstützung, der Bauteilhöhe und der Höhe der Last ab.

Bei Versuchen mit weiter Abstützung ist es oftmals schwierig das Versagen eindeutig einer Versagensart zuzuordnen, da sowohl Risse durch die Dübelachse, welche einen Hinweis auf ein Spaltversagen darstellen können, als auch ein Ausbruchkegel auftreten können.



Die Verwendung einer engen Abstützung bietet den Vorteil, dass ein Versagen des Betons nur durch Spalten bzw. die Bildung von Spaltrissen und nicht durch einen Betonausbruch oder eine Kombination von Spalten und Betonausbruch erfolgen kann.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden experimentelle und numerische Untersuchungen jeweils sowohl mit weiter als auch mit enger Abstützung durchgeführt. as well as by the material properties of the concrete and the mortar.

#### Procedure of tests

Tensile tests (with bonded anchors) can be performed with two different test setups: a confined and an unconfined test setup. At confined tests the force that is transferred by the anchor into the concrete is transferred close to the anchor into the support (figure 2a). An unconfined test setup is existent if the distance between anchor and support is larger than 1.5-times the embedment depth (figure 2b). In opposite to confined tests, unconfined tests enable the formation of a (unrestricted) concrete cone breakout. In unconfined tests the force that is transferred by the anchor into the concrete has to be transmitted over a long distance to the support. Thus, bending is generated in the concrete member. The amount of the bending stresses depends on the distance to the support, the geometrical design of the support, the member thickness and the load level.

#### Abbildung 2:

Versuchsaufbau mit a) enger und b) weiter Abstützung Figure 2: a) Confined and b) unconfined test setup

At unconfined tests it is often difficult to definitely associate the failure with a failure mode because cracks through the anchor axis, that indicate a splitting failure, as well as a concrete cone breakout may occur.

Confined tests offer the advantage that the failure of the concrete can only takes place by splitting and not by a concrete cone breakout or a combination of both failure modes. Within this research project numerical and experimental investigations were performed with a confined as well as with an unconfined test setup.

#### Numerische Untersuchungen

Um den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Spaltbruchlast und eine bessere Kenntnis über den Versagensmechanismus von Verbunddübel bei enger und weiter Abstützung zu erhalten, wurden nichtlineare dreidimensionale Finite-Element-Simulationen durchgeführt. Die Modellierung des Verbunddübels erfolgte wie in Hüer (2006) beschrieben. Es wurde das FE-Programm MASA (Ožbolt & Kožar 2000) verwendet. Dieses erlaubt eine wirklichkeitsnahe Simulation des Verhaltens von Beton in einem dreidimensionalen Spannungs-Dehnungs-Zustand und der Schädigung und Rissbildung des quasispröden Materials Beton.

Abbildung 3 zeigt für eine enge und Abbildung 4 für eine weite Abstützung das FE-Modell eines Einzeldübels in der Bauteilecke einschließlich der Festhalterungen. Die Abstützung wird durch das Festhalten von Knoten an der Betonoberfläche entgegen der Belastungsrichtung simuliert. Im Fall einer engen Abstützung werden alle Knoten innerhalb eines Radius von der 1,5-fachen Verankerungstiefe festgehalten. Die Simulation einer weiten Abstützung erfolgt durch das Festhalten von jeweils zwei Knotenreihen in einem Abstand von der 2-fachen Verankerungstiefe an beiden Seiten vom Dübel parallel zur Diagonalrichtung. Hinter dem Dübel werden senkrecht dazu nochmals zwei Knotenreihen festgehalten.

Mit Hilfe der numerischen Simulationen mit enger Abstützung wurde der Einfluss der verschiedenen geometrischen Parameter auf die Spaltbruchlast untersucht. Aus den Ergebnissen wurde ein Bemessungsvorschlag *(Hüer 2006)* entwickelt, der auch eine gute Übereinstimmung mit den durchgeführten Versuchen zeigt. Spalten kann auch im Stahlbetonbau auftreten. Ein Vergleich mit einem Modell zur Beschreibung des Tragverhaltens von Übergreifungsstößen beim Versagen durch Spalten *(Eligehausen 1979)* 

#### **Numerical Investigations**

Nonlinear three-dimensional finite element simulations were performed to determine the influence of the several parameters controlling the ultimate load of splitting failure and to understand the failure mechanisms of bonded anchors at unconfined and confined conditions. The modeling was carried out as described in Hüer (2006). The FE-code MASA (Ožbolt & Kožar 2000) was applied. This code allows a realistic simulation of the behavior of concrete in three-dimensional stress-strain-states as well as the damage and cracking of the quasi-brittle material concrete.

Figure 3 shows the FE-model of a single anchor in the corner with a confined and figure 4 with an unconfined test setup. The support is simulated by constraining nodes of the upper concrete surface against the load direction. In the case of a confined test setup all nodes within a radius of 1.5-times the embedment depth are constraint. The simulation of unconfined tests occurs by constraining two lines of nodes parallel to the diagonal direction in a distance of two times the embedment depth at two sides of the anchor. Behind the anchor two further node lines are restraint.

By means of the numerical simulations with a confined test setup a design approach (*Hüer 2006*) was developed that agrees also well with performed experimantal tests. Splitting of concrete occurs also in reinforced concrete construction. A comparison with a approach adopted in the design of lap spliced rebars (*Eligehausen 1979*) show that the failure load in both is governed by the same parameters in a similar manner (*Hüer & Eligehausen 2007*).

hat gezeigt, dass die Einflussparameter dort in ähnlicher Weise die Bruchlast bestimmen *(Hüer & Eligehausen 2007)*.



Abbildung 3: FE-Modell mit enger Abstützung Figure 3: FE-model with confined test setup

## Vergleich zwischen weiter und enger Abstützung

Ein Vergleich der mit enger Abstützung durchgeführten FE-Berechnungen und Versuche mit denjenigen bei weiter Abstützung zeigt, dass die Bruchlasten bei enger Abstützung innerhalb des (derzeit) üblichen Anwendungsbereichs (Randabstand, Verankerungstiefe) von Verbunddübeln praktisch immer größer sind als bei weiter Abstützung. In Abbildung 5 sind beispielsweise für einen Einzeldübel am Rand die numerisch ermittelten Bruchlasten bei weiter und enger Abstützung dargestellt. Für alle untersuchten Randabstände ist die Bruchlast bei enger Abstützung mehr als doppelt so groß wie bei weiter Abstützung.

Zwischen weiter und enger Abstützung treten nicht nur in der Höhe der Last sondern auch im Rissbild Unterschiede auf. Für das numerisch untersuchte Beispiel eines Einzeldübels in der Ecke mit  $c/h_{ef} = 1,5$  erhält man bei enger Abstützung eine ungefähr drei Mal so große Last wie bei weiter Abstützung. Abbildung 6 und 8 zeigen die Hauptdehnungen kurz nach Höchstlast. Die größten Dehnungen, welche die Rissbildung charakteri-



Abbildung 4: FE-Modell mit weiter Abstützung Figure 4: FE-model with unconfined test setup

# Comparison of confined and unconfined test setup

A comparison of the confined and unconfined FE-simulations shows that, within the normal application (edge range of distance. embedment depth), the ultimate load of the confined test is always higher than that of the unconfined test. Figure 5 shows for the example of a single anchor close to an edge the numerically obtained ultimate loads of a close and a wide support. The ultimate load of the close support is for all tested edge distances more than twice as high as at wide support. Between confined and unconfined tests are

between confined and unconfined tests are not only differences in ultimate load but also in crack pattern. For the example of a single anchor in the corner the numerically obtained failure load is about three times higher using a close support than a wide support. The figures 6 and 8 show the principal strains shortly after peak load. In the dark colored regions occur large strains, which indicate crack formation. At confined tests (figure 6) a crack grows initially from the anchor perpendicularly to the edge, and then a further crack grows transversely towards the second edge. The anchor fails because the sieren, treten in den dunkel eingefärbten Bereichen auf. Bei enger Abstützung (Abbildung 6) verläuft zunächst ein Riss vom Dübel senkrecht zum Rand und dann ein weiterer schräg vom Dübel zum zweiten Rand. Der Dübel versagt, da sich infolge des Risses die Verbundfestigkeit des Dübels soweit vermindert, dass er herausgezogen wird. Teilweise wird auch ein Bruchkörper abgesprengt.



#### Abbildung 5:

Bruchlasten (FE) eines Einzeldübels am Rand bei weiter und enger Abstützung Figure 5:

Ultimate loads (FE) of a single anchor close to the edge at confined and unconfined conditions

Dahingegen bildet sich bei weiter Abstützung zunächst ein Riss, der ausgehend vom Dübel in Richtung Ecke läuft und an einem der Ränder mit kleinem Abstand zur Ecke endet (Abbildung 7). Weiterhin bilden sich Risse, die vom Dübel in Richtung Abstützung verlaufen. Ein Riss, der halbreisförmig um den Dübel herum läuft, wird an der Seite zum Platteninneren sichtbar (Abbildung 8). Die Rissbildung der numerischen Simulation (Abbildung 8) ist der Rissbildung bei Versuchen (Abbildung 7) sehr ähnlich.

Neben den Rissen, die senkrecht zur Bauteilebene verlaufen, bildet sich auch ein Riss der vom Ende der Verankerungstiefe in Richtung Betonoberfläche läuft. Als Folge erhält man dann einen (mehrteiligen) Ausbruchkörper. Um das zuvor beschriebene bond strength decreases due to the cracks to such an extent that the anchor is pulled out. Sometimes, however, a fracture body spalls.



#### Abbildung 6:

Hauptdehnungen (Rissbild) einer FE-Berechnung mit enger Abstützung Figure 6:

Principal strains (Crack pattern) of FE-calculations under confined conditions

In unconfined tests a crack grows initially from the anchor towards the corner and ends close to the corner at an edge (figure 7). Further on, cracks form approximately perpendicularly from the anchor to the support. A crack, that runs semi-circularly around the anchor, show up in direction of the member center (figure 8). The crack pattern of the numerical simulation (figure 8) is very similar to that is observed in experimental tests (figure 7).

Beside the cracks that form perpendicularly to the member plane, a crack grows from the end of the embedment depth towards the upper surface of the concrete member. Consequently, a breakout body is developed (in several parts). To cause such a failure the anchoring system have to offer an adequate bond strength, otherwise the depths of the breakout body is reduced or the anchor is pulled out. Versagen hervorrufen zu können, muss das Dübelsystem eine ausreichend hohe Verbundfestigkeit aufweisen, andernfalls verringert sich die Tiefe des Ausbruchkegels oder der Dübel wird herausgezogen.



Abbildung 7: Rissbild eines Versuchs mit weiter Abstützung Figure 7: Crack pattern of test with unconfined test setup

Da bei der engen Abstützung keine Biegespannungen auftreten können, kann die Rissbildung nur aufgrund der durch die Lasteinleitung hervorgerufenen Spaltkräfte erfolgen.

Bei einer weiten Abstützung entstehen prinzipiell in beiden Richtungen der Bauteilebene Biegespannungen. Bei einer parallelen Abstützung treten die größten Biegespannungen senkrecht zu dieser auf. Daher entsteht zunächst ein Riss in Diagonalrichtung, bzw. parallel zur Abstützung. Es folgen Risse senkrecht dazu. Die Richtung der Risse und eine Auswertung der Spannungen in Hüer (2007) zeigen, dass die Spannungen aus Bauteilbiegung das Versagen der Befestigung in erheblichem Maße beeinflussen. Dies gilt insbesondere bei geringen Bauteildicken.

Prinzipiell entspricht die weite Abstützung eher den Verhältnissen in der Realität, wo die über die Befestigung eingeleiteten Kräfte über Biegung in die Auflager des Bauteils



Abbildung 8: Hauptdehnungen (Rissbild) einer FE-Berechnung mit weiter Abstützung Figure 8: Principal strains (Crack pattern) of FE-calculations under unconfined conditions

Since no bending stresses can occur using a close support, the crack formation results only from the splitting forces.

If a wide support exists, bending stresses are generated generally in both directions of the member plane. The largest bending stresses occur in the direction perpendicular to the parallel support. Thus, the crack in diagonal direction forms first and cracks perpendicular to this follow. The direction of the cracks and an analysis of the stresses (*Hüer 2007*) show, that the stresses due to bending govern the failure in a significant degree, especially in thin members.

A wide support corresponds generally to the conditions in reality, where the forces induced by the anchorage have to be transferred by bending to the support of the concrete component. The stress state of confined and unconfined tests differs significantly. That may affect the bearing capacity of an anchorage. geleitet werden (müssen). Insgesamt unterscheidet sich der Spannungszustand im Beton zwischen weiter und enger Abstützung deutlich. Dies kann auch die Tragfähigkeit einer Befestigung beeinflussen.

Das bedeutet, dass in der Praxis, wo es keine enge Abstützung gibt, maximal die geringeren Lasten der weiten Abstützung erreicht werden können. Außer die auftretenden Biegespannungen werden durch Druckspannungen anderer Lastfälle verringert oder eliminiert.

#### Folgerungen und Ausblick

Sowohl die experimentellen Untersuchungen als auch die numerischen Simulationen zeigen, dass bei weiter Abstützung Risse durch die Dübelachse entstehen, aber auch die Bildung eines Ausbruchkegels erfolgt. Die Untersuchungen zum Versagensmechanismus deuten darauf hin, dass zunächst durch Spannungen aus Lasteinleitung und Biegung die Bildung von Rissen erfolgt. Damit liegt ein gerissener Beton vor und eine weitere Steigerung der Last ist nicht möglich. Das Versagen geht dann einher mit der Bildung eines Betonausbruchkörpers.

Konventionelle Verbunddübel haben in der Regel nur eine Zulassung für ungerissenen Beton. Gemäß *ETAG 001 (1997)* liegt ein ungerissener Beton vor, wenn die Summe der Spannungen aus Last und unter Zwang für beide Richtungen der Bauteilebene senkrecht zur Dübelachse kleiner oder gleich Null ist ( $\sigma_L + \sigma_R \le 0$ ). Um das zu gewährleisten, müssen die Zugspannungen aus Lasteinleitung und Bauteilbiegung von Spannungen aus anderen Lastfällen "überdrückt" werden.

An einem freien Bauteilrand sind die Spannungen zwangsweise Null. Bei kleinen Randabständen sind daher die Spannungen aus anderen Lastfällen in aller Regel nicht ausreichend groß, um die von der Lasteinleitung der Befestigung hervorgerufenen Spannungen zu überdrücken. Somit ist streng Overall it means that in practice, where no confined conditions exist, the ultimate loads of unconfined tests can not be exceeded. Except the present bending stresses will be reduced or eliminated by compressive stresses of other loading conditions.

### **Consequences and perspective**

Both the experimental and the numerical investigations show that cracks through the anchor axis occur, but also the formation of a breakout body takes place. The investigations relative to the failure mechanism indicate that due to the stresses caused by the load transfer and the bending a formation of cracks occurs. Therefore a cracked concrete exists und a further increase in load is impossible. Finally the failure comes along with the formation of a concrete breakout body.

Conventional bonded anchors are normally approved only for uncracked concrete. In accordance with *ETAG 001 (1997)* an uncracked concrete is existent, if the sum of the stresses induced by external loads and due to restraint of imposed deformations is lower or equal zero ( $\sigma_L + \sigma_R \le 0$ ) for both directions of the member plane (perpendicular to the anchor axis). To ensure that the tensile stresses due to load transfer and bending must be compensated by other loading conditions.

At a free edge no stresses are existent. Therefore at small edge distances the stresses due to other loading conditions suffice not to compensate the stresses from the loading of the anchorage. Thus, strictly speaking, an application of conventional bonded anchors is impossible close to an edge or in a corner. In effect, in those cases genommen der Einsatz von konventionellen Verbunddübeln am Rand und in der Ecke nicht möglich. Bei diesen Anwendungsfällen muss man (eigentlich) von gerissenem Beton ausgehen.

Bislang werden die Verbunddübel jedoch auch an Rand und Ecke eingesetzt. Wie die Versuche zeigen, haben die Dübel dort durchaus auch eine gewisse Tragfähigkeit. Derzeit werden im Zulassungsverfahren Versuche durchgeführt, mit denen der Randabstand ermittelt werden soll, ab dem die Bruchlast ohne Randeinfluss erreicht wird. Bis zu diesem Randabstand wird die Bruchlast abgemindert. Dies führt jedoch teilweise zu einer unwirtschaftlichen und teilweise zu einer unsicheren Bemessung.

Um die Verwendung von Verbunddübeln nahe an Bauteilrändern mit den Anforderungen an ungerissenen Beton in Einklang zu bringen, wird ein Bemessungsmodell entwickelt, mit dem die Bruchlast bei weiter Abstützung berechnet werden kann. Die Bruchlasten bei weiter Abstützung entsprechen in etwa dem, was bei Anwendungen in der Praxis erwartet werden kann. Somit ermöglicht das Modell dem Dübelanwender eine Bemessung randnaher Befestigungen unter Berücksichtigung der Bauteildicke. one has to assume cracked concrete.

But so far bonded anchors are used close to edges. And as the tests show, bonded anchors have there a certain bearing capacity. In the approval procedure currently tests are performed that shall identify the edge distance, where the load of anchors without edge effects is achieved. Up to this edge distance the design load is reduced. However, this results in some cases in an inefficient and in some cases in an insecure design.

To reconcile the use of bonded anchors close the member to edges of with the requirements of uncracked concrete, a design approach to predict the ultimate load at unconfined conditions will be worked out. The ultimate loads under unconfined conditions correspond approximately to the loads that can be expected in practical use. Thus, this approach will allow the user of adhesive fastening systems the design of applications close to edges of the member taking into account the influence of the member thickness.

#### Literatur / References

- Eligehausen, R. (1979): Übergreifungsstöße zugbeanspruchter Rippenstäbe mit geraden Stabenden. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStB); Heft 301.
- **ETAG 001 (1997):** *Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete*; European Organisation for Technical Approvals (ETAG), 1997.
- Hüer, T. (2006): Bemessungsvorschlag für die Versagensart Spalten bei Verbunddübeln Zusammenfassung der Forschungsergebnisse aus dem Jahr 2005. Bericht-Nr.: 06/02-02/71, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, nicht veröffentlicht.
- Hüer, T.; Eligehausen, R. (2007): Splitting failure mode of bonded anchors. Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. FraMCoS-6, 17-22 June 2007, Catania, Italy. Taylor and Francis, 2007, pp. 753-760.
- Ožbolt, J.; Li, Y.-J.; Kožar, I. (2000): *Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint*, International Journal of Solids and Structures (IJSS) 38 (2001) 2683-2711, 2000/2001.

## ZUM TRAGVERHALTEN VON VIERFACHBEFESTIGUNGEN UNTER TORSIONSBEANSPRUCHUNG LOAD BEARING BEHAVIOR OF QUADRUPLE FASTENINGS UNDER TORSION LOADING

von/by Philipp Grosser

#### Zusammenfassung

Bisherige Bemessungsansätze zu Mehrfachbefestigungen unter Torsionsbelastung basieren lediglich auf experimentellen und numerischen Untersuchungen zu Zweifachbefestigungen. Im Fall von randnahen Vierfachbefestigungen unter Torsionsbelastung, wie sie beispielsweise bei Befestigungen von Stützen vorkommen, gibt es keine Untersuchungen. Um hierfür das Tragverhalten zu untersuchen wurden sowohl Versuche mit Iniektionsdübeln, als auch numerische Berechnungen durchgeführt. Es wurde angenommen, dass der Widerstand gegen Betonkantenbruch insbesondere von den Randund Achsabständen der Dübel abhängt. In diesem Bericht werden im Folgenden die Untersuchungen dargestellt und auf Basis der Ergebnisse ein Bemessungskonzept für Vierfachbefestigungen unter Torsionsbelastung vorgestellt.

#### Einleitung

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zeigen, dass der Torsionswiderstand einer randnahen Zweifachbefestigung durch die Bruchlast von nur einem Dübel begrenzt ist. Aus diesem Grund kann der Widerstand für diesen Fall entsprechend dem CC-Verfahren [1], [2] berechnet werden. Die Berechnung erfolgt für einen Einzeldübel, der durch eine Querlast zum Bauteilrand hin beansprucht wird. Jedoch im Fall einer Vierfachbefestigung unter Torsionsbeanspruchung, kann angenommen werden, dass nach dem Versagen eines Dübels die Last auf die noch tragfähigen Dübel umgelagert wird. Dieser Versagensmechanismus findet solange statt, bis nur noch ein Dübel übrig ist.

#### Abstract

Previous design assumptions of multiple fastenings under torsion loading rely on experimental and numerical investigations on anchor groups with 2 fasteners. In case of guadruple fastenings close to an edge under torsion loading, as they can be found in fastenings of columns, for example, no detailed investigations are existent. In order to investigate their load-bearing behavior, both, tests with injection type bonded anchors and FEcalculations were carried out. It was assumed that the resistance of the fastening is governed by concrete break-out failure dependent on edge distance and anchor spacing. In this paper the investigations are discussed and, based on the results, a proposal for the design of torsion loaded quadruple fastenings is presented.

### Introduction

The load-bearing capacity of anchor groups with 2 fasteners close to an edge under torsion loading can be calculated in accordance with the Concrete-Capacity-Method (CC-Method) [1], [2]. This is due to theoretical considerations and experimental observations which state that in this case the torsion loading is limited by the ultimate load of only one anchor. The calculation is performed for a single anchor which is subjected to a shear load directed towards the component's free edge. However, in case of quadruple fastenings under torsion loading it can be assumed that after the collapse of one anchor the load is distributed to the remaining anchors. This failure mechanism proceeds until only one

Die Tragfähigkeit der Vierfachbefestigung unter Torsionsbelastung ist dann erreicht, da ein Dübel keine Torsionsbeanspruchung mehr aufnehmen kann.

Der Ausgangspunkt für die Untersuchung einer Vierfachbefestigung unter Torsionsbeanspruchung ist immer derselbe. Das angreifende Torsionsmoment kann in vier Einzelkräfte auf die einzelnen Dübel zerlegt werden (siehe Abbildung 1). Die Zerlegung ist abhängig von den Achsabständen (senkrecht (s<sub>1</sub>) und parallel (s<sub>2</sub>) zum Bauteilrand). Dieser Ansatz stellt den Ausgangspunkt für die weiteren Untersuchungen dar.



## Numerische Untersuchungen

Zur Untersuchung einer Vierfachbefestigung unter Torsionsbeanspruchung wird ein FE-Modell benötigt, das das Tragverhalten der einzelnen Bolzen der Gruppe unter beliebiger Lastrichtung korrekt beschreibt. Für diesen Fall gibt es bislang jedoch kein Modell, das das Tragvermögen und speziell den Betonkantenbruch realitätsnah wiedergibt. Bisherige FE-Modelle mit Verbunddübeln für Untersuchungen unter beliebiger Lastrichtung [3] berücksichtigen die Gewindegänge und den "verschmierten" Verbundmörtel in einer Schicht. Umfangreiche Untersuchungen von Verbunddübeln unter Zugbeanspruchung [4] haben gezeigt, dass das Tragverhalten realistischer beschrieben werden kann, wenn die Gewindegänge und das Eindringverhalten des Mörtels in den umgebenden Beton berücksichtigt werden. Untersuchungen von Verbunddübeln unter Querbeanspruchung anchor is left. Then the load-bearing capacity of the quadruple fastening under torsion loading is reached, because one anchor is not able to carry a torsion loading.

The starting point for the analysis of every quadruple fastening under torsion loading is the same. The torque moment acting on the fastening is shared by the four single anchors which are loaded in different directions, as shown in Figure 1. The load distribution to the single anchors of the fastening depends on the anchor spacing (perpendicular  $(s_1)$  and parallel  $(s_2)$  to the edge). This approach presents the base for the further investigations.

#### Abbildung 1: Verteilung der Querkräfte im Fall einer Torsionsbeanspruchung Figure 1:

Distribution of shear forces in case of torsion loading

## Numerical simulations

For the numerical simulation of torsion loaded guadruple fastenings a FE-model is required which considers the load bearing capacity of the single anchors of the group under arbitrary load direction. For this case there is currently no FE-model available which describes the load bearing capacity and especially the concrete edge failure realistically. Present FE-models of bonded anchors for investigations under arbitrary shear load [3] consider the threads of the anchor and the adhesive mortar in one layer, where their characteristics are smeared. Extensive investigations of bonded anchors under tension loads [4] have shown that the load-bearing behavior can be described more realistically if the threads and the penetration of the mortar in the borehole wall are considered. Under shear loads the investigations in [5] have shown that it makes no difference for the crack pattern and the haben gezeigt, dass es sowohl für das Bruchbild, als auch für die Bruchlast keinen Unterschied macht, ob die Gewindegänge realitätsnah modelliert werden oder nicht. Zur Veranschaulichung der einzelnen Schichten und ihrer Funktionen zeigt Abbildung 2 einen Schnitt durch einen Einzeldübel des verwendeten Modells. Entsprechend diesem Grundmodell wurden die FE-Berechnungen für Vierfachbefestigungen unter Torsionsbeanspruchung durchgeführt. mean ultimate loads if the threads are modeled realistically or not. Figure 2 shows a section through a single anchor of the used new model in order to explain the several layers and their functions. According to this model for a single anchor the FE-calculations of quadruple fastenings under torsion loading were carried out.



Abbildung 2: Schnitt durch das verwendete FE-model

Die Kontaktschicht berücksichtigt sowohl die vernachlässigten Gewindegänge, als auch den Verbundmörtel und stellt die Lastübertragung an den Grenzflächen "Beton - Mörtel" und "Mörtel - Gewindestange" sicher. Diese Verbundschicht besitzt keine Zugfestigkeit. Die entsprechenden Materialeigenschaften sind [4] entnommen. Eine zusätzliche Schicht um den Bolzen berücksichtigt das Eindringverhalten des Verbundmörtels in den umgebenden Beton. Diese Schicht besteht aus Beton mit denselben Materialeigenschaften wie der Betonkörper, besitzt jedoch eine vergleichsweise höhere Schubfestigkeit. Wie in [4] festgelegt, wird der Radius dieser Schicht 2,4mal dem Radius des Bolzens angesetzt (r<sub>3</sub> =  $2,4^{*}r_{1}$ ). Zusätzlich berücksichtigt eine Luftschicht am Ende der Gewindestange, dass hier keine Lastübertragung stattfindet. Die Durchmesser der einzelnen Schichten kön-

Figure 2: Section through the used model

The contact layer considers both, the neglected threads and the adhesive mortar and ensures the load transfer between the interfaces "concrete - mortar" and "mortar threaded rod". This bond layer has no tensile strength. The material properties for this layer are taken from [4]. The penetration behavior of the adhesive mortar in the concrete specimen can be taken into account by an additional layer around the anchor bolt. This layer consists of concrete which has the same material properties as the concrete specimen but shows an increased shear resistance. As laid down in [4] the radius of this layer can be calculated according to  $r_3 = 2.4^*r_1$ . An air film at the bottom of the anchor bolt considers that there is no load transmission at this surface of the anchor bolt. The diameters respectively the radii of the several layers for the investigated anchors are illustrated in
nen Abbildung 2 entnommen werden. Um die Reibung zwischen dem Betonkörper und der Ankerplatte zu minimieren, wird zusätzlich in der Grenzfläche eine Teflonschicht modelliert. Um ein realistisches Tragverhalten sicherzustellen, werden in dieser Schicht in vertikaler Richtung Pendelstäbe modelliert. Hierdurch können nur Druckkräfte übertragen werden. FE-Berechnungen haben gezeigt, dass dieses Modell das Tragverhalten unter beliebiger Lastrichtung ausreichend genau beschreibt. Abbildung 3 zeigt das komplette FE-Modell für die numerischen Berechnungen von Vierfachbefestigungen unter Torsionsbeanspruchung. Alle Modelle bestehen aus einer Betonplatte mit einer Dicke von 360 mm, einer Breite von 1000 mm und einer Länge von 1600 mm.

Figure 2. Additionally a teflon contact layer is modeled between the concrete specimen and the steel plate to minimize the friction between the concrete and the steel surface. To ensure a realistic load-bearing behavior this contact layer only transmits compressive forces. This will be accomplished by modeling stabilizer links in the vertical direction. Calculations have shown that this FE-model describes the load-bearing behavior under arbitrary shear loading in a realistic way. Figure 3 shows the complete FE-model for the numerical investigations of guadruple fastenings under torsion loading. All specimen consist of a concrete slab with a thickness of 360 mm, a width of 1000 mm and a length of 1600 mm.



Abbildung 3: Schnitt durch das verwendete FE-Modell

#### **Experimentelle Untersuchungen**

Bislang gibt es keine Versuche zu Vierfachbefestigungen unter Torsionsbelastung. Aus diesem Grund besteht der erste Schritt in der Planung der Lasteinleitung. Eine ausführliche Diskussion über die möglichen Arten der Lasteinleitung enthält [5]. Abbildung 4 zeigt eine Explosionszeichnung des verwendeten Lasteinleitungsrahmens. Der Stahlrahmen Figure 3: Section through the used model

# **Experimental investigations**

Investigations of quadruple fastenings under torsion loading do not exist so far. Therefore a first step is to arrange the loading of the steel plate. A detailed discussion about the way of applying the torsion loading can be found in [5]. Figure 4 shows an exploded view of the used load application frame. The steel frame will be rotated by pulling on the tension wird durch gleichmäßige Lastaufbringung auf die Zugstangen verdreht. In Abhängigkeit der zu prüfenden Achsabstände können verschiedene Stahlplatten in den Rahmen eingesetzt werden. rods equally. Depending on which anchor spacing is tested, different steel elements can be inserted into the frame.



**Abbildung 4:** *Explosionszeichnung des Lasteinleitungsrahmens und der Stahleinsätze* **Figure 4:** *Exploded view of the load application frame and the steel elements* 

Abbildung 5 zeigt den Versuchsaufbau. Alle Versuche wurden mit Injektionsdübeln in Betonplatten aus Normalbeton C20/25 mit den Abmessungen 360 mm x 1635 mm x 1635 mm durchgeführt. Nach der Ausrichtung des Prüfkörpers und des Stahlrahmens werden zwei Querkräfte (eine senkrecht zur Bauteilkante und eine weg vom Bauteilrand) so über Zylinder mit zwei Zugstangen eingeleitet, dass der Rahmen sich gleichmäßig um seinen Mittelpunkt verdreht. Somit ergibt sich eine reine Torsionsbeanspruchung. Um eine gleichmäßige Verdrehung sicherzustellen, müssen die Schläuche zwischen den Zylindern und der Weiche dieselbe Länge haben. Um das Lastverschiebungsverhalten der einzelnen Bolzen auszuwerten werden 4 Messaufnehmer entsprechend Abbildung 5 installiert. Alle Messaufnehmer werden so ausgerichtet, dass sie nur auf Zug beansprucht werden. Zusätzlich kann über die Verschiebungen eine Aussage über die Verdrehung des Rahmens gemacht werden. Die Ölzufuhr wird so gesteuert, dass das Versagen zwischen 300 und 600 Sekunden auftritt.

Figure 5 shows the test set-up. All tests were conducted in slabs measuring 360 mm x 1635 mm x 1635 mm. The concrete specimen was of normal-weight concrete C20/25. All anchors were post-installed injection type bonded anchors. After installing the specimen and the steel frame, two shear forces (one perpendicular to the edge and one away from the edge) were applied to the tension rods by means of hydraulic actuators in such a way that the steel frame was loaded equally and rotated around the midpoint of the steel element. Thus an absolute torsion moment was simulated. To ensure this the two flexible tubes between the hydraulic jacks and the switch must have the same length. In order to analyze the load displacement behavior of the several anchors 4 gauges were installed on the concrete specimen (see Figure 5). All gauges were installed such that they were loaded by tension forces only. Furthermore they give information on the rotation of the steel frame. The oil flow is controlled such that the load maximum occurs after 300 to 600 seconds.



Abbildung 5: Versuchsaufbau

Figure 5: test set-up

# Ergebnisse

Sowohl in den numerischen als auch in den experimentellen Untersuchungen konnte ein Betonkantenbruch beobachtet werden. Die Bruchbilder der Versuche stimmen gut mit dem numerischen Bruchverhalten überein (Abbildung 6).



Abbildung 6: Vergleich der Bruchbilder Figure 6: Comparison of the crack patterns

Eine ausführliche Diskussion der numerischen und experimentellen Ergebnisse ent-

# Results

The crack pattern agrees well between the numerical and the experimental investigations. Both in the numerical and in the experimental investigations a concrete cone failure can be observed (see Figure 6).



Abbildung 7: Vergleich der Bruchmomente Figure 7: Comparison of torque moments at failure

A detailed discussion of the numerical studies and the test results can be found in [5]. To hält [5]. Um die experimentell und numerisch ermittelten Versagenslasten zu vergleichen, werden die Bruchlasten auf eine Betondruckfestigkeit von 30 N/mm<sup>2</sup> normiert. Die Auswertung hat gezeigt, dass die Bruchlasten beziehungsweise die Torsionsbruchmomente der FE-Berechnungen gut mit den Ergebnissen aus den Versuchen übereinstimmen (Abbildung 7). Einen kurzen Überblick über die Untersuchungen gibt Tabelle 1. compare the ultimate loads of the tests and the numerical analysis the measured failure loads were normalized to a compressive strength of 30 N/mm<sup>2</sup>. The evaluation has shown that the ultimate loads respectively the torque moments at failure of the FEcalculations coincide reasonably well with the test results (Figure 7). A brief summary of the experimental and numerical investigations are presented in Table 1.

Tabelle 1:Ergebnisse der numerischen und experimentellen UntersuchungenTable 1:Summary of the experimental and numerical investigations

| Edge distance<br>(Randabstand)   | c <sub>1</sub> [mm] | 100   | 100  | 100   | 100  | 100  | 125  | 100  | 100   |
|--|---------------------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| Anchor spacing<br>(Achsabstand)  | s <sub>1</sub> [mm] | 100   | 50   | 100   | 50   | 100  | 50   | 50   | 130   |
|  | s <sub>2</sub> [mm] | 100   | 50   | 100   | 100  | 50   | 50   | 130  | 50    |
| <b>Diameter</b><br>(Durchmesser)                                       | d [mm]              | 16    | 16   | 24    | 16   | 16   | 16   | 16   | 16    |
| Embedment depth<br>(Verankerungstiefe)                                 | l <sub>f</sub> [mm] | 80    | 80   | 130   | 80   | 80   | 80   | 80   | 80    |
| M <sup>T</sup> <sub>u.test</sub>                                       |                     | 10,53 | 4,79 | 13,9  | 4,73 | 7,9  |      |      |       |
| scaled to 30 N/mm <sup>2</sup><br>(normiert auf 30 N/mm <sup>2</sup> ) | [kNm]               | 8,88  | 4,5  | 14,97 | 5,17 | 9,25 | -    | -    | -     |
|  |                     | 10,9  | 4,52 | 14,57 | 6,89 | 9,69 |      |      |       |
| M <sup>T</sup> <sub>u,num</sub>  | [kNm]               | 10,04 | 4,59 | 14,34 | 5,74 | 8,89 | 5,45 | 7,17 | 11,47 |

# Torsionsbruchmoment bei Betonkantenbruch

Auf Basis der theoretischen Überlegungen und der experimentellen und numerischen Untersuchungen wurde ein Bemessungskonzept entwickelt. Eine ausführliche Erläuterung hierzu enthält [5]. Im Folgenden sollen lediglich die erarbeiteten Bemessungsmodelle kurz vorgestellt werden.

# Interaktion

Um beide Achsabstände  $s_1$  und  $s_2$  (senkrecht und parallel zum Bauteilrand) zu berücksichtigen wird eine Interaktion zwischen zwei senkrecht zueinander stehenden Befestigungsgruppen vorgeschlagen. Abbildung 8 zeigt die Zerlegung der Vierfachbefestigung in die Ersatzgruppe.

# Torsion failure moment associated with concrete edge breakout

Based on the theoretical considerations and the experimental and numerical investigations design recommendations were developed. A detailed discussion can be found in [5]. In the following only the different design proposals should be presented.

# Interaction

To include both anchor spacing  $s_1$  and  $s_2$  (perpendicular and parallel to the edge) an interaction between two double fastenings located perpendicular to each other is recommended. Figure 8 shows the idealization by breaking down the quadruple fastening to two double fastenings.



**Abbildung 8:** Zerlegung der Vierfachbefestigung in ein Ersatzsystem **Figure 8:** Substitution of a quadruple fastening by two groups with two anchors

Entsprechend Abbildung 8 basiert die Bemessung auf der Interaktion zwischen einer senkrecht und einer parallel zum Bauteilrand beanspruchten Zweifachbefestigung. Diesen Ansatz zeigt Gleichung 1. According to Figure 8 the design recommendation is based on an interaction between two anchor groups. This approach is given in Equation 1.



Abbildung 9 zeigt verschiedene Interaktionsansätze. Hierbei steht  $V_{u,c,\alpha,invest.}$  für die numerischen und experimentellen Bruchlasten. Below different interaction approaches are considered.  $V_{u,c,\alpha,invest.}$  shows the numerical and the experimental investigations.



Abbildung 9: Vergleich verschiedener Interaktionsansätze Figure 9: Comparison of different interaction approaches

Abbildung 9 zeigt, dass eine elliptische Interaktion (k = 1,5) gut mit den numerischen und experimentellen Ergebnissen übereinstimmt. Um jedoch aufgrund der geringen Anzahl an Untersuchungen eine ausreichende Sicherheit zu gewährleisten, wird eine lineare InterFigure 9 shows that an elliptical interaction (k = 1,5) agrees well with the numerical and experimental investigations. However, in order to ensure an adequate suitability according to the limited number of investigated parameters a linear interaction is recom-

aktion vorgeschlagen. Der Widerstand einer Vierfachbefestigung gegen Torsionsbeanspruchung ergibt sich somit nach Gleichung 2. mended. The resistance of a quadruple fastening under torsion loading can be calculated according to Equation 2.

$$M^{T}_{u,c} = \frac{s^{2}}{\left[\left[\frac{s_{2}}{V_{u,c,0^{\circ}}}\right] + \left[\frac{s_{1}}{V_{u,c,90^{\circ}}}\right]\right]}$$

[kNm]

(2)

mit/ with:  $s_1, s_2, V_{u,c,0^\circ}, V_{u,c,90^\circ}$  entsprechend Abbildung 8 (according to figure 8)

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2}$$

# CEB – Fastenings to structural concrete and masonry – Bemessungsleitfaden

Der oben vorgeschlagene Bemessungsansatz ist nur für reine Torsionsbelastung anwendbar. Im Fall einer kombinierten Querund Torsionsbelastung kann der Widerstand entsprechend den Bemessungsrichtlinien des CEB berechnet werden. Abbildung 11 zeigt, dass dieser Ansatz gut mit den numerischen und experimentellen Untersuchungen übereinstimmt.

# CEB – Fastenings to structural concrete and masonry - Design guide

The proposed design recommendation above is only applicable for torsion loading. In case of combined shear and torsion loading the resistance can be calculated according to the design recommendation of the CEB. Figure 11 shows that this design approach agrees well with the numerical and experimental investigations.



 $+ s_2 +$ 

Abbildung 10: CEB-Bemessungsansatz (Vierfachbefestigung unter kombinierter Quer- und Torsionsbelastung)

Figure 10: CEB-design proposal (group of four anchors subjected to combined shear and torsion)

$$V_{u,c} = V^{0}_{u,c} \cdot \frac{A_{c,V}}{A^{0}_{c,V}} \cdot \psi_{ec,V} \cdot \psi_{\alpha,V} \cdot \psi_{g,V} \qquad [kN]$$

mit/ with:

V<sup>0</sup><sub>u,c</sub> = Betonkantenbruchlast eines Einzeldübels (concrete edge breakout load of a single anchor) (3)



$$\psi_{\alpha,V} = \sqrt{\frac{1}{\left(\cos\alpha_{V}\right)^{2} + \left(\frac{\sin\alpha_{V}}{\psi_{90^{\circ},V}}\right)^{2}}} \ge 1,0 \quad [-] \qquad (4)$$

$$\psi_{ec,V} = \frac{1}{1 + 2 \cdot e_V / 3 \cdot c_{1,1}} \le 1,0 \quad [-] \tag{5}$$

$$\psi_{g,V} = \frac{1}{n_2} \cdot \left( 1 + \frac{s_1}{(n_2 - 1) \cdot 0,75 \cdot c_{1,1}} \right) \le 1,0 \quad [-] \qquad (6)$$

$$M^{T}_{u,c} = \frac{V_{u,c}}{V_{s,res}} \cdot M^{T} \qquad [kNm]$$
(7)

**Abbildung 11:** Vergleich des CEB-Bemessungsansatzes mit den num. und exp. Untersuchungen **Figure 11:** Comparison of CEB-design proposal with the numerical and experimental investigations

۱

# Zusammenfassung

Die durchgeführten Versuche und Simulationen sind die ersten Untersuchungen zu torsionsbelasteten Vierfachbefestigungen mit begrenzter Variation des Durchmessers, der Achs- und Randabstände. Aus diesem Grund ist das erarbeitete Bemessungsmodell als erste Grundlagenforschung zu verstehen und nicht als abgeschlossenes und endgültiges Bemessungskonzept.

#### Summary

The experimental and numerical investigations constitute the first analysis on torsion loaded quadruple fastenings close to the edge with limited variations on anchor diameter, spacing and edge distance. Therefore the proposed recommendations have to be classified as a first basic research and not as an enclosed and definite design concept.

#### Literatur / References

- [1] **Fuchs, W.; Eligehausen, R.; Breen, J.E (1995):** Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete. ACI Structural Journal, Vol. 92, 1995.
- [2] Eligehausen, R.; Mallée, R.; Silva, J.F. (2006): Anchorage in Concrete Constrution. Ernst & Sohn, Berlin, 2006.
- [3] **Hofmann, J. (2004):** "Tragverhalten und Bemessung von Befestigungen unter beliebiger Querbelastung im ungerissenen Beton", Dissertation, Universität Stuttgart, Institute of Construction Materials, Stuttgart, 2004.
- [4] **Appl, J. (2007):** "Tragverhalten von Verbunddübeln in ungerissenem und gerissenem Be ton", Dissertation in Vorbereitung, Universität Stuttgart, Institute of Construction Materials, Stuttgart, 2007.
- [5] **Grosser, P. (2007):** "Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Bemessung von Befestigungen am Bauteilrand unter Querlasten", Abschlussbericht DFG-Forschungsvorhaben EL 72/13-2, Universität Stuttgart, Institute of Construction Materials, Stuttgart, 2007.
- [6] CEB (2007): Fastenings to structural concrete and masonry Design Guide Parts 1-6 (unveröffentlichter Vorentwurf, Oktober 2007)

# UNTERSUCHUNG DER ROTORBLÄTTER VON WINDENERGIEANLAGEN MIT AKUSTISCHEN VERFAHREN

INSPECTION OF WIND TURBINE BLADES USING ACOUSTIC TECHNIQUES

von/by Anne Jüngert

### Einleitung

Im Hinblick auf den Klimawandel gewinnt die Nutzung von erneuerbaren Energien zunehmend an Bedeutung. In Europa wurden 2005 6,7% der verbrauchten Energie aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen. In den sonnenärmeren Regionen in Mitteleuropa und den USA spielt die Nutzung der Windenergie eine große Rolle. In den letzten zehn Jahren wuchs die Windenergieindustrie um 32% pro Jahr. Es werden immer größere Windenergieanlagen gebaut und die Windparks werden ausgeweitet. Je näher die Anwohner an einer Windenergieanlage leben umso wichtiger wird auch die Sicherheit der Anlagen. Obwohl in der Vergangenheit kaum Personenschäden bei Windradunfällen zu bezeichnen waren, ist jedoch jeder Ausfall einer Anlage mit einem erheblichen finanziellen Schaden auf Seiten des Betreibers verbunden. Mithilfe zerstörungsfreier Prüfverfahren können Schädigungen in den Rotorblättern der Windenergieanlagen frühzeitig erkannt werden und in Zukunft Unfälle verhindern. Im Rahmen eines InnoNet-Projektes des Projektträgers VDI/VDE, finanziert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, sollen solche Prüfmethoden für die Praxis entwickelt werden.

# Stand der Technik

Windenergieanlagen sind Bauwerke und müssen in regelmäßigen Abständen von einem Sachverständigen überprüft werden. Hierbei wird die Standsicherheit beurteilt. Die Überprüfung der Rotorblätter ist ein wichtiger Bestandteil, beschränkt sich momentan allerdings auf eine visuelle Prüfung und ein Abklopfen kritischer Bereiche. Diese Vorgehensweise verlangt ein hohes Maß an Erfahrung seitens des Gutachters.

Akustische Verfahren sind gut zur Inspektion

#### Introduction

Facing the climate change the use of renewable energies gains in importance. In the European Union 6.7% of the energy consumption was satisfied by renewable energy sources in 2005. The regions without high sunshine rates in central Europe and the USA focus on the use of wind energy. Wind energy increases by 32 % each year in the past ten years. More powerful and bigger wind energy plants are built and existing wind farms are being enlarged. The more people live nearer to wind parks the more important becomes the security of the windmills. Although there haven't been dramatic personal injuries during windmill accidents in the past, every breakdown means a major financial loss for the operator of the wind farm. Using non-destructive testing techniques, damages inside the wind turbine blades can be detected early and major breakdowns can be avoided. During a so-called InnoNet-Project project executing by the organization VDI/VDE, funded by the German Ministry for Economy and Technology, such techniques will be developed for practical applications.

# State of the art

Wind energy plants are buildings and therefore have to be inspected by authorized experts at regular intervals. The structural safety is evaluated in this expertise. The inspection of the turbine blades is an important part of the investigation. These investigations are for lack of suitable techniques limited to visual inspections and simple tapping test of critical areas. For this purpose the experts have to bring a high level of experience.

As acoustic techniques are very stable and

von Rotorblättern geeignet, da sie auch außerhalb des Labors bereits in verschiedenen Bereichen der Bauwerksuntersuchungen erfolgreich angewandt werden. Im Gegensatz zu anderen zerstörungsfreien Prüfmethoden werden die akustischen Verfahren nicht stark durch die Außentemperatur oder die Luftfeuchtigkeit während der Messung beeinflusst. already approved for usage at real buildings outside the laboratory they are convenient for the inspection of wind turbine blades. Unlike other non-destructive testing techniques, acoustic techniques are not as badly affected by Temperature or air humidity.



Abb.1: Untersuchung eines Rotorblattes. Der Gutachter seilt sich von der Rotorblattnabe ab und untersucht die Vorder- und Hinterkante visuell.

Fig.1: Inspection of a wind turbine blade. The expert ropes from the rotor and inspects the leading and the trailing edge.

# Rotorblattaufbau und Schadensbilder

Die Rotorblätter von Windenergieanlagen werden in Leichtbauweise gefertigt. Sie bestehen meist aus einem Verbund von faserverstärkten Kunststoffen und Holz oder Kunststoffschäumen. Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) werden aufgrund des geringeren Preises kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) vorgezogen.

Ein typischer Querschnitt ist in Abb.2 zu sehen. Ein Rotorblatt besteht aus den zwei Hauptgurten, auf denen die zwei Stege zur Stabilisierung des Blattes befestigt sind.

Die Vorder- und die Hinterkante sind im Betrieb besonders stark belastet. Häufig treten hier Delaminationen auf. Auch an anderen Stellen im Rotorblatt können sich einzelne

# Wind turbine blades and damage

Wind turbine blades are produced as lightweight construction. They are composed of a composite of fiber reinforced plastics and wood or plastic foam. Because of the lower price, glass fiber reinforced plastics (GFRP) are preferred to carbon fiber reinforced plastics.

A typical cross section of a turbine blade is shown in Figure 2. A turbine blade consists of two main belts, on which the two bars are fixed to stabilize the blade.

The leading edge and the trailing edge are heavy loaded by the wind power during operation. Delaminations often are found at the edges. However, debonding of layers can appear in all parts of the blade within the Laminatschichten oder das Sandwich voneinander lösen. Weitere Problemstellen sind die Verklebungen der zwei Rotorblatthälften. Da die Verklebung bedingt durch die Bauweise einseitig blind erfolgt, kann nicht gewährleistet werden, dass alle Bereiche gleichmäßig mit Klebstoff bedeckt sind und zwischen den beiden Hälften tatsächlich ein Verbund besteht. laminate or the sandwich areas. Other problematic regions are all bonding areas, where the two blade halves are stuck together. Due to the construction, the bonding has to be done blind. It's not possible to check if the glue is evenly spread and if there's bond between the two halves during the production.



- Abb.2: Typischer Querschnitt eines Rotorblattes. Die im Bild obere Seite wird als Druckseite bezeichnet, die untere Seite als Saugseite. 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 GFK (A). In anderen Bereichen (B) sind zur Gewichtseinsparung Holz oder Kunststoff schäume in Sandwichbauweise eingebracht.
- Fig.2: Typical cross-section of a wind turbine blade. The upper side in the picture is called pressure face the lower side is called intake side. On the left the leading edge (1) and the trailing edge (2) can be seen. The bars (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.

# Lokale Resonanzspektroskopie

Die bisherigen Klopfprüfungen an Rotorblättern sollen ersetzt werden durch eine lokale Resonanzspektroskopie. Hierfür wird das Rotorblatt mit einem geeigneten Hammer abgeklopft und der dadurch entstehende Klang mit einem Mikrofon aufgezeichnet. Eine Änderung im Frequenzgehalt kann auf eine innere Schädigung des Rotorblatts hindeuten. Zusätzlich wird das Anregungssignal des Hammers mit aufgezeichnet und kann als Indikator für oberflächennahe Delaminationen dienen.

Im Folgenden sind die Ergebnisse einer Messung an einem Probestück mit bekannter Schädigung dargestellt.

#### Local Resonance Spectroscopy

The tapping test normally done by the experts should be replaced by a local resonance spectroscopy. The turbine blade is tapped using a suitable hammer and the excited sound is recorded using a microphone. A change in the frequency content of the signal can indicate damaged areas within the turbine blade. Additionally the excitation signal of the hammer is recorded and can be used to detect shallow delaminations.

In the following the results of a measurement at a blade test specimen with known damage are shown.



Abb.3: Anregungssignal des Hammers auf Kunststoffschaum (schwarz, oben), GFK (rot, Mitte) und delaminiertem GFK (blau, unten).

Fig.3: Excitation signal of the hammer on plastic foam (black, top), GRFP (red, middle) and delaminated GRFP (blue, bottom).

In Abb. 3 sind die Zeitreihen der Hammeranregung an verschiedenen Stellen des Probestückes dargestellt.

Das Hammersignal auf delaminiertem GFK (blau, unten) oder auf Kunststoffschaum (schwarz, oben) ist breiter als auf ungeschädigtem GFK (rot, Mitte). Das liegt daran, dass die Kontaktzeit des Hammers mit dem Probestück sich vergrößert, wenn der Untergrund weicher ist. Eine Betrachtung des Anregungssignals kann bei bekanntem Bauplan zur Detektion oberflächennaher Schäden verwendet werden.

Der durch den Hammer erzeugte Schall wird mit einem Mikrofon aufgezeichnet und im Frequenzbereich weiter verarbeitet. In Abb.4 sind die normierten logarithmischen Amplitudenspektren des aufgezeichneten Klangs dargestellt. Die Messungen wurden nummeriert. Die Anregung erfolgte bei den Messungen mit den Nummern 22 bis 32, 54 bis 64 und 86 bis 96 auf geschädigtem Untergrund. Die Bereiche sind in Abb. 4 markiert. In diesen Bereichen ist in den Frequenzspektrum eine Änderung zu sehen. Es treten erhöhte Amplituden in den Frequenzbereichen zwischen 2 kHz und 5 kHz auf. The excited sound of the hammer is recorded using a microphone. The analysis takes place in the frequency domain. Fig. 4 shows the normalized logarithmic amplitude spectra of 128 measurements on the test specimen. The sound of the measurements 22 to 32, 54 to 64 and 86 to 96 is excited on damaged areas. These areas are marked in the figure. A change in the frequency content is visible in the damaged areas. The frequencies between 2 kHz and 5 kHz are higher than in the intact areas.

Figure 3 shows the time series of the excitation signals of the hammer, tapping on different areas of the test specimen.

The Signal on the delaminated GFRP (blue, bottom) and on the plastic foam (black, top) is broader than the signal on intact GFRP (red, middle). This broadening of the pulse is caused by the longer contact time of hammer and surface if the subsurface is more flexible. The excitation signal can therefore be used to detect shallow delaminations within the turbine blade.



Abb.4: Normierte logarithmische Amplitudenspektren der aufgezeichneten Klangsignale. Die geschädigten Bereiche sind gekennzeichnet

Fig.4: Normalized logarithmic amplitude spectra of the recorded sound signals. Damaged areas are marked.

Die Verklebungen der Rotorblatthälften können mithilfe des Impuls-Echo-Verfahrens überprüft werden. Eine visuelle Prüfung im Innern des Rotorblattes ist in der Regel bedingt durch die geringe Höhe nicht möglich. Beim Impuls-Echo-Verfahren wird von außen ein Ultraschallpuls in das Material gesendet. Die Welle wird an der Rückwand oder an einem Luftspalt reflektiert und vom gleichen Prüfkopf wieder registriert. Die Lage der Reflektion auf der Zeitachse gibt Auskunft über die Dicke der Schichten und somit über die Qualität der Verklebung. Mit einem Hochvolt-Ultraschallpuls ist es so möglich sogar durch zentimeterdicke Glasfaserlaminate hindurch die Verklebungen zu beurteilen.

# Zusammenfassung

Akustische Verfahren eignen sich gut zur Prüfung der Rotorblätter von Windenergieanlagen, da sie relativ robust gegenüber Wettereinflüssen sind und auch draußen funktionieren.

Mit Hilfe einer lokalen Resonanzspektroskopie können Delaminationen in den Laminat-

The bond between the two halves of the turbine blade can be investigated using the impulse-echo-technique. A visual inspection of the interior of the blade is normally not possible because the blade is to narrow to go inside. Using impulse-echo an ultrasonic pulse is send into the material from the outside surface of the blade. The acoustic wave is reflected at the back wall of the composite layers or at air gaps within the composite. The position of the reflection signal on the time axis tells about the layer thickness and therefore about the condition of the bonding. Using a high-voltage pulse it is possible to check bonding through several centimeters of GFRP laminates.

# Conclusions

Acoustic techniques are suitable for the inspection of wind turbine blades because they are robust against weather and are already approved as outside techniques.

Using a local resonance spectroscopy delaminations within the laminate belts can be detected. A change in the frequency content gurten detektiert werden. Eine Änderung im Frequenzgehalt eines mit einem Hammer erzeugten Klangs deutet auf eine strukturelle Veränderung des Rotorblattes hin. Die lokale Resonanzspektroskopie kann automatisiert werden und so die bisher üblichen manuellen Klopfprüfungen bei den wiederkehrenden Inspektionen der Windenergieanlagen ersetzen.

Insbesondere die Stegverklebungen konnten mit den bisherigen Prüfmethoden der Sachverständigen nicht inspiziert werden, sind jedoch für den Zustand des Rotorblattes entscheidend. Mit Hilfe des Impuls-Echo-Verfahrens können diese Verklebungen nun von der Außenseite des Rotorblattes zerstörungsfrei untersucht werden und fehlerhafter Verbund so frühzeitig festgestellt werden. Die Verwendung von koppelmittelfreien US-Sensoren soll die Prüfmethode in Zukunft noch beschleunigen.

Mit Hilfe der akustischen Verfahren können große Unfälle und langfristige Ausfallzeiten an Windenergieanlagen verhindert werden. of a sound excited with a hammer, points to structural variations within the blade materials. The local resonance spectroscopy can be automated and replace the common manual tapping test during recurrent inspections of the windmills.

The bonding of the bars couldn't be inspected using the present testing techniques. Especially these areas are very important for the condition of the turbine blade. Using the Impulse-Echo-Technique the bonding areas can be investigated from the outside of the blade. Missing or kissing bond areas can be detected early. Using ultrasonic sensors without couplant the inspection time for impulse-echo will be reduced.

Using acoustic techniques major accidents at wind turbines and long downtimes can be avoided.

# Literatur / References

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: *Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung*. www.bmu.de, 2007

Diagnoseeinrichtung – Delaminations-Prüfvorrichtung.

http://www.iabg.de/transrapid/leistungen/diagnose/delamination\_de.php.

- InnoNet Förderung von innovativen Netzwerken. http://www.vdivde-it.de/innonet
- Große, C. U.: *Akustische Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Baustoffen und Bauteilen.* Habilitationsschrift (habilitation thesis), University of Stuttgart, 2005, 150 p.
- Sutherland, H.; Beattie, A.; Hansche, B.; Musial, W.; Allread, J.; Johnson, J; Summers, M.: *The Application of Non-Destructive Techniques to the Testing of a Wind Turbine Blade.* Sandia Report SAND93-1380, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1994.

# NBB – NACHHALTIG BAUEN MIT BETON - LEBENSDAUERMANAGEMENT SUSTAINABLE CONSTRUCTION WITH CONCRETE – LIFE-CYCLE-MANAGEMENT

von/by Sylvia Keßler

# Einleitung

Bauwerksbestände werden immer älter und müssen mit begrenzten finanziellen Mittel unterhalten werden. Für Betreiber großer Bauwerksbestände wie beispielsweise Kommunen stellt ein Lebensdauermanagementsystem (LMS) die Möglichkeit dar, ihre verfügbaren finanziellen Mittel zur Erhaltung der Gebrauchstauglichkeit optimal während aller Lebensphasen eines Bauwerkes einzusetzen. Ein LMS ist ein systematischer Ansatz zur Organisation und Durchführung aller Aktivitäten, welche im Zusammenhang mit den Phasen der Planung, Bemessung, Konstruktion, Abnahme, Bauwerksüberwachung während der Nutzung (Monitoring), Instandhaltung, Ertüchtigung und Abriss inklusive Recycling eines Bauwerks stehen. Innerhalb des Projektes wurden im Rahmen der ersten Förderphase wesentliche Bausteine eines derartigen LMS und die Anforderungen, die seitens des Nutzers an diese Bausteine gestellt werden, identifiziert. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf prädiktive LMS gelegt, die durch frühzeitiges Erkennen möglicher Schädigungen und zuverlässiges Vorhersagen der Zustandsentwicklung eine wirtschaftlich optimierte und nachhaltige Bauwerksunterhaltung ermöglichen [1]. Wesentliche Elemente eines LMS sind in der Abbildung 1 dargestellt.

Ein Lebensdauermanagementsystem ist vor allem bei Bauwerken zweckmäßig, deren Nutzungsdauer durch die technische Lebensdauer bestimmt wird. Zu diesen Bauwerken zählen Infrastrukturbauwerke wie Brücken, Tiefgaragen oder Tunnel.

#### Introduction

Construction will be older and have to maintain with limited financial means. Operators of building stocks like communes can use a life cycle management system (LMS) to adopt optimal her availible means to maintance the serviceability during the life time of a construction. A life cycle management system is a systematic way of the organisation and the activities, which are in the context of planning, design, construction, acceptance test, inspection and monitoring, maintance, repair and demolition including the recycling of a structure. During the first part of the project was indentified the fundamental elements of such a life cycle management and the requirements of the user. A decision was made to develope a predictiv LMS. With a predictiv LMS it is possible to detect early potential deterioration and to predict reliable the developement of the condition. With this information a LMS can be design in a economical and sustainable way. Core Elements of Modular Life Cycle Management Systems are shown in figure 1.

A life cycle management system is appropiate for structures, whose useful life is determined by their tecnical life time. One of this type of structures are infrastructure buildings like bridges, basement garages or tunnels.



Abb.1: Wesentliche Bausteine eines modularen LMS [1] Fig.1: Core Elements of Modular Life Cycle Management Systems [1]

Das Teilprojekt Lebensdauermanagement ist eingebettet in Verbundforschungsdas vorhaben "Nachhaltig Bauen mit Beton" gefördert durch den Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) und das Bundesfür Bildung und Forschung ministerium (BMBF). Die einzelnen Arbeitsschritte zur Erstellung des LMS (Abb. 2) werden von unterschiedlichen Instituten bearbeitet: Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TUM (cbm), Lehrstuhl für Bauinformatik der TUM (LBI), Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig (iBMB), Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Uni Stuttgart (IWB).

Das IWB untersucht in diesem Zusammenhang die Zustandserfassungsmethoden an Bauwerken mit dem Schwerpunkt auf die diskontinuierlichen Messverfahren.

The subproject life cycle management is part of the project "sustainable construction with concrete", which is promoted by the Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DafStb) and the Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Different institutes are involved to design the details of the life cycle management system (fig. 2): Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TUM (cbm), Lehrstuhl für Bauinformatik der TUM (LBI), Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig (iBMB), Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Uni Stuttgart (IWB).

In this context the IWB investigate the methods of condition control with focus of the discontinous measurement procedures.



Abb.2: Struktur des Teilprojektes LebensdauermanagementFig.2: Structure of the subproject Life Cycle Management

# Zustandserfassung

Zustandsprognosen von Bauwerken werden mit Hilfe der Ergebnisse aus der Zustandserfassung durchgeführt. Die Zustandserfassung ist daher einer von drei wichtigen Bestandteilen der Lebensdauerbemessung (Abb. 3). Durch das Implementieren von neuen Informationen wird die Zuverlässigkeit der vorherigen Prognose zugeschärft.

# **Condition Control of Structures**

The results from the condition control take into the calculation of the condotion prediction of the structure. Therefore the condition control is one of the three most important elements of the life cycle design (fig. 3). The reliability of the former prediction rises by implementation of new informations.



Abb.3: Update der probabilistischen Lebensdauerbemessung [2] Fig.3: probabilistic re-design process [2]

Die Prognose dient anschließend zur Planung der zukünftigen Zustandserfassungen. Ort, Umfang und Zeitpunkt von Bauwerksinspektionen werden auf die zu erwartende Zustandsentwicklung abgestimmt.

# Parameter

Der Schwerpunkt der Bauwerksuntersuchungen zur Zustandserfassung liegt auf der Detektion von Bewehrungskorrosion. Es werden folgende Parameter am Bauwerk bestimmt: Betondeckung, Carbonatisierungstiefe, Chloridprofil und Potentialfeld.

Eine ausreichend dicke Betondeckung ist eine wichtige Voraussetzung zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen. Ist die Betondeckung größer als die Carbonatisierungstiefe oder auch die Eindringtiefe des kritischen Chloridgehaltes, ist die Bewehrung vor Korrosion geschützt. Ist die Carbonatisierungstiefe zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt, so lässt die Prognose zuschärfen, wann die Carbonatisierungsfront mit eine bestimmten Wahrscheinlichkeit die Bewehrung erreichen wird. Das gleiche gilt für den Chloridgehalt. Ist das Chloridprofil zum Zeitpunkt t gemessen worden, kann die Wahrscheinlichkeit genauer berechnet werden, wann der kritische Chloridgehalt zur Bewehrung vordringt. Mit Hilfe der Potentialfeldmessung können Korrosionsherde an der Stahlbewehrung im Beton lokalisiert werden, da sich durch Korrosion Potentialdifferenzen an der Bewehrung aufbauen. Die Ergebnisse geben zwar keine Auskunft über den Korrosionsgrad der Bewehrung, doch kann festgestellt werden, wo der Stahlbeton von der Depassivierungsphase in die Schädigungsphase übergegangen ist. Um wirtschaftlich zu handeln, ist es ebenfalls notwendig den Untersuchungsablauf zu koordinieren. Die Abstimmung des Ablaufes ist von Bedeutung, da aus den unterschiedlichen Messungen Messergebnisse mit unterschiedlicher Messgenauigkeit resultieren. Zuerst ist eine Allgemeine in-situ BeThan the prediction provide a basis for the future condition controls. Position, scope and date of inspections will be coordinated to the expected condition progress.

# Parameter

The inspections of the condition control are focused on the detection of reinforcement corrosion. The following parameters will be determined on the structure: concrete cover, carbonation depth, chloride profil and potential mapping.

A sufficient concrete cover is an important assumption to guarantee the durability of reinforced concrete structures. If the concrete cover is larger than the carbonation depth or the depth of penetration of the critical chlorid content, the reinforcement will be protected against corrosion. If the carbonation depth is known at a specific date, it is possible to predict with a certain probability, when the carbonation front will reach the reinforcement. The procedure is the same for the chlorid content. The chloride profil will be determined to the time t, than the probability can be calculated, when the critical chloride content will reach the reinforcement. The potential mapping locates where reinforcement corrosion is going on in a structure. The results not provide information about the corrosion intensity. but it can be determined, where the reinforcement has changed from the depassivation period into the deterioration period. It is also necessary to coordinate the inspection procedure, because the different measurements provide results with different precision of measurement. First a general in-situ survey is to be made followed by a detailed insitu investigation. After this areas with remarkable results will be checked once more in laboratory investigations [3](fig. 4). Additionally the costs of each test will be related to the obtaines insight. With this knowledge economic valuation can be made to define the scope of inspection.

gutachtung vorzunehmen und im Anschluss eine vertiefende in-situ Untersuchung. Danach sollten kritische Bereiche einer Laboruntersuchung unterzogen werden [3] (Abb. 4). Zusätzlich werden die Kosten einer jeden Prüfung in Verhältnis zu ihrem Erkenntnisgewinn gebracht. Somit können Wirtschaftlichkeitsberechnungen zur Festlegung des Untersuchungsumfanges eingesetzt werden.



Abb.4: Information in Abhängigkeit des Untersuchungsniveaus [3] Fig.4: Type of information in dependence on the different levels of investigation [3]

Die vorhandenen gualitativen Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der einzelnen Parameter werden hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit bzw. Streuungen bewertet. Die Zuverlässigkeit setzt sich zusammen aus der Messunsicherheit und der Unsicherheit aus der Interpretation der Messergebnisse. Als Synonym der Zuverlässigkeit einer Testmethode wird auch der Ausdruck "Probability of detection" (POD) verwendet. Messunsicherheiten können beispielsweise aus der Testmethode selber resultieren, aus systematischen als auch zufälligen Störungen, menschlichen Einfluss bei der Durchführung und Interpretation der Auswertung der Messwerte.

The available inspection tests will be evaluated regarding their reliability respectively their variance. The reliability is made up of uncertainty of measurement and the uncertainty resulting from interpretations of the test results. As a synonym of reliability of test results is used the expression "Probability of detection" (POD). Uncertainty of measurements are caused by the testing method itself, the systematic and random interferences of the testing method and results from the data interpretation.

# Zusammenfassung

Für Betreiber großer Bauwerksbestände ist ein nachhaltiges und wirtschaftliches Lebensdauermanagement ihrer Bauwerke aufgrund sinkender Finanzmittel eine große Aufgabe. Lebensdauermanagementsysteme können Instandhaltungsprogramme zukünftig auf eine einheitliche Grundlage unter Berücksichtigung Kosten-Nutzenvon Rechnungen stellen. Zustanderfassungsmethoden helfen, den Schädigungsgrad zu bewerten als auch die probabilistische Schädigungsprognose zu erstellen. Das IWB wird in diesem Projekt, die Aussagesicherheit (Probability of detection) der Zustandserfassungsmethoden untersuchen. Mit den Ergebnissen können somit Lebensdauermanagementsysteme optimiert werden.

# Conclusions

A sustainable and economic life cycle management due to falling financial resources is of particular importance to the operators of building stocks. Life cycle management systems can provide a basis for future maintenance programme in consideration of the cost-benefit calculation. Condition control methods estimate degradation level and determine the parameter for the update of the life time prediction. The IWB investigate in this project the probability of detection of the condition control methods. Life cycle management systems will be optimize with the results.

# Literatur / References

- [1] Schießl, P.; Mayer, T.: Lebensdauermanagementsystem Teilprojekt A2. In: Schlussbericht zur ersten Phase des DafStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens "Nachhaltig Bauen mit Beton". Schriftenreihe des Deutsches Ausschusses für Stahlbeton (2007), Nr. 572
- [2] Siemes, T.: Framework for monitoring and inspection of the service life of tunnels. DARTS-Durable and Reliable Tunnel structures, European commission, Growths 2000, Contract G1RD-CT-2000-00467, Project GrD1-25633,2002
- [3] Gehlen, Ch.; Dauberschmidt, Ch.; Nürnberger, U.: Condition Control of Existing Structures by Performance Testing, Otto Graf Journal 17 (2006), pp. 19-44.

# ERFORSCHUNG DER EIGENSCHAFTEN NEUER SALZSTABILER SUPERABSORBIERENDER POLYMERE RESEARCH ON THE PROPERTIES OF NEWLY DEVELOPED SALT STABLE SUPERABSORBENT POLYMERS

von/by Sven Mönnig

#### Einleitung

Jensen und Hansen haben die mögliche Verwendung von superabsorbierenden Polymeren (SAP) als interne Wasserspeicher getestet und konnten an Zementsteinproben zeigen, dass sich das autogene Schwinden stark reduzieren lässt. Ihre Arbeiten bildeten eine der Grundlage für den Bericht des Rilem-ICC zur inneren Nachbehandlung von Beton. Die am Institut für Werkstoffe durchgeführten Vorversuche zeigten aber die ganze Bandbreite an noch nicht geklärten Problemen und Fragen auf. Diese sollen durch dieses Forschungsprojekt gelöst werden. Dabei sollen mögliche Interaktionen der SAP mit anderen organischen Zusätzen, Zementen und Zuschlägen untersucht werden und ihre Eignung für die interne Nachbehandlung, u.a. durch Rissneigungsversuche an erhärtendem Beton, bewiesen werden. Bei den durchgeführten CDF - Versuchen zeigten die Ergebnisse, dass dies ein weiteres mögliches Anwendungsgebiet für SAP sein könnte.

#### Introduction

Jensen and Hansen investigated the possible usability of superabsorbent polymers (SAP) as internal water reservoirs at hardened cement paste samples. They showed that autogenous shrinking can be reduced strongly. Their work formed one of the basis for the report of the Rilem ICC for the internal curing of concrete. The preliminary tests accomplished at the institute for materials showed, however the whole range of problems and questions that are not clarified yet. They should be solved by this research project. Possible interactions of the SAP with other organic additives, cements and aggregates are to be examined and their suitability for the internal curing, among other things by measuring the cracking tendency for settled concrete, be proven. The accomplished CDF measurements showed that this could be a further possible area of application for SAP.



- Abb. 1: Vergleich eines salzstabilen superabsorbierenden Polymers vor und nach der Wasseraufnahme.<sup>1</sup>
- Figure 1: Contrast of a salt stable superabsorbent polymer before and after the water absorption.<sup>2</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Mit freundlicher Genehmigung der BASF Construction Chemicals

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> With friendly permission of the BASF Construction Chemicals

# Grundlagen

Alle Polymere, die in der Lage sind große Mengen Wasser zu speichern, gehören zu der Gruppe der superabsorbierenden Polymere. SAPs sind seit längerem bekannt und werden am häufigsten für die Produktion von Windeln eingesetzt [Buchholz & Graham 1998]. Letztes Jahr überstieg die Gesamtmenge an weltweit produzierten SAP 500.000t. In der Bauindustrie werden sie u. a. zur Versiegelung von Trennfugen in Tunnelkonstruktionen und bei Trockenestrichen eingesetzt. Im Jahr 2000 zeigte Jensen [Jensen & Hansen 2001, Jensen & Hansen 2002], dass salzstabile Polymere auch zum Zwecke der inneren Nachbehandlung und zur Reduktion des autogenen Schwindens von Zementstein eingesetzt werden können. Gleichzeitig hatten die SAP nur eine geringe Wirkung auf die gemessene Druckfestigkeit. Seit der Veröffentlichung dieser Ergebnisse haben andere Wissenschaftler unterschiedliche Polymere für verschiedene Anwendungen untersucht [Lura et al. 2006, Mechtcherine et al. 2006]. Die meisten dieser Untersuchungen wurden an Zementstein und Mörtel durchgeführt und nur wenige Arbeiten wurden über ihren Einfluss auf Beton veröffentlicht.

Zwei SAP Eigenschaften sind von besonderem Interesse: ihre Wasseraufnahmekapazität und ihre Sieblinie. Beide beeinflussen die Auswirkung der SAP auf die Betoneigenschaften. Die Polymere absorbieren große Mengen Wassers gleich nach ihrer Zugabe zum Frischbeton. Dies bewirkt eine Verdichtung des Zementleimes. Dieses Wasser wird während des Hydratationsverlaufes allmählich wieder abgegeben, wobei kugelförmige Hohlräume erhalten bleiben. Die Abb. 2 bis 4 zeigen den Vorgang der Wasseraufnahme und – abgabe symbolisch.

# **Principles**

All polymer materials which are able to absorb large quantities of water belong to the group of superabsorbent polymers (SAP). SAPs are well known since years and frequently used by the sanitary industry, i.e. for the diapers production [Buchholz & Graham 1998]. Last year the production of SAPs exceeded 500000 t. In construction industries polymers are et. al. known as sealant for tunnel constructions. In 2000 Jensen proved that salt stable polymers can also function for the purpose of internal curing [Jensen & Hansen 2001, Jensen & Hansen 2002] reducing significantly autogenous shrinkage of cement paste. Concurrently the SAPs had only a minor impact on the measured compressive strength. Since his results were published other researchers [Lura et al. 2006, Mechtcherine et al. 2006] started to investigate different types of superabsorbent polymers for different uses. Most of these investigations dealt with cement pasts and mortars and only little work was published about the influence on concrete properties.

Two SAP properties are of particular interest: their water absorption capacity and their particle size distribution. They influence the impact of the SAPs on concrete properties. The polymers absorb large quantities of water immediately after their addition to the fresh concrete mixture causing a densification of the paste. This water will be released gradually during the course of hydration whereas spherical voids will remain inside the paste. Figures 2 to 4 show figuratively the process of water absorption and desorption.



time

Abb. 2: Ausgangssituation: homogene Verteilung des Zementes, Wassers, Zuschläge und SAP Partikel.

Figure 2: Initial condition, homogenous dispersion of cement particles, water, SAPs and aggregates. Abb. 3: Sättigung der SAP: das umgebende Wasser wird durch die SAP aufgenommen und der durchschnittliche Partikelabstand verringert.

Figure 3: Saturation of the SAP, the surrounding water will be absorbed by the polymer and the average particle distance reduced. Abb. 4: Wasserabgabe: Das Wasser wird an den Zementstein durch Diffusionsvorgänge abgegeben. Eine großer Hohlraum bleibt übrig.

Figure 4: Water desorption, the water was delivered to the matrix due to diffusion. A large void remains.

Aufgrund dieses Mechanismus können die SAP theoretisch mehrere Funktionen haben:

- a. Sie können als innere Wasserquellen fungieren, die den Hydratationsgrad erhöhen und das Schwinden reduzieren.
- b. Sie wirken als multifunktionelle Luftporenbildner (LP), die den Frost-Tauwiderstand und die Dauerhaftigkeit eines Betons erhöhen.
- c. Sie können dem Frischbeton Wasser entziehen und damit ein Ansteifen bei gleichzeitiger Reduktion der Kapillarporosität bewirken.

Bisher haben sich die meisten Wissenschaftler auf einen speziellen Aspekt der Verwendbarkeit der SAP konzentriert: die Reduktion des autogenen Schwindens. Daher begann das IWB ein Versuchsprogramm mit dem Ziel den Einfluss der SAP auf den Frost-Tausalzwiderstand eines Betons zu untersuchen.

#### **Bisherige Ergebnisse – CDF Versuche**

Ein bekanntes Problem bei der Produktion eines Frost-Tausalzangriff widerstehenden

Due to this mechanism the polymers can theoretically fulfil different functions:

- a. They can act as internal water sources increasing the degree of hydration and reducing shrinkage.
- b. They function as multi functional air pore entraining agents (AEA), increasing the freeze-thaw resistance and the durability of a concrete.
- c. They can extract water of the fresh concrete mixture causing the stiffening of the paste which is accompanied by a reduction of the capillary porosity.

Until today most of the scientists concentrated on one specific aspect of the utilization of the SAPs: the reduction of autogenous shrinkage. Hence, the IWB started a research program to study the SAP influence on the freeze-thaw resistance of concrete with SAP addition.

#### **Previous Results – CDF results**

A common problem for the production of freeze-thaw resistance concrete is the stabil-

Betons ist die Stabilität der eingebrachten Poren während des Mischvorganges und die durch sie hervorgerufene Reduktion der Betondruckfestigkeit. Die SAP könnten eine sehr gute Lösung für dieses Problem sein. Ihre Wasseraufnahmekapazität ist beinahe unabhängig von den Umweltbedingungen und ihr Einfluss auf die Druckfestigkeit ist vernachlässigbar. Auf diesen Überlegungen aufbauend, wurden einige Versuchsreihen durchgeführt, die das Potential der SAP zeigen sollten.

Die verwendeten Polymere konnten 11g/g (SAP I und SAP IV) und 18g/g (SAP II und SAP III) an Porenwasser aufnehmen. Die Größe trockener Partikel lag zwischen 0 and 250µm, mit Ausnahme der SAP III Mischung, die nur Partikel kleiner 63µm enthielt. Die Menge zugegebenen Luftporenbildners betrug 0,04 (LP74 5) und 0,08 (LP74 10) M.-% bezogen auf den Zementgehalt. Der Wasser/Zement Wert betrug 0,48 für die meisten Mischungen, mit Ausnahme der Mischung SAP IV, hier betrug der w/z-Wert 0,51, und der Referenzmischung REF 042 mit einem w/z-Wert von 0,42. Die Verarbeitbarkeit wurde durch Fließmittelzugabe sichergestellt.



Abb. 5: Gemessene Abwitterung der untersuchten Mischungen

Figure 5: Scaling of the investigated mixtures

Alle Mischungen mit SAP Zugabe blieben unter 1500 g/cm<sup>2</sup> Abwitterung, mit Ausnahme der Mischung SAP IV, die, durch den höheren w/z-Wert und den größeren Anteil an feinen und ultrafeinen SAP Partikeln, eine

ity of the entrained pores and the accompanying reduction of the compressive strength of the concrete. The SAPs might provide an excellent solution for these problems. Their water absorption capacity is almost unaffected by the environmental conditions and their influence on the compressive strength is negligible. A series of tests investigated the potential of the SAPs based on these considerations. The polymers that were used had the ability to absorb 11g/g (SAP I and SAP IV) and 18g/g (mixtures SAP II and SAP III) of pore water. Their dry particle size distribution varied between 0 and 250µm, except of the SAP III mixture where only particles smaller than 63 µm were used. The amount of air entraining agents (AEA) was 0.04 (LP74\_5) and 0.08 (LP74\_10) % by mass of the cement content. The water/cement- ratio was 0.48 for most mixtures except of the mixture SAP IV, where a w/cratio of 0.51 was used, and for the reference mixture Ref 042, where the w/c- ratio was 0.42. The workability was assured by the addition of superplasticizer.



Abb. 6: Druckfestigkeitsentwicklung der untersuchten Mischungen

# Figure 6: Compressive strength development of the mixtures

All mixture with SAP addition stayed well below 1500 g/cm2 scaling with the exception of the mixture SAP IV, which is explainable by the high w/c-ratio and the large amount of fine and ultra fine particles causing an inhöheren Durchlässigkeit und Wasseraufnahme zeigte. Die gemessenen Druckfestigkeiten der Mischungen mit SAP übertrafen die der Mischungen mit Luftporenbildner und die des Referenzbetons mit dem w/z-Wert von 0.48. Die Mikrostruktur des Betons veränderte sich hin zu einem System in dem wenige große sphärische Poren die miteinander verbunden Kapillarporen ersetzten. Diese Wirkung eines superabsorbierenden Zusatzmittels erhöht die Dauerhaftigkeit eines Betons durch die Erhöhung seines Frost-Tausalzwiderstandes. Zukünftige Forschung wird den Einfluss der SAP auf die Dauerhaftigkeit weiter untersuchen und ihre Eigenschaften weiter optimieren.

#### Bisherige Ergebnisse – Rissneigung

Eine Vielzahl Schalungen wurde zur Verbesserung der Messungen der Rissneigung von Mischungen mit SAP geprüft.

Das Rissmuster musste regelmäßig und, dies war das wichtigste Kriterium, vorhersagbar sein. Eine digitale Kamera wurde über dem Beton angebracht; jedoch entsprach das Bildfeld nur einen Bereich von 96 cm<sup>2</sup>. Daher war es notwendig ungefähr zu Wissen in welchem Bereich der Riss auftreten wird oder aber mehrere Kameras zu benutzt. crease of the permeability and the water The absorption. resulting compressive strength exceeded for all mixtures with SAP addition the ones of the mixtures with AEA and the one of the reference mixture with the w/c-ratio of 0.48. The microstructure of the concretes with SAP addition changed to a system where view large spherical voids replaced interconnected capillary pores. This effect of a superabsorbent admixture increases the durability of concretes by increase the freeze thaw resistance. Future research will further investigate the SAP influence on the concrete and will also optimize the SAPs properties.

# Previous Results – Cracking bias

A variety of mould shapes were tested to improve the measurement of the cracking bias of mixtures with SAP addition.

The crack pattern had to be regular and, which was the most important criteria, predictable.

A digital camera was installed above the concrete; however the frame only captures an area of 96 cm<sup>2</sup>. Thus it was necessary to have an approximate knowledge of the area where the crack will appear or to use more cameras.



Abb. 7: Untersuchte Schalungstypen; alle Maße der Schalungen sind in Zentimeter gegeben.

Figure 7: Investigated mould systems; all dimensions of the mould designs are given in cm.

Das frühe Schwinden der SAP Mischung war das kleinste aller überprüften Mischungen. Ein weiteres interessantes Resultat ist die Verkleinerung der durchschnittlichen Größe der Risse. Die Gesamtfläche der Risse blieb durch die SAP Zugabe aber unverändert; jedoch verringerte sich ihr Durchmesser.

Die Ergebnisse stimmen mit den Angaben [Schwarz & Öttl 2006] von Schwarz und Öttl überein. Sie untersuchten unterschiedliche Mischungen mit und ohne SAP Zugabe. Dabei fanden sie keine Änderungen des Rissverhaltens. Die von ihnen gemessenen Schwindwerte waren mit den hier gemessenen vergleichbar. Jedoch stellen ihre und diese Arbeit noch nicht genügend Informationen für eine abschließende Bewertung des Rissverhaltens von Betonmischungen mit einem sehr hohen w/z-Wert und SAP Zugabe zur Verfügung. Daher wird diese Arbeit noch fortgesetzt werden.

Zukünftige Forschung wird versuchen den individuellen Einfluss der SAP und des Fließmittels zu bestimmen. Die kleinen Schalungen bieten hierzu eine ausgezeichnete Möglichkeit. The early age shrinkage of the SAP mixture was the smallest of all examined mixtures. Another interesting result is the reduction of the average size of the cracks. The total surface area of the cracks remained unchanged due to the SAP addition; however their diameter decreased.

The results are in good agreement with literature findings [Schwarz & Öttl 2006]. Schwarz and Öttl investigated the performance of different mixtures with and without SAP addition. They were not able to find a significant change of the total sum of cracks due to the addition of SAPs. The measured shrinkage values were comparable to our measurements.

However, their and this work does not provide sufficient information for a final conclusion of the ability of the SAPs to mitigate the drying shrinkage behaviour of concrete mixtures with a very high w/c-ratio. This work must be continued.

Future development will try to answer the question of the individual influence of SAPs and of superplasticizer. The small moulds provide an excellent possibility to conduct a large set of experiments.

# Acknowledgements

Prof. Jensen is thanked for the provision of polymers, the Schwenk AG for the provision of cement and the company BASF Construction Chemicals for their diverse assistance.

# Danksagung

Prof. Jensen wird für die Bereitstellung der Polymere gedankt, der Schwenk AG für die des Zementes und der BASF Bauchemie für ihre verschiedenartige Unterstützung.

#### Literatur / References

Buchholz F.L., Graham A.T.: Modern Superabsorbent Polymer Technology, WILEY-VCH, ISBN-0-471-19411-5, 1998

Jensen O.M., Hansen P.F.: Water-entrained cement-based materials I.: Principles and theoretical background, Cement and Concrete Research 31(2001), pp. 647-654

Jensen O.M., Hansen P.F.: Water-entrained cement-based materials II. Experimental observtions, Cement and Concrete Research 32(2002), pp. 973-978

Lura P., Durand F., Loukili A., Kovler K., Jensen O.M.: Compressive Strength of Cement Pastes and Mortars with Superabsorbent Polymers, Rilem Conference on Volume Changes of Hardening Concrete, Pro 52, 2006, pp. 117-125

Mechtcherine V., Dudziak L., Schulze J., Staehr H.: Internal curing by superabsorbent polymers – effects on material properties of self-compacting fibre-reinforced high performance concrete, Rilem Conference on Volume Changes of Hardening Concrete, Pro 52, 2006, pp. 87-96

Schwarz V., Öttl C.: Untersuchungsbericht SISA, Interner Bericht MPA, 2006

# EINFLUSS DER BELASTUNGSGESCHWINDIGKEIT AUF DEN BETONAUSBRUCH VON KOPFBOLZENBEFESTIGUNGEN

# INFLUENCE OF LOADING RATE ON CONCRETE CONE FAILURE

von/by Joško Ožbolt

# Einleitung

Es ist bekannt, das die Belastungsgeschwindigkeit einen starken Einfluss auf das Tragverhalten von Bauteilen aus Beton aufweist (CEB, 1988; Reinhardt, 1982; Eibel, J. and Keintzel, E., 1989; Curbach, M., 1987; Weerheijm, 1992). Die Belastungsgeschwindigkeit beeinflusst das Bauteilverhalten durch drei Einflüssen: (1) aufgrund des Kriechens des Materials zwischen den Rissen, (2) aufgrund des zeitabhängigen Wachstums von Mikrorissen und (3) durch den Einfluss von Trägheitskräften auf der Strukturebene.

In diesem Aufsatz wird ein Modell verwendet, das auf Krausz & Krausz (1988) zurückgeht. Es basiert auf der Theorie der Energieaktivierung bei der Rissbildung. Diese Theorie wird mit dem M2-O "Microplane" Modell für Beton (Ožbolt et al., 2001) gekoppelt, die sich bei der Simulation von dreidimensionalen Bruchvorgängen in Beton bewährt hat (Ožbolt, 1995).

Die vorhandenen experimentellen Ergebnisse (Klingner et al., 1998; ANCHR, 2001) deuten darauf hin, dass bei dem Betonausbruch von Kopfbolzen- und Dübelbefestigungen die Bruchlast von Belastungsgeschwindigkeit abhängt. Jedoch, zurzeit sind nur wenige Versuche vorhanden. Aus dem Grund sind weitere experimentelle und numerische Untersuchungen erforderlich.

In dem Vorliegendem Bericht werden die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen von Kopfbolzen unter zentrische Belastung dargestellt. Für drei Verankerungslängen wurde der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Bruchart und auf die Bruchlast untersucht. Die statische und dynamische Analyse wurde durchgeführt.

# Introduction

It is well known that loading rate significantly influences structural response (CEB, 1988; Reinhardt, 1982; Eibel, J. and Keintzel, E., 1989; Curbach, M., 1987; Weerheijm, 1992). The structural response depends on the loading rate through three different effects: (1) through the creep of the bulk material between the cracks, (2) through the rate dependency of the growing microcracks and (3) through the influence of structural inertia forces, which can significantly change the state of stresses and strains in the material.

In the present paper a model for the rate dependency of the crack propagation is adopted that is applicable over many orders of magnitude of loading rate. The model is based on the rate process theory (Krausz and Krausz, 1988) of bond ruptures. It is coupled with the M2-O microplane model for concrete (Ožbolt et al., 2001), which has been shown to realistically simulate failure of concrete structures for complex threedimensional stress-strain states (Ožbolt, 1995).

The experimental results indicate that loading rate significantly influence the concrete cone pull-out capacity (Klingner et al., 1998; ANCHR, 2001). However, due to the limited number of experiments, which are available only for relatively narrow range of loading rate, there is an obvious need for further theoretical and experimental investigation.

The aim of the present numerical study was to investigate how relatively fast loading rates, where creep of concrete is of a minor importance, influence the pull-out resistance and the size effect on the pull-out capacity. To distinguish between the influence of the rate dependent concrete cracking and strucÄhnlich wie von Bažant et al. (2000) Vorgeschlagen, wird hier die Dehnungsgeschwindigkeitsabhängigkeit in dem M2-O "Microplane" Modell (Ožbolt et al., 2001) formuliert. Es besteht aus zwei Teilen: (1) der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Mikrorissbildung und (2) der Abhängigkeit aufgrund von Kriechen des Betons zwischen den Rissen. Der Einfluss von Trägheitskräften auf der Strukturebene wird automatisch durch die dynamische Analyse berücksichtigt. Deshalb ist dieser Einfluss nicht Teil des konstitutiven Gesetzes.

Die Annahme des ersten Teils besteht darin, dass Mikrorisse unmittelbar nach dem Entstehen Weiterwachsen. Entgegen der Annahme von Bažant et al. (2000), der die Änderung des E-Moduls aufgrund eines einfachen visko-elastischen Modells annimmt, wird hier der E-Modul von der Entwicklung von Mikrorissen abhängig gemacht. Der zweite Teil der Dehnungsgeschwindigkeitsabhängigkeit, wobei das Kriechen von Beton eine große Rolle spielt, wird durch das verallgemeinerte visko-elastische Maxwell-Modell (Ožbolt and Reinhardt, 2001) bestimmt. Der erste Teil der Dehnungsgeschwindigkeitsabhängigkeit ist verantwortlich für die Kurzzeitbelastung bis zu einer Dauer von etwa einer Stunde und der zweite Teil bestimmt das Verhalten bei lang dauernder Belastung. Im vorliegenden Beitrag ist der erste Teil der wichtigste, weshalb der zweite Teil aufgrund von Kriechen nicht behandelt wird. Dieser ist in Ožbolt and Reinhardt (2001) ausführlich dargestellt.

Die Dehnungsrate *dɛ/dt* in einem Kontinuum mit einer Anzahl paralleler Risse kann beschrieben werden durch:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\dot{w}}{s_{cr}} + \frac{\dot{\sigma}}{E} \approx \frac{\dot{w}}{s_{cr}}$$
(1)

tural inertia on the size effect, the results of static and dynamic analyses were evaluated and compared.

# Rate dependency in the M2-O microplane model

The rate dependency in the here presented version of the thermodynamically consistent M2-O microplane model for concrete (Ožbolt et al., 2001) consists of two parts: (1) the rate dependency related to the formation (propagation) of the microcracks, which accounts for the effect of inertia forces at the level of the micro-crack tip, and (2) the rate dependency due to the creep of concrete between the microcracks. The first part of the rate dependency is responsible for the short duration loads (impact), up to duration of one hour, and the second part is responsible for the long duration loading (creep fracture interaction, Ožbolt and Reinhardt, 2001).

In the present formulation the influence of structural inertia on the rate effect is not a part of the constitutive law, however, this effect is automatically accounted for in dynamic analysis in which the constitutive law interacts with forces due to structural inertia.

The rate of strain  $d\epsilon/dt$  in a continuum with a number of parallel cohesive cracks, which may be imagined to represent macroscopic strain softening, can be expressed as:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\dot{w}}{s_{cr}} + \frac{\dot{\sigma}}{E} \approx \frac{\dot{w}}{s_{cr}}$$
(1)

where  $\varepsilon$  = average macroscopic strain normal to the direction of parallel cracks,  $s_{cr}$  = spacing of the parallel cracks, E = Young's modulus of bulk material and  $(d\sigma/dt)/E$  is the elastic strain ratio which can be, compared to the crack opening ratio dw/dt, neglected. After introducing a few reasonable simplifications into the concept that is based on the energy activation theory (Krausz and Krausz, 1988), the influence of wobei  $\varepsilon$  = mittlere Dehnung normal zur Richtung der parallelen Risse,  $s_{cr}$  = Rissabstand, E = Elastizitätsmodul und  $(d\sigma/dt)/E$  die elastische Dehnung, die verglichen mit der Rissöffnugnsrate dw/dt, vernachlässigt werden kann. Nach Einführung einiger Vereinfachungen in die Theorie, die basiert auf der Theorie der Energieaktivierung bei der Rissbildung (Krausz and Krausz, 1988), kann der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die belastungsgeschwindigkeitsunabhängige Spannungs-Dehnungslinie  $\sigma^{0}(\varepsilon)$  geschrieben werden als:

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma^{0}(\varepsilon) \left[ 1 + C_{2} \ln\left(\frac{2\dot{\varepsilon}}{C_{1}}\right) \right]$$
(2)

worin  $C_1$  und  $C_2$  Konstanten sind, die im Versuch bestimmt werden müssen.

Im M2-O "Microplene" Modell (Ožbolt et al., 2001) wird das Verhalten auf der Makroebene (Integrationspunktebene) dadurch bestimmt, dass die Normal- und Schubspannungen über die zahlreiche Flächen (Mikroebene) integriert werden. Die ratenunabhängigen Spannungen der Miroebenen  $\sigma^0_M(\varepsilon_M)$ (M steht jeweils für die volumetrischen, deviatorischen oder Schubkomponenten der Spannung der Mikroebene) werden aus den bekannten Dehnungen der Mikroebene  $\varepsilon_M$ bestimmt, wobei die im voraus definierten einachsigen Spannungs- Dehnungsbeziehungen der Mikroebenen verwendet werden (Ožbolt et al., 2001). Die Dehnungen der Mikroebene  $\varepsilon_M$  werden aus dem Bekanten Dehnungstensor der Makroebene durch die kinematische Projektion des Dehnungstesors in normalen bzw. tangentialen Richtungen der Mikroebene berechnet. Man nimmt dabei an, dass der Geschwindigkeitseffekt nach Gl. (2) für jede Spannungskomponente der Mikroebene gleich ist. Konsequenterweise wird dann die Geschwindigkeitsabhängigkeit jeder Spannungskomponente der Mikroebene wie folgt berechnet (Bažant et al.,

the rate effect on the rate independent stress-strain relation  $\sigma^{0}(\varepsilon)$  can be written as:

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma^{0}(\varepsilon) \left[ 1 + C_{2} \ln\left(\frac{2\dot{\varepsilon}}{C_{1}}\right) \right]$$
(2)

where  $C_1$  and  $C_2$  are constants obtained by fitting test data (Bažant et al., 2000).

In the M2-O microplane model the macroscopic response is obtained by integrating normal and shear microplane stresses over all microplanes. The rate independent microplane stress components  $\sigma^{0}_{M}(\mathcal{E}_{M})$ (M = stands for microplane volumetric, devia-)toric and shear components, respectively) are calculated from the known microplane strains  $\varepsilon_M$  using pre-defined microplane uniaxial stress-strain constitutive relations (Ožbolt et al., 2001). It seems reasonable to assume that the rate effect on each microplane component is of the same type as given by Eq. (2). Consequently, the rate dependency for each microplane component reads (Bažant et al., 2000):

$$\sigma_{M}(\varepsilon_{M}) = \sigma_{M}^{0}(\varepsilon_{M}) \left[ 1 + c_{2} \ln\left(\frac{2\dot{\gamma}}{c_{1}}\right) \right]$$
with  $\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}$   $c_{1} = \frac{c_{0}}{s_{cr}}$ 
(3)

where  $c_0$  and  $c_2$  are material rate constants which have to be calibrated by fitting test data,  $\dot{\mathcal{E}}_{ij}$  = components of the macroscopic strain rate tensor (indicial notation). From Eq. (3) it is obvious that the rate magnitude is not measured on the individual microplanes, which would be not objective, but on the macroscale. Furthermore, in the microplane model, Eq. (3) applies on all microplane components except the volumetric compression, which is assumed to be rate insensitive. This is done because for volumetric compression there is no crack development since the material is compacted. The above model parameters are calibrated

$$\sigma_{M}(\varepsilon_{M}) = \sigma_{M}^{0}(\varepsilon_{M}) \left[ 1 + c_{2} \ln \left( \frac{2\dot{\gamma}}{c_{1}} \right) \right]$$
with  $\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}$   $c_{1} = \frac{c_{0}}{s_{cr}}$ 
(3)

wobei  $c_0$  und  $c_2$  die Werkstoffkonstanten sind, die aus Versuchen folgen,  $d\varepsilon_i/dt$  sind die Komponenten des Dehnungstensors der Makroebene (Intergrationspunkt). Aus GI. (3) folgt, dass der Dehnungsrateneinfluss nicht auf die individuellen Mikroflächen bezogen wird, was nicht objektiv wäre, sondern auf die Makroebene. Außerdem bezieht sich Gl. (3) auf alle Spannungskomponente der Mikroebene außer auf volumetrischen Druck, der als unabhängig von der Dehnungsgeschwindigkeit angenommen wird. Der Grund dafür ist, dass volumetrischer Druck zu keiner Rissbildung führt. Das vorgeschlagene Modell wurde an einachsigen Druckversuchen kalibriert (Ožbolt et al., 2006), die von Dilger et al. (1978) durchgeführt wurden.

# Dreidimensionale statische und dynamische FE-Berechnungen

Das dehnungsratenempfindliche "Microplane" Modell wird in der 3D FE Analyse von Einzelkopfbolzenbefestigungen in der Fläche eingesetzt. Die statische Analyse wurde mit impliziter Methode durchgeführt, die auf der inkrementellen Sekantensteifigkeit Verfahren beruht. In der 3D-transienten dynamischen Analyse wird das System der unbekannten Verschiebungen für jeden Zeitschritt  $\Delta t$ durch die Anwendung der Methode direkten Integration berechnet (Belytschko et al., 2001). (Ožbolt et al., 2006) based on the uniaxial compressive tests performed by Dilger et al. (1978).

# Three-dimensional FE analyses

The rate sensitive microplane model is used in the here presented 3D FE study of the pull-out problem. Static analysis is performed using an implicit 3D FE code based on the incremental secant stiffness approach (Belytschko et al., 2001). In the 3D transient dynamic FE analysis the system of unknown displacements in each time step  $\Delta t$  is solved using an explicit direct integration scheme (Belytschko et al., 2001).

# Influence of loading rate on concrete cone failure

The experimental results (Eibl and Keintzel, 1989; Rodrigez, 1995) for headed studs anchors loaded in tension show that the resistance and the peak displacement are higher than for the static loading. Furthermore, there is an indication that the failure mode also depends on the loading rate (Klingner et al., 1998; ANCHR, 2001). Unfortunately, the experimental results are available only for relatively low loading rates and for anchors with relatively small embedment depths. To get more insight into the behaviour of headed stud anchors of different sizes loaded by different loading rates, a 3D static and dynamic FE analyses were carried out using the rate sensitive microplane model for concrete.

To investigate the influence of the loading rate on the concrete cone failure, pull-out of headed stud anchor from a concrete block was simulated. Three embedment depths were considered:  $h_{ef} = 150$ , 890 and 1500 mm. The typical finite element mesh and the geometry of the head of the stud are shown in Figs. 1a,b, respectively. The rate independent properties of concrete are taken as: Young's modulus  $E_C = 28000$  MPa, Poisson's ratio  $v_C = 0.18$ , tensile strength  $f_t = 3$ MPa, uniaxial compressive strength  $f_c = 38$ 

# Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Betonausbruch von Kopfbolzenbefestigungen

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Traglasten von Kopfbolzenbefestigungen unter dynamischer Zugbelastung höher sind als unter statischer Belastung (Eibl and Keintzel, 1989; Rodrigez, 1995). Weiterhin, deuten die Versuche darauf hin, dass sich bei zunehmender Belastungsgeschwindigkeit die Bruchart ändern kann (Klingner et al., 1998; ANCHR, 2001). Zurzeit gibt es nur wenige experimentelle Ergebnisse für die Untersuchungen und die wurden mit relativ niedrigen Belastungsgeschwindigkeiten belastet. Um den Einfluss von Belastungsgeschwindigkeit auf das Verhalten von Kopfbolzenbefestigungen besser zu verstehen wurde 3D statische und dynamische FE Analyse von Einzelkopfbolzen in der Fläche unter Zugbelastung durchgeführt. Es wurde sowohl die Verankerungstiefe als auch die Belastungsgeschwindigkeit variiert.

| $h_{ef}[mm]$ | d     | t   | а   |
|--------------|-------|-----|-----|
| 150          | 16    | 17  | 40  |
| 889          | 95.3  | 102 | 216 |
| 1500         | 160.8 | 169 | 311 |



#### Abbildung 1b:

*Die FE Diskretisierung und die Abmessungen* **Figure 1b:** 

FE discretization and dimensions of the geometry

MPa and concrete fracture energy  $G_F = 0.1$ N/mm. The behaviour of steel was assumed to be linear elastic with Young's modulus  $E_S = 200000$  MPa and Poisson's ratio  $v_S = 0.33$ . In the analysis, four node solid finite elements were used. To eliminate mesh size sensitivity the crack band method (Bažant and Oh, 1983) was employed.



# Abbildung 1a:

Die Geometrie des untersuchten Problems Figure 1a:

Geometry of the investigated pull-out problem

# Static analysis

With the increase of the loading rate the peak load increases. Fig. 2 shows the relative pull-out resistance for all three embedment depths as a function of the loading rate. The resistance for static, rate independent, loading is taken as a reference resistance. It can be seen that for all embedment depths, the increase of the maximum pull-out resistance is almost a linear function of the loading rate (lin.-log scale). In Fig. 2 is also shown upper bound of the available test data (Klingner et al., 1998; ANCHR, 2001). In spite of the differences in the geometry of anchors, the numerical and experimental results show relatively good agreement.

Drei Verankerungstiefe wurden untersucht:  $h_{ef}$  = 150, 890 and 1500 mm. Die typische Geometrie und das FE Netz sind in Abb. 1 dargestellt. In der Analyse wurden die folgende, Belastungsgeschwindigkeit unabhängige Betoneigenschaften benutzt: Elastizitätsmodul  $E_C$  = 28000 MPa, Querdehnzahl  $v_c = 0.18$ , Zugfestigkeit  $f_t = 3$  MPa, einachsige Druckfestigkeit  $f_c = 38$  MPa und Bruchenergie des Betons  $G_F = 0.1$  N/mm. Die folgender Stahleigenschaften wurden eingesetzt: Elastizitätsmodul  $E_s = 200000$  MPa und Querdehnzahl  $v_s = 0.33$ . Um netzunabhängige Ergebnisse zu erzielen, wurde die Rissbandmethode (Bažant and Oh, 1983) verwendet.

#### **Statische Analyse**

Abb. 2 zeigt relative Traglasten in der Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit, für alle drei Verankerungstiefen. Die belastungsunabhängige Traglast wurde als Referenzwert eingesetzt. Es ist ersichtlich, zunehmender Belastungsgedass mit schwindigkeit die Traglast linear (lin.-log. Maßstab) zunimmt. In Bild 2 ist auch die obere Grenze von Versuchswerten (Klingner et al., 1998; ANCHR, 2001) dargestellt. Es zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den numerischen Ergebnissen und Versuchen.

Als Bruchart wurden für alle untersuchten Verankerungstiefen und für alle Belastungsgeschwindigkeiten die Betonausbruch vorhersagt. Versuche und numerische Untersuchungen zeigen, dass die Kopfbolzen unter statische Zugbelastung einen starken Maßstabseffekt auf die Traglast aufweisen. Dieser Maßstabseffekt folgt die Vorhersage der LEBM (Ožbolt, 1995; Eligehausen, et al., 1997). Für all untersuchte Belastungsgeschwindigkeiten zeigt Abb. 3 die relative Tragfähigkeit der Kopfbolzen  $\sigma_{N} = (P_{U}/(h_{ef}^{2}\pi))/(\sigma_{N,150})$ Bruchlast,  $(P_U =$  $\sigma_{N,150} = \sigma_N$  für  $h_{ef} = 150$  mm) in Abhängigkeit



# Abbildung 2:

Statische Analyse: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Traglast Figure 2:

Static analysis: Influence of the loading rate on the pull-out resistance

As a failure mode, a typical concrete cone is obtained far all laoding rates and for all embedment depth, respectively.

Numerical studies, in which the rate sensitivity was not considered, show that for anchors with relatively small head sizes the size effect is close to the prediction according to LEFM (Ožbolt, 1995; Eligehausen, et al., 1997). Fig. 3 shows the relative nominal pull-out strength for all loading rates as a function of the embedment depth. For each loading rate the relative nominal strength is calculated as the ratio between the nominal strength  $\sigma_N = P_U / (h_{ef}^2 \pi)$  ( $P_U$  = ultimate load) and the nominal strength for  $h_{ef} = 150$  mm  $(\sigma_{N,150})$ . It can be seen that by increase of the loading rate, the size effect becomes stronger, i.e. the reduction of the nominal strength for larger embedment depths is larger at higher loading rates. The results for very high loading rates coincide almost exactly with the prediction according to LEFM.

#### **Dynamic analysis**

To investigate the influence of structural inertia on the response of the headed stud anchors, the same study as presented in above was repeated, however, dynamic analysis was performed. von der Verankerungstiefe. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit der Maßstabseffekt stärke ausgeprägt wird.



#### Abbildung 3:

Statische Analyse: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf den Masstabßeffekt

#### Figure 3:

Static analysis: Influence of the loading rate on the size effect

#### **Dynamische Analyse**

Um den Einfluss von Trägheitskräften auf das Tragverhalten von Kopfbolzen zu untersuchen wurde auch dynamische Analyse durchgeführt. In Abb. 4 ist die relative Traglast als Funktion von der Belastungsgeschwindigkeit dargestellt. Die relative Traglast für moderate Belastungsgeschwindigkeiten nimmt etwa linear mit der Belastungsgeschwindigkeit zu, gleich wie bei der statischen Analyse. Jedoch, für die Belastungsgeschwindigkeiten über 2000 mm/sec (kritische Belastungsgeschwindigkeit) nimmt die relative Tragfähigkeit progressiv mit der Belastungsgeschwindigkeit zu. Dieses ist auf den Einfluss von Trägheitskräften zurückzuführen. Es zeigt sich, dass dieser Einfluss mit der zunehmenden Verankerungstiefe abnimmt. Dieses Verhalten wurde auch bei allen anderen Brucharten des Betons beobachte (Reinhardt, 1982; CEB, 1988).

Für relativ moderate Belastungsgeschwindigkeiten zeigt die dynamische Analyse die



# Abbildung 4:

Dynamische Analyse: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Traglast Figure 4:

Dynamic analysis: Influence of the loading rate on the pull-out resistance

The relation between the relative maximum pull-out resistance and the loading rate is plotted in Fig. 4 for all embedment depths. It can be seen that for relatively low and moderate loading rates the resistance increases almost as a linear function of the loading rate (lin.-log scale). However, after reaching certain loading rate the increase becomes progressive. The loading rate at which the resistance start to increase progressively is the critical loading rate. The critical loading rate is related to the embedment depth. The large the embedment depth, the smaller is the critical loading rate. Fig. 4 shows gualitatively the same relation between the resistance and the loading rate as already observed for compressive and tensile (mode-I) dependent failure rate of concrete (Reinhardt, 1982; CEB, 1988).

gleiche Bruchart wie bei der statische Analyse, d.h. kegelförmigen Betonausbruch (siehe Abb. 5a). Bei sehr hohen Belastungsgeschwindigkeiten ändert sich die Bruchart durch die Wirkung von Trägheitskräften. Statt einen kegelförmigen Ausbruch, tritt Schubversagen auf (siehe Abb. 5b). Diese Bruchart wurde auch in den Versuchen beobachtet (ANCHR, 2001).



#### Abbildung 5a:

Statische Analyse: Die berechneten Bruchart für die  $h_{ef}$  = 150 mm – Belastungsgeschwindigkeit von d $\delta$ /dt = 200 mm/s Figure 5a:

Static analysis: Calculated failure mode for  $h_{ef} = 150 \text{ mm} - \text{loading rate } d\delta/dt = 200 \text{ mm/s}$ 



#### Abbildung 6:

Dynamische Analyse: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf den Masstabßeffekt Figure 6:

Dynamic analysis: Influence of the loading rate on the size effect



#### Abbildung 5b:

Dynamische Analyse: Die berechneten Bruchart für die  $h_{ef} = 150 \text{ mm} - \text{Belastungs-}$ geschwindigkeit von  $d\delta/dt = 2x10^5 \text{ mm/s}$ Figure 5b:

Dynamic analysis: Calculated failure mode for  $h_{ef} = 150 \text{ mm} - \text{loading rate } d\delta/dt = 2x10^5 \text{ mm/s}$ 

The results of dynamic analysis show that the failure mode depends on the loading rate. For relatively slow loading, the failure type is the same as in the static analysis, i.e. concrete cone failure (see Fig. 5a). However, for very high loading rates the failure mode changes and instead of concrete cone failure, the anchor fails in shear (mixed-mode, see Fig. 5b). The same tendency was also observed in the experiments (ANCHR, 2001).

The size effect on the nominal pull-out strength obtained in dynamic analysis is plotted in Fig. 6 for all loading rates. The same as in static analysis, the relative nominal strength is shown as a function of the embedment depth. It can be seen that for moderately high loading rates the size effect becomes stronger when the loading rate increases. It reaches maximum (LEFM) for loading rates between 20 to 200 mm/s. For further increase of the loading rate, however, there is an opposite tendency, i.e. the size effect on the nominal pull-out strength is weaker. It is interesting to observe that for the loading rate  $d\delta/dt = 2x10^3$  mm/s the size

Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf den Maßstabseffekt ist in Abb. 6 dargestellt. Gleich wie bei der statischen Analyse, ist für die moderaten Belastungsgeschwindigkeiten der Maßstabseffekt sehr ausgeprägt. Jedoch, bei sehr hohen Belastungsgeschwindigkeiten die Trägheitskräfte wirken so, dass der Maßstabseffekt einen negativen Trend aufweist, d.h. mit zunehmender Verankerungstiefe nimmt die relative Traglast zu. Dieser Trend zeigt sich nach dem die Belastungsgeschwindigkeit den kritischen

# Zusammenfassung

Wert ereichte.

Im vorliegenden Bericht wurde der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Tragverhalten von Kopfbolzenbefestigung in der Fläche diskutiert. Statische und dynamische Berechnungen wurden ausgeführt mit Hilfe eines 3D Finite Element Programms. Als Materialmodel für Beton wurde das dehnungsgeschwindigkeitsabhängige "Microplane" Modell verwendet.

Die Ergebnisse der Studie zeigen einen deutlichen Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Höchstlast und den Bruchverhalten von Kopfbolzenbefestigungen. Wie erwartet, nimmt die Höchstlast mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit zu. Für statische Berechnungen entstand immer ein kegelförmiges Betonausbruch als Versagensart. Im dynamischen Fall mit relativ niedrigen Belastungsgeschwindigkeiten war der Bruchart ähnlich wie in der statischen Belastung. Jedoch änderte sich dies für dynamische Berechnungen mit höheren Belastungsgeschwindigkeiten, wo der Bruch von einem kegelförmigen Ausbruch zu einem Schubbruch überging.

Bei statischer Berechnung nimmt der Maßstabseffekt auf die Tragfähigkeit mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit zu. Bei der dynamischen Analyse mit moderaten effect disappears completely, i.e. the nominal pull-out strength is almost independent of the embedment depth. This loading rate approximately corresponds to the critical loading rate. For loading rates larger than 2x10<sup>3</sup> mm/s the nominal strength increases with the increase of the embedment depth. This is caused by structural inertia forces, which for extremely high loading rates and large embedment depths significantly influence the pull-out resistance and failure mode.

#### Summary and conclusions

The rate sensitive model, which is based on the energy activation theory of bond rupture, is implemented into the M2-O microplane model for concrete. Based on the results of the presented numerical study the following conclusions can be drawn out.

The loading rate significantly influences the pull-out resistance of anchors. For moderately high loading rates, static and dynamic analyses show the same response of the anchors.

For higher loading rates there is a large difference between static and dynamic analysis. After the loading rate reaches critical value, the increase of resistance becomes progressive. In static analysis the failure mode is typically concrete cone failure and it is independent of the loading rate. In dynamic analysis the failure mode for lower loading rates are the same as in the static analysis. However, when loading with higher loading rate the failure mode changes and is due to the shear failure.

With respect to the size effect, the dynamic analysis confirms the results of the static analysis only for relatively low loading rates. However, for higher loading rates the size effect on the nominal pull-out strength becomes weaker. For the loading rate  $d\partial dt = 2x10^3$  mm/s the size effect disappears, i.e. the nominal pull-out strength becomes almost independent of the embedment depth. For loading rates higher than

106

Belastungsgeschwindigkeiten ist der Maßstabseffekt sehr ausgeprägt. Jedoch, bei sehr hohen Belastungsgeschwindigkeiten die Trägheitskräfte wirken so, dass der Maßstabseffekt einen negativen Trend aufweist, d.h. mit der zunehmender Verankerungstiefe nimmt die relative Traglast zu.  $2x10^3$  mm/s there is an opposite tendency, i.e. the nominal strength increases with the increase of the embedment depth.

#### Literatur / References

- **ANCHR, (2001):** Anchorages in Normal and High Performance Concrete Subjected to Medium and High Strain Rates. Report of the BRITE Project N<sup>0</sup>BE-4199.
- Bažant, Z. P. and Oh, B. H. (1983): Crack band theory for fracture of concrete. RILEM, 93(16), 155-177.
- Bažant, Z. P., Caner, F.C., Adley, M. D. and Akers, S. A. (2000): Fracturing rate effect and creep in microplane model for dynamics. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1126(9), 962-970.
- Belytschko T., Liu W.K. and Moran, M. (2001): Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. John Wiley & Sons Ltd.
- **Comite Euro-International Du Beton (CEB), (1988):** *Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading.* Syntesis Report, Bulletin D'Information N<sup>0</sup> 187.
- Curbach, M. (1987): Festigkeitssteigerung von Beton bei hohen Belastungs-geschwindigkeiten. PhD. Thesis, Karlsruhe University, Germany.
- Dilger, W.H., Koch, R. and Kowalczyk, R. (1978): Ductility of plained and confined concrete under different strain rates. American Concrete Institute, Special publication, Detroit, Michigen, USA.
- **Eibel, J. and Keintzel, E. (1989):** *Zur Beanspruchung von Befestigungsmitteln bei dynamischen Lasten.* Forschungsbericht T2169, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe.
- Eligehausen, R. Mallée, R. and Rehm, G. (1997): Befestigungstechnik. Ernst & Sohn, Berlin, Germany.
- Klingner, R.E., Hallowell, J.M., Lotze, D., Park, H-G., Rodrigez, M. and Zhang, Y-G. (1998): Anchor Bolt Behavior and Strength During Earthquakes. NUREG/CR-5434, The University of Texas at Austin.
- Krausz, A. S. and Krausz, K. (1988): Fracture kinetics of crack growth. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- **Ožbolt, J. (1995):** *Size effect in concrete and reinforced concrete structures.* Postdoctoral Thesis, University of Stuttgart, Germany.
- Ožbolt, J., Li, Y.-J. and Kožar, I. (2001): *Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint*. International Journal of Solids and Structures. 38: 2683-2711.
- **Ožbolt, J. and Reinhardt, H.W. (2001):** *Three-dimensional finite element model for creep-cracking interaction of concrete.* Proceedings of the sixth international conference CONCREEP-6, Ed. By Ulm, Bažant & Wittmann, 221-228.
- Ožbolt, J., Rah, K.K. and Meštrović, D. (2006): Influence of loading rate on concrete cone failure. Interna tional Journal of Fracture, 139:239-252.
- Reinhardt, H.W. (1982): Concrete under impact loading, Tensile strength and bond. Heron, Vol. 27, No.3.
- Rodrigez, M. (1995): Behavior of Anchors in Uncracked Concrete under Static and Dynamic Loading. M.S. Thesis, The University of Texas at Austin.
- Weerheijm, J. (1992): Concrete under impact tensile loading and lateral compression. Dissertation, TU Delft, the Netherlands.
## 3D THERMO-HYGRO-MECHANISCHES MODELL FÜR BETON 3D THERMO-HYGRO-MECHANICAL MODEL FOR CONCRETE

von/by Goran Periškić, Josko Ožbolt and Hans-Wolf Reinhardt

## Einleitung

Obwohl Beton nicht brennt, verändern sich seine Eigenschaften, wie z.B. Festigkeit, Elastizitätsmodul und Bruchenergie, bei der Erhitzung wesentlich. Bei hohen Temperaturen führen die großen Temperaturgradienten in Betonbauteilen zu lastinduzierten die Spannungen, zu Schädigungen führen. Weiterhin spielt 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. Auch im Zuschlag kann es zu Strukturveränderungen kommen oder er kann sein Gewicht wegen der Emission  $CO_2$ reduzieren von (z. B. Kalkstein). Das Verhalten des Betons bei hohen Temperaturen ist in der Literatur ausführlich beschrieben (Bazant & Kaplan 1996, Khoury et al. 1985, Schneider 1986, Thelandersson 1983), trotzdem sind weitere Versuche zur Klärung der Interaktion zwischen dem hygro-thermischen und mechanischen Eigenschaften des Betons explosionsartiges notwendig, wie z.B. Versagen infolge von Betonabplatzungen.

Das Hauptproblem bei der Durchführung der Versuche ist der erhebliche Aufwand, der betrieben werden muss, d.h. die Erfassung sowohl der Beanspruchungen als auch der Verformungen müssen bei extrem hohen Temperaturen erfolgen. Weiterhin können solche Versuche nur an relativ kleinen Bauteilen durchgeführt werden. Um das Verhalten des Betons unter Feuerbeanspruchung besser zu verstehen, kann die numerische Analyse angewendet

## Introduction

When temperature increases for a couple of hundred of degrees Celsius, behavior of concrete changes significantly. The concrete mechanical properties, such as strength, Young's modulus and fracture energy, are at high temperatures rather different than for the 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 that is due to high temperature play also an important role. The main reason for the complexity of the behaviour of concrete at high temperature is due to the fact that concrete contains water, which at high temperature changes its state of aggregation and can generate significant pore pressure. Moreover, at high temperature the aggregate can change its structure or it can loose its weight through the emission of CO<sub>2</sub>, such as calcium-based stones. Although the behaviour of concrete at high temperature is in the literature well documented (Bazant & Kaplan 1996, Khoury et al. 1985, Schneider 1986. Thelandersson 1983), further experimental and theoretical studies are needed to clarify the interaction between hygro-thermal and mechanical properties, such as for instance explosive type of failure due to spalling of concrete cover.

The main problem in the experimental investigations is due to the fact that such experiments are rather demanding, i.e. one has to perform loading and measurement at extremely high temperatures. Furthermore, such experiments can be carried out only on relatively small structures. To better understand behaviour of concrete structures, as an alternative to the experiments one can werden. Dafür sind jedoch Modelle notwendig, die das Verhalten des Betons unter hohen Temperaturen realistisch beschreiben.

In der Literatur existieren derzeit zwei Gruppen von phänomenologischen Modellen: (i) Thermo-Mechanische Modelle und (ii) Thermo-Hygro-Mechanische Modelle (Ozbolt at al. 2005). In diesen Modellen sind die mechanischen Eigenschaften des Betons temperaturabhängig, während die Temperaturverteilung unabhängig von den mechanischen Eigenschaften des Betons ist. Bei der zweiten Gruppe werden die physischen Prozesse gekoppelt d.h. es besteht eine Interaktion zwischen den mechanischen Eigenschaften, Temperatur, Feuchtigkeit, Porendruck, Hydratation, etc. Nachfolgend wird ein dreidimensionales (3D) Modell dargestellt, das auf der thermo-hygromechanischen Kopplung zwischen thermischen (Temperatur), hygrischen und Porendruck) (Feuchtigkeit und mechanischen Eigenschaften des Betons basiert. Als konstitutives Gesetz für Beton wird das "Microplane" Modell verwendet, wobei die Parameter des "Microplane" Modells temperaturabhängig formuliert wurden. Das Modell wurde in ein 3D FE Programm implementiert und zunächst anhand von Versuchsnachrechnungen überprüft. Anschließend wird das Problem der explosionsartigen Betonabplatzungen bei höhen Temperaturen untersucht. Die FE Analyse wird inkrementell durchgeführt, d.h. die Belastung wird in mehreren Schritten aufgebracht. Für vorgegebene Temperatur-, Feuchtigkeit- und Belastungsrandbedingungen werden in jedem Schritt Feuchtigkeit, Porendruck, Temperatur, Spannungen und Dehnungen simultan gerechnet. Die Analyse basiert auf dem impliziten iterativen Schema.

employ numerical analysis. However, one needs models, which can realistically predict behaviour of concrete at high temperature.

There are principally two groups of phenomenological models: Thermo-(i) mechanical models and (ii) Thermo-hygromechanical models (Ozbolt at al. 2005). In the first group the mechanical properties of concrete are temperature (moisture) dependent whereas the temperature (moisture) distribution is independent of the mechanical properties of concrete. The second group of models is from the physical point of view more realistic. Namely, in these models the physical processes, which take place in concrete, are coupled, i.e. the interaction between mechanical properties, temperature, moisture, pore pressure and hydration of concrete is accounted for.

In the present paper a three-dimensional (3D) model that is based on the thermohygro-mechanical coupling between thermal (temperature), hygric (moisture and pore pressure) and mechanical properties of concrete is discussed. The microplane model is used as a constitutive law for concrete with model parameters being made temperature dependent. The model is implemented into a three-dimensional finite element code and its performance is first compared with results known from the literature. Subsequently, the problem of of concrete cover at high spalling temperature is investigated. The finite element analysis is incremental, i.e. it is performed through a number of loading (time) steps. For given temperature, humidity and loading boundary conditions, in each time step moisture. pore pressure, temperature, stresses and strains are simultaneously calculated. The analysis is based on the implicit iterative scheme.

## Thermo-hygro-mechanisches Modell

Das dargestellte phänomenologische Modell für Beton ist hygro-thermo-mechanisch. Das wird Modell im Rahmen von Kontinuumsmechanik formuliert, mit der Annahme der Gültigkeit der irreversiblen Thermodynamik. Die Antwort des Modells ist durch die folgenden Variablen gesteuert: Temperatur, Porendruck (Feuchtigkeit), Spannungen und Dehnungen. Die Verteilung der Temperatur und Porendruck hängt von der Schädigung des Betons ab. Weiterhin, die relevanten mechanischen Eigenschaften des Betons - Elastizitätsmodul, Zug- und Druckfestigkeit und Bruchenergie sind temperaturabhängig.

Der gekoppelte Wärme- und Feuchtigkeitstransport

Der allgemeine Ansatz zur Lösung der gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport im Rahmen der irreversiblen Thermodynamik ist bekannt, doch da es ziemlich komplex ist, müssen für die parktische Anwendung einige Vereinfachungen eingeführt werden (Bazant & Kaplan 1996).

Nach Vereinfachung und mit der Annahme, dass Feuchtigkeitsflussdichte (J) und die Temperaturflussdichte (q) Spannungs- und Dehnungsunabhängig sind, werden Gl. 1 und 2 gültig (Bazant & Kaplan 1996), mit T = Temperatur,p = Porendruck,b = Wärmeleitfähigkeit,  $a_p/g$  = Permeabilität, die in diesem Modell als Funktion der Temperatur angenommen wurde, so wie vorgeschlagen von Bazant & Thonguthai (1978), mit g = Gravitationskonstante. Die Gleichungen die für Masseund Energieerhaltung können dann folgendermaßen geschrieben werden:

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

## Thermo-hygro-mechanical Model

The present phenomenological model for concrete is a thermo-hygro-mechanical model. The model is formulated in the framework of continuum mechanics under the assumption of validity of irreversible thermodynamics. The response of the model is controlled by the following unknown variables: temperature, pore pressure (moisture), stresses and strains. The distribution of temperature, pore pressure and moisture (thermo-hygric properties) depends on damage of concrete. Moreover, the relevant mechanical properties, Young's modulus, tensile strength, compressive strength and fracture energy, are temperature dependent.

## Coupled heat and moisture transfer

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 thermodynamics well known. However, there are a number of complex details and, therefore, for the practical application the problem must be simplified (*Bazant & Kaplan 1996*).

After introducing simplifications and assuming for a moment that the moisture flux (J) and heat flux (q) in concrete are independent of the stress and strain, the following is valid (*Bazant & Kaplan 1996*):

$$\mathbf{J} = -\frac{\mathbf{a}_{p}}{g} \operatorname{grad} \mathbf{p} \tag{1}$$

$$\mathbf{q} = -\mathbf{b} \operatorname{grad} \mathbf{T} \tag{2}$$

with p = pore pressure, T = temperature, b = heat conductivity,  $a_p/g = permeability$ , which is in the present model taken as a function of temperature according to the proposal of *Bazant & Thonguthai (1978)*, with g = gravity constant. The governing equation for mass conservation is written in Eq. 3, where w = water content, t = time and w<sub>d</sub> = total mass of water released into the

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} - C_{a} \frac{\partial w}{\partial t} - C_{w} \frac{\partial T}{\partial t} \mathbf{J} \operatorname{grad} T \qquad (4)$$
$$= -\operatorname{div} \mathbf{q}$$

mit w = Wassergehalt, t = Zeit,  $w_d$  = gesamte Masse des infolge der Dehydration in den Betonporen entlassenen Wassers,  $\rho$ , C = Rohdichte und spezifische Wärmekapazität des Betons. C<sub>a</sub> = Sorptionswärme des freien Wassers und C<sub>w</sub> = spezifische Wärmekapazität des Wassers. Der Einfluss der Dehydration und spezifischen der Wärmekapazität des Wassers wird diesem Modell in vernachlässigt, da ihr Beitrag vergleichbar gering ist.

Die Randbedingungen sind in Gl. 5 und 6 zusammengefasst, mit  $\alpha_w$  = Fuchteübergangskoeffizient,  $\alpha_G$  = Wärmeübergangskoeffizient, T<sub>0</sub> und p<sub>0</sub> sind Temperatur und Porendruck auf der Betonoberfläche und T<sub>E</sub> and p<sub>E</sub> sind Temperatur und Porendruck der Umgebung.

Die größte Schwierigkeit in den oben beschriebenen Gleichungen ist die Bestimmung der Materialeigenschaften. Angenommen es existiert keine Spannungsund Dehnungsabhängigkeit, das Materialgesetz für Abhängigkeiten zwischen p, w und T folgt den vereinfachten Vorschlag von Bazant & Thonguthai (1978). Um den Zustand von Porenwasser im Beton realistisch beschreiben sollen drei zu Zustände unterschieden werden: (i) Nichtgesättigter Beton, (ii) gesättigter Beton und (iii) der Übergang vom Nichtgesättigten zu gesättigten. Für den Nichtgesättigten Zustand wird der Porendruck hauptsächlich durch den Gesamtwassergehalt w und durch den Wassergehalt bei der volle Sättigung w<sub>s</sub>, der eine Funktion der Temperatur ist, beeinflusst. Im hier dargestellten Modell wurde eine semi-empirische Gleichung, wie von Bazant & Thonguthai (1978) vorgeschlagen, angenommen.

pore by dehydration. In the present model dehydration is not accounted for. The balance of heat is written in 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.

Boundary conditions at concrete surface can be defined as:

 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = \boldsymbol{\alpha}_{\mathrm{w}} \left( \mathbf{p}_{0} - \mathbf{p}_{\mathrm{E}} \right) \tag{5}$ 

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \alpha_{\rm G} \left( \mathbf{T}_0 - \mathbf{T}_{\rm E} \right) \tag{6}$$

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 main difficulty in the above equations is determination of the material properties. Assuming stress-dependency, no the constitutive laws for p, w and T follow simplified suggestions proposed by Bažant & Thonguthai (1978). To describe the state of pore water in concrete, one has to distinguish between three different states: (i) non-saturated concrete, (ii) saturated (iii) transition from nonconcrete and saturated to saturated concrete. For nonsaturated concrete, the pore pressure is mainly influenced by the total amount of free water w and by the saturation water content w<sub>s</sub>, which is a function of temperature. In the present model, a semi-empirical expression proposed by Bazant & Thonguthai (1978) has been accepted.

For saturated concrete one can theoretically calculate p for given w and T by using steam tables, taking into the account the porosity as the given volume available to pore water. This would, however, already for relative low temperatures yield to extremely high pore pressure, which is not realistic. Therefore, one has to take into account the increase of the available pore space (porosity), which is mostly due to the decrease of the adsorbed Im Fall des gesättigten Betonzustands könnte man theoretisch p für bekannte w und Т mit Hilfe von Dampftabellen bestimmen, unter der Berücksichtigung der Porosität als den verfügbaren Porenvolumens. Dies würde jedoch schon für relativ niedrige Temperaturen unrealistisch höhen Porendruck ergeben. Man muss daher die Zunahme des verfügbaren Porenvolumens berücksichtigen, die hauptsächlich durch die Abnahme des adsorbierten Wassers hervorgerufen wird, d.h. das bei normaler Temperatur chemisch gebundenes Wasser wird abgegeben und der Porenvolumen vergrößert sich (Bazant & Thonguthai 1978). In diesem Modell wird der Porendruck im gesättigten Beton hauptsächlich durch die Porosität beeinflusst. die eine Funktion der Temperatur ist. Den Versuchsergebnissen von Harmathy (1973) folgend wird es angenommen, dass der Gewichtsverlust von Beton bei einer bestimmten Temperatur genau der Masse des verdampften Wasser entspricht. Angenommen die Rohdichte des Wassers ist konstant, kann die Änderung der Porenvolumen verfügbaren einfach ausgerechnet werden.

Der Übergang vom nichtgesättigten in den gesättigten Zustand wird für die meisten praktischen Situationen sanft sein, da der gesättigte Zustand zuerst in den kleinsten Poren erreicht wird, außer für den Fall wenn sich der Porendruck extrem langsam ändert. Weiterhin, ein abrupter Übergang würde numerische Schwierigkeiten verursachen. Aus diesen Gründen wurde der Wassergehalt w für relative Feuchtigkeit von 0.96 bis 1.04 linearer interpoliert zwischen w=w<sub>96</sub> (nichtgesättigt) und w=w<sub>104</sub> (gesättigt) (Bazant & Thonguthai 1978).

Die oben beschriebenen Formulierungen sind anschließend in ein FE Programm mit der direkten Integrationsmethode implementiert. Um Stabilität zu gewährleisten, wird die implizite water portion i.e. the release of some water molecules which were chemically bound at room temperature (*Bazant & Thonguthai* 1978). In the presented model, the pore pressure for saturated concrete is mainly controlled by porosity, which is defined as a function of temperature. Following the weight loss experiments by *Harmathy* (1973), it has been assumed that the amount of mass loss of concrete at certain temperature equals to the mass of evaporated water. Assuming the weight density of water is constant, it is possible to calculate the change in the available volume.

Except for an extremely slow change in pore pressure, the transition from non-saturated to saturated concrete can be abrupt. For most practical situations the transition is most likely smooth. Furthermore, an abrupt transition would cause numerical difficulties. Therefore, for relative humidity between 0.96 and 1.04, linear increase of free water content was assumed *(Bazant & Thonguthai 1978)*.

The described formulations were subsequently implemented into a FE code using direct integration method. To assure stability of the time integration, a backward difference method been used. 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  $\varepsilon$  for stressed concrete exposed to high temperature in the mechanical part of the model is decomposed as *(Khoury et al. 1985, Nielsen et al. 2001)*:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{m}}(\mathrm{T}, \boldsymbol{\sigma}) + \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{ft}}(\mathrm{T}) + \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{tm}}(\mathrm{T}, \boldsymbol{\sigma}) + \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{c}}(\mathrm{T}, \boldsymbol{\sigma})$$
(7)

where  $\boldsymbol{\epsilon}^{m}$  = mechanical strain tensor,

Integrationsmethode verwendet. Da die Kontrollparameter gekoppelt sind, müssen die linearen Differentialgleichungen 3 und 4 iterativ gelöst werden.

## Thermo-hygro-mechanische Kopplung

Um den Einfluss der Temperatur auf die Dehnungsprozesse in Beton zu berücksichtigen setzt sich der gesamte Dehnungestensor für Beton ε unter Temperaturbeanspruchung, wie in GI. 7 dargestellt, aus folgenden Komponenten zusammen (Khoury et al. 1985, Nielsen et al. 2001):  $\mathbf{\epsilon}^m =$ mechanischer Dehnungstensor,  $\varepsilon^{ft}$  = freier thermischer Dehnungs- $\boldsymbol{\varepsilon}^{tm}$  = thermo-mechanischer tensor. Dehnungstensor und  $\varepsilon^{c}$  = temperaturabhängiges Kriechen. Weitere Information können in Ozbolt et al. (2005) gefunden werden.



Porosität als Funktion der Rissöffnung ( $1 \ge \alpha_n \ge 0$ ) **Figure 1:** Porosity as function of crack width ( $1 \ge \alpha_n \ge 0$ )

Die thermo-hygrischen Prozesse sind mit mechanischen Eigenschaften des Betons in beiden Richtungen gekoppelt. Es ist bekannt, dass Permeabilität und Porosität den größten Einfluss auf die Transportprozesse in Beton aufweisen. Anderseits Porosität werden sowohl als auch Permeabilität stark von Betonschädigung beeinflusst, d.h. je größer die Schädigung des Betons desto größer die Durchlässigkeit. Um diesen Einfluss zu berücksichtigen,  $\varepsilon^{\text{tt}}$  = free thermal strain tensor,  $\varepsilon^{\text{tm}}$  = thermomechanical strain tensor and  $\varepsilon^{\text{c}}$  are strains due to the temperature dependent creep of concrete. For more details about the mentioned strain components see *Ozbolt et al. (2005).* 

The thermo-hygric processes are coupled with mechanical properties of concrete in both directions. 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 are strongly influenced by damage, i.e. for higher level of damage, porosity and permeability increase. To account for this, permeability and porosity of assumed be concrete are to strain dependent. Following suggestions from the literature (Wang et al. 1997), the relations plotted in Figs. 1 and 2 are adopted in the present model. Damage (crack opening) is calculated using temperature dependent microplane model (Ozbolt et al. 2005).





Permeabilität als Funktion der Rissöffnung  $(1 \ge \alpha_a \ge 0)$ 

Permeability as a function of crack width  $(1 \ge \alpha_a \ge 0)$ 

#### Numerical study of concrete spalling

The numerical analysis is incremental. In each time step  $\Delta t$  partial differential equations 3 and 4, which control heat and moisture transfer in concrete, as well as the equation of equilibrium (mechanical part of

2005/07

werden Permeabilität und Porosität als Funktion der Dehnung angenommen (siehe Abb. 1 und 2), wie in der Literatur *(Wang et al. 1997)* vorgeschlagen. Die Schädigung (Rissöffnung) wird mit dem temperaturabhängigen Microplane Model gerechnet *(Ozbolt et al. 2005)*.

## Numerische Untersuchung der Betonabplatzung

Die numerische Analyse ist inkrementell. In Zeitschritt Δt werden partiale iedem Differentialgleichungen 3 und 4, die die Wärme- und Feuchtetransportprozesse in Beton definieren, sowie die Gleichung der Gleichgewicht (mechanischer Teil des Modells) simultan aelöst. Es wird angenommen, dass die Schädigung im jeden Zeitschritt konstant ist, d.h. die thermohygrischen Eigenschaften des **Betons** bestimmt die Schädigung dem aus vorherigen Zeitschritt.

das Nachdem Modell durch das Nachrechnen einfacher Beispiele aus der Literatur (Bazant & Kaplan 1996) verifiziert wird anschließend wurde, eine parametrische Untersuchung der Abplatzung des Betons durchgeführt. Ein Betonbalken wird lokal auf der freien Oberfläche erhitzt (siehe Abb. 3). Zugfestigkeit, Porosität, Permeabilität und Anfangswassergehalt des Betons werden variiert. Weiterhin, der Einfluss der geometrischen Instabilität auf das Abplatzungsverhalten wird untersucht. Um Netzunabhängigkeit zu gewährleisten wird die Rissbandmethode (Ozbolt et al. 2005) eingesetzt. Abgesehen von der freien Oberfläche des Balkens, werden alle abgrenzenden Oberflächen in allen drei Richtungen gehalten. Für die Elementierung werden achtknotige Volumenelemente verwendet. Für die Erhitzung der Luft auf der Oberfläche wird ein freien linearer der Temperaturanstieg mit Zeit angenommen, der Temperaturgradient betrug 80°C/min. Der Porendruck auf der the model), are simultaneously solved,. It is assumed that in each time step damage is constant, i.e. thermo-hygric properties of concrete are controlled by damage from previous time (load) step.

## Tabelle 1:

Thermo-hygrische Materialeigenschaften Table 1:

Thermo-hygric material properties

| Young's modulus E [MPa]                       | 30000 |
|---|-------|
| Poisson's ratio v                             | 0.18  |
| Tensile strength f <sub>t</sub> [MPa]         | 2.0   |
| Uniaxial compr. strength fc [MPa]             | 30.0  |
| Fracture energy G <sub>F</sub> [N/mm]         | 0.1   |
| Conductivity b [J/(msK)]                      | 1.67  |
| Heat capacity C [J/(kgK)]                     | 900   |
| Mass density ρ [kg/m <sup>3</sup> ]           | 2400  |
| Water/cement ratio                            | 0.5   |
| Saturation water content [kg/m <sup>3</sup> ] | 100   |
| Parameter $\alpha_a$                          | 0.0   |
| Parameter α <sub>n</sub>                      | 0.375 |
| Surface emissivity of water $\alpha_w$        | max.  |
| Surface emissivity of heat $\alpha_G$         | max.  |

After the Model has been verified bv recalculating simple examples from the literature (Bazant & Kaplan 1996), а parametric study of spalling of concrete cover was performed. A concrete slab is locally heated at the free surface (see Fig. 3). Varied are tensile strength, initial porosity, permeability and moisture content. Moreover, the role of geometrical instability in the problem of spalling is investigated. To obtain mesh objective results, the crack band method (Ozbolt et al. 2005) is used. Except at the free concrete surface, all boundaries of the specimen are restrained in all three directions. Eight node solid elements are used assuming plane strain The linear increase condition. of air temperature in time is assumed with a gradient of 80 ℃/min. Pore pressure at the surface is taken 1.0 kN/m<sup>2</sup>. The analysis is performed for time period of 12 minutes (duration of heating). The initial thermohygro-mechanical properties of concrete are summarized in Table 1.

freien Oberfläche wird gleich 1.0 kN/m<sup>2</sup> angenommen. Die Analyse wird für die Zeit von 12 Minuten (Dauer der Erhitzung) durchgeführt. Die anfänglichen thermohygrische Eigenschaften des Betons sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.



Abbildung 4:

Verteilung des Porendrucks vor und nach der Betonabplatzung (gepunktete Linie) Figure 4:

Typische Entwicklung des Porendrucks als Funktion des Abstandes von der erhitzten Oberfläche ist in Abbildung 4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Porendruck nach der Abplatzung bzw. nach der stark Rissentwicklung abnimmt. Die Abhängigkeit zwischen der Abplatzungstiefe und der Permeabilität ist in Abbildung 5 für zwei verschiedene Zugefestigkeiten des Betons dargestellt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Abplatzungstiefe mit der Zunahme der Permeabilität und mit der Abnahme des Anfangswassergehalts zunimmt. Weiterhin kann beobachtet werden. dass bei konstanter Anfangspermeabilität die Abplatzungstiefe mit der Zunahme der Zugfestigkeit des **Betons** zunimmt. Ein typisches Abplatzungsversagen im deformierten Zustand ist in Abbildung 6 gezeigt. Hier stellen dunkle Bereiche Risse bzw. kritische Hauptzugdehnungen dar. Die numerische Analyse zeigt, dass die Permeabilität des





Abplatzungstiefe für zwei verschiedene Zugfestigkeiten als Funktion der Permeabilität Figure 5:

Spalling depth for two tensile strengths of concrete as a function of permeability

The typical evolution of pore pressure, measured from the concrete surface, is shown in Fig. 4. It can be seen that after cracking (spalling) the pore pressure reduces significantly. The dependency between spalling depth and permeability is for two different tensile strengths of concrete shown in Fig. 5. The results show that the spalling depth increases with increase of permeability and with the reduction of the moisture content. Furthermore, for constant initial permeability the spalling depth increases with increase of tensile strength. Typical failure mode due to spalling (deformed state) is shown in Fig. 6 (dark

Distribution of pore pressure before and after spalling (dotted line)

Betons am stärksten das Abplatzungsverhalten beeinflusst. Die geometrische Instabilität zeigt dagegen nur einen geringen Einfluss auf die Abplatzungstendenz.

## Zusammenfassung

Es wurde die numerische Analyse der Betonabplatzungen infolae hoher Temperatur durchgeführt. Das in der FE Analyse eingesetzte konstitutive Modell ist im Rahmen der Kontinuumsmechanik formuliert. mit der Berücksichtigung der Hauptprinzipien der irreversiblen Thermodynamik. Die größten Schwierigkeiten sind mit der Identifizierung der Materialparameter verbunden, da sie alle nicht nur in dem thermo-hygrischen Teil des Modells sondern auch in dem mechanischen Teil miteinander gekoppelt sind. Das Modell ist in das 3D FE Programm implementiert. In dem Programm werden die zu Grunde gelegten thermohygro-mechanischen Gleichungen simultan mit der inkrementellen iterativen Integrationsmethode gelöst. Anschließend wird das Modell in der Untersuchung der explosionsartigen Betonabplatzungen infolge hoher Temperatur eingesetzt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Permeabilität des Betons den entscheidenden Einfluss auf das Abplatzungsverhalten aufweist. Der Einfluss der geometrischen Instabilität infolge der temperaturinduzierten Druckspannungen scheint keinen großen Einfluss zu haben. Weitere Überprüfung Modells und des zusätzliche numerische Untersuchungen sind notwendig, um das Problem der explosionsartigen Betonabplatzungen ausführlicher zu untersuchen.

zones indicate crack – maximal principal strain). The numerical analysis shows that permeability of concrete has the strongest influence on spalling of concrete cover. The influence of geometrical instabilities due to compressive stresses seems to be of minor importance.



#### Abbildung 6:

Typisches Abplatzungsversagen infolge hoher Temperatur

Figure 6:

Typical failure mode due to spalling of concrete cover

#### Conclusion

The paper deals with the numerical analysis of spalling of concrete at high temperature. The constitutive model employed in the analysis is formulated in the framework of continuum taking into account the basic principles of irreversible thermodynamics. The main difficulties are related to the identification of material parameters, which are all coupled not only in the thermo-hygric part of the model, but also in the mechanical part of the model. The model is implemented into a 3D finite element code. In the code, the governing thermo-hydro-mechanical equations are solved simultaneously using incremental iterative integration scheme. Subsequently, the model is used in the numerical study of spalling of concrete cover at high temperature. The results show that the permeability of concrete has the strongest influence on spalling of concrete cover. influence aeometrical The of instabilities due to compressive stresses seems to be of minor importance. Further

verification of the model and additional numerical studies are needed to clarify the problem of spalling of concrete cover at high temperature in more detail.

#### Literatur / References

Bazant, Z.P.; Kaplan, M.F. (1996): Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models, Longman, Harlow, 516 pp.

**Bažant, Z.P.; Thonguthai, W. (1978):** "Pore pressure and drying concrete at high temperature", *ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 104, No. EM5, pp. 1059-1079.

Harmathy, T.Z.; Allen, L.W. (1973): "Thermal properties of selected masonry unit concretes", *Journal of American Institute*, Vol. 70, pp. 132-144.

Khoury, G.A.; Grainger, B.N.; Sullivan, P.J.E. (1985): "Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimens and behaviour of individual constituents", *Magazine of Concrete Research*, vol. 37, no. 132, pp. 131-144.

Nielsen, C.V.; Pearce, C.J.; Bićanić, N. (2001):- "Theoretical model of high temperature effects on uniaxial concrete member under elastic restraint", *Magazine of Concrete Research*, vol. 54, no. 4, pp. 239-249.

**Ožbolt, J.; Kožar, I.; Eligehausen, R.; Periškić, G. (2005):** "Three-dimensional FE analysis of headed stud anchors exposed to fire", *Computers and Concrete*, vol. 2, no. 4, pp. 249-266.

**Schneider, U. (1986):** *Properties of Materials at High Temperatures-Concrete*, RILEM Technical Commitee 44-PHT, Technical University of Kassel, Kassel.

**Thelandersson, S. (1983):** "On the multiaxial behaviour of concrete exposed to high temperature", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 75, no. 2, pp. 271-282.

Wang, K.; Jansen, D.C.; Shah, P.S. (1997): "Permeability study of cracked concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 27, no. 3, pp. 381-393.

## ZUM TRAGVERHALTEN VON BEFESTIGUNGSMITTELN UNTER QUERLASTEN IM BEWEHRTEN BETON THE BEHAVIOUR OF FASTENERS UNDER SHEAR LOAD IN REINFORCED CONCRETE

von/by Klaus Schmid

## Einführung

Die Bruchlasten von Befestigungsmitteln am Rand unter Querlasten können durch eine Bewehrung erhöht werden. Es können Lasten erreicht werden, die um das 2- bis 3fache höher sind als die Bruchlasten im unbewehrten Beton. In der Literatur gibt es einige Modelle, um die Bruchlasten im bewehrten Beton zu berechnen. Die meisten dieser Modelle liefern allerdings Ergebnisse, die deutlich auf der sicheren Seite liegen. Deshalb ist die Effektivität der Bewehrung nach diesen Modellen relativ gering. Es ist daher notwendig, Modelle zu entwickeln, die die Bewehrung deutlich besser berücksichtigen.

Im folgenden Bericht werden experimentelle und numerische Untersuchungen für Betonkantenbruch am Rand mit Bewehrung beschrieben. Die Ergebnisse werden mit verschiedenen Modellen verglichen. Die existierenden Modelle sind für Ankerschienen nicht brauchbar. Deshalb wird ein Modell vorgeschlagen, um die Betonkantenbruchlast für Ankerschienen im bewehrten Beton zu berechnen.

## Allgemeines

Stahlversagen, Betonkantenbruch, pry-out und Herausziehen sind die üblichen Versagensarten für Befestigungsmitteln unter Querlast. Für diese Versagensarten gibt es Bemessungsmodelle, die in [2] beschrieben sind. Diese Modelle sind durch eine große Anzahl von Versuchen verifiziert worden. Die Bruchslasten der einzelnen Versagensarten können sehr gut vorausgesagt werden. Die Tragmechanismen sind bekannt.

Die Bruchlast einer Befestigung am Rand unter Querlast kann durch eine Bewehrung erhöht werden, z.B. in Form von Bügeln oder

#### Introduction

The failure load of fasteners under shear load near to an edge can be increased by supplementary or anchor reinforcement. Loads can be reached, which are 2 or 3 times higher than the value valid for unreinforced concrete. Several models to predict the failure load of fasteners in reinforced concrete are described in literature. Most of these models deliver rather conservative results. Therefore the calculated effectiveness of a supplementary reinforcement is relatively small. The development of models which consider the reinforcement much better is necessary.

In the present paper the results of experimental and numerical investigations in case of concrete edge failure with a supplementary reinforcement are discussed. The results are compared to different models. For channel bars the existing models are not usable. Therefore a model to calculate the concrete edge failure load in reinforced concrete for channel bars is proposed.

## In General

For fastenings under shear load in unreinforced concrete steel failure, concrete edge failure, concrete pry-out failure and pull-out failure are the most common failure modes. For these failures modes design methods are available [2]. The design methods are verified by a large number of tests. Therefore the ultimate loads for the individual failure modes can be predicted with sufficient accuracy. The mechanisms are well known.

The failure load of fasteners located at the edge of a member and resisting a shear load towards the edge can be increased by hanger reinforcement, e.g. in the form of stirrups or hairpins (Fig. 1).

Schlaufen (Abb. 1).

Die Effektivität einer Bewehrung in Form von Bügeln ist abhängig von der Verankerungslänge I<sub>1</sub> eines Bügelschenkels im Ausbruchkegel. Wird der Abstand zwischen Bügel und dem Befestigungsmittel verringert, erhöht sich die Verankerungslänge I<sub>1</sub>, und daher wird die Bruchlast ebenfalls erhöht (Abb. 2).



Abbildung 2: Verankerungslänge I<sub>1</sub> [2] Figure 2: Anchorage length I<sub>1</sub> [2]

Es gibt einige Bemessungsmodelle, um die Tragfähigkeit des bewehrten Betons zu berechnen. Speziell für kleine Randabstände sind die berechneten Bruchlasten sehr konservativ. Deshalb wird ein neues Modell benötigt, mit dem die Bruchlasten besser bestimmt werden können.

## Bemessungsmodelle für Betonkantenbruch im bewehrten Beton *CEN-Model*

In CEN [1] wird ein Modell vorgeschlagen, mit dem man den Widerstand einer Verankerung gegenüber Betonkantenbruch mit einer Rückhängebewehrung berechnet werden kann. Dieses Modell basiert auf einem Fachwerkmodell. Das Prinzip dieses Fachwerkmodells ist in Abb. 3 dargestellt.

Zur Berechnung des mittleren Widerstandes der Bewehrung wird Gleichung (1) vorgeschlagen.



Abbildung 1: Effektivität einer Bewehrung [2] Figure 1: Effect of reinforcement [2]

The effectiveness of the reinforcement in form of stirrups depends on the anchorage length  $I_1$  of a leg of the stirrup. If for a certain edge distance  $c_1$  the distance between stirrup and fastener is decreased, the anchorage length  $I_1$  increases, and therefore the ultimate load could increase as well (Fig. 2).

There are some design methods to calculate the shear capacity provided by the hanger reinforcement. But especially for small edge distances the calculated values are rather conservative. Therefore a new design method, which predicts the ultimate failure load more exactly and thus more economical is needed.

## Design methods for concrete edge failure with reinforcement *CEN-Model*

In CEN [1] a model is suggested to calculate the resistance of anchorages against concrete edge failure with a special reinforcement. This model is based on a strut-and-tie model. The main principle of this strut-and-tie model is shown in Fig. 3.

$$V_{Rm,a} = \sum_{n} \frac{l_1 \cdot \pi \cdot d_s \cdot f_{bm}}{\alpha}$$
(1)

mit:

- n = Anzahl der Bügelschenkel im Ausbruchkegel
- $I_1$  = effektive Länge eines Bügels  $\ge I_{b,min}$
- $I_{b,min} = 10 \cdot d_s$  für Stäbe
  - =  $4 \cdot d_s$  für Haken oder Schlaufen
- d<sub>s</sub> = Bügeldurchmesser
- $f_{bm}$  = Verbundspannung nach EC 2
- $\alpha$  = Einflussfaktor nach EC 2

= 0,7 für Haken

Abb. 4 zeigt den Vergleich zwischen gemessenen und nach Gl. (1) berechneten Bruchlasten für Versuche mit Kopfbolzen, Querkraftdornen und Kletterkonen.



## Abbildung 4:

Vergleich zwischen gemessenen und nach Gl. (1) berechneten Bruchlasten

## Figure 4:

Comparison of measured failure loads and values calculated according to eq. (1)

Man erkennt, dass das CEN-Modell die Bruchlasten deutlich unterschätzt. Für 61 Versuche ergibt sich ein Mittelwert von 2,1. Der Variationskoeffizient ist mit 34% relativ hoch. Die nach Gl. (1) berechneten Bruchlasten im bewehrten Beton sind nicht viel höher als die Bruchlasten im unbewehrten Beton. Daher ist die Effektivität einer Bewehrung relativ klein, und das CEN-Modell liefert Ergebnisse, die nicht sehr wirtschaftlich sind.



Abbildung 3: Fachwerkmodell nach CEN Figure 3: Strut-and-tie model in CEN

To calculate the mean resistance of the supplementary reinforcement of one fastener equation (1) should be used:

$$V_{Rm,a} = \sum_{n} \frac{l_1 \cdot \pi \cdot d_s \cdot f_{bm}}{\alpha}$$
(1)

with:

- n = number of legs of the reinforcement in the assumed failure cone
- $I_1$  = effective length of the stirrup  $\ge I_{b,min}$
- $I_{b,min} = 10 \cdot d_s$  for straight bars
  - =  $4 \cdot d_s$  for bars with hook or bend
- $d_s$  = diameter of the reinforcement bar
- $f_{bm}$  = mean bond strength acc. to EC 2
- $\alpha$  = influencing factor according to EC 2 = 0,7 for hooked bars

In Fig. 4 a comparison of measured failure loads in tests with headed studs, climbing cones, special shear dowels and dowels with mean failure loads calculated according to the CEN model is shown.

It is obviously that the CEN model delivers failure loads which a very conservative. For n=61 tests the mean ratio of measured to calculated failure loads is approximately 2,1. The coefficient of variation of the test results is large with v=34%. The calculated failure loads in concrete members with supplementary reinforcement according to equation (1)

## Querkraftmodell

In [3] wird vorgeschlagen, den Abstand zwischen dem belasteten Befestigungsmittel und der Bügelachse bei der Berechnung der Bruchlasten zu berücksichtigen. In einigen Versuchen wurden Dehnmessstreifen (DMS) an den Bügelschenkeln appliziert. Die gemessenen Dehnungen zeigen, dass die Bügelkräfte vom Abstand zum belasteten Anker abhängen. Die Bügelkräfte nehmen mit zunehmendem Abstand ab, s. Abb. 5.



Abbildung 5: Kraft in den Bügeln, gemessen mit DMS Figure 5:

Forces in the stirrups measured with strain gauges

Deshalb wurde in [3] Gleichung (2) entwickelt. Dabei wird der Abstand der Bügel zur Belastung durch den Faktor  $\psi_{2,i}$  berücksichtigt.

$$V_{um,c} = V_{um,c,1} + V_{um,c,2} \le A_s \cdot f_y$$
(2)

$$V_{um,c,1} = 0.36 \cdot \sum_{i=1}^{n} \Psi_{2,i} \cdot A_{s} \cdot f_{y} \cdot \sqrt{f_{cc} / 30}$$
(3)

$$V_{um,c,2} = \sum_{i=1}^{n} \pi \cdot d_s \cdot l_{1,i} \cdot f_{bm}$$
(4)

mit:

$$\psi_{2,i} = 1-0, 2 \cdot (e_i/c_1)$$

- ei = Abstand zw. Bügel und Belastung
- c1 = Randabstand
- d<sub>s</sub> = Bügeldurchmesser
- A<sub>s</sub> = Bügelquerschnittsfläche
- fy = Fließgrenze des Bügels
- $f_{bm}$  = Verbundspannung =0,67 · ( $f_{c,m}$ -8)<sup>2/3</sup>
- $f_{cc}$  = Betondruckspannung
- I<sub>1,i</sub> = eff. Verankerungslänge eines Bügelschenkels

are not much higher than the failure loads of anchorages in concrete without reinforcement. Therefore the effect of the reinforcement is very low, and the CEN model delivers uneconomical results.

## Model for dowels and special shear dowels

In [3] it is suggested to account for the distance between the axis of a leg of a reinforcement stirrup on the failure load. In some tests strain gauges were applied on the stirrups to measure the forces in the stirrup legs. The strain gauges displayed the dependency of the forces in the stirrups on the distance to the loaded anchor. The forces decreased with increasing distance, as shown in Fig. 5.

Therefore in [3] equation (2) was developed, which takes into account the distance between a stirrup and the loaded dowel by the factor  $\psi_{2,i}$ .

$$V_{um,c} = V_{um,c,1} + V_{um,c,2} \le A_s \cdot f_y$$
 (2)

$$V_{um,c,1} = 0.36 \cdot \sum_{i=1}^{n} \psi_{2,i} \cdot A_s \cdot f_y \cdot \sqrt{f_{cc} / 30}$$
(3)

$$V_{um,c,2} = \sum_{i=1}^{n} \pi \cdot d_s \cdot l_{1,i} \cdot f_{bm}$$
(4)

where:

 $\psi_{2,1} = 1-0, 2 \cdot (e_i/c_1)$ 

- e<sub>i</sub> = distance between stirrup an loaded anchor
- $c_1 = edge distance$

- $A_s$  = cross-section of stirrup
- fy = yield strength of stirrup
- $f_{bm}$  = mean bond strength =0,67  $\cdot$   $(f_{c,m}-8)^{2/3}$
- $f_{cc}$  = concrete strength
- $I_{1,1}$  = effective anchorage length of a stirrup leg

Abb. 6 zeigt den Vergleich zwischen gemessenen und nach Gleichung (2) berechneten Bruchlasten. Für 69 Versuche mit Kopfbolzen, Kletterkonen und Querkraftdornen ergibt sich ein Mittelwert von gemessener zu berechneter Bruchlast von 0,95. Der Variationskoeffizient der Versuchsergebnisse beträgt v=21%.

Verglichen mit dem Modell nach CEN können die Bruchlasten wesentlich besser vorausgesagt werden, und die Streuung ist deutlich geringer.

#### Ankerschienen

Wendet man Gleichung (2) an, um die Betonkantenbruchlast von Ankerschienen im bewehrten Beton zu berechnen, stellt man fest, dass der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Bruchlasten nicht sehr zufrieden stellend ist. Abb. 7 zeigt die gemessenen Bruchlasten als eine Funktion der berechneten Bruchlasten. Der Mittelwert liegt bei m=0,85, und der Variationskoeffizient ist mit v=37% sehr hoch.



#### Abbildung 7:

Vergleich zwischen gemessenen und nach Gl. (2) berechneten Bruchlasten

#### Figure 7:

Ratio of measured to calculated failure load according to equation (2), results of tests with channel bars

## Durchgeführte Versuche

Dieses Ergebnis führt zu der Frage, warum das Verhalten der Ankerschienen nicht mit dem Modell für Querkraftdorne beschrieben Fig. 6 shows the comparison of measured and calculated failure loads according to equation (2). For 69 tests with headed studs, climbing cones, dowels and special shear dowels the mean ratio of measured loads to calculated loads is about 0,95. The coefficient of variation of the test results is v=21%.



#### Abbildung 6:

Vergleich zwischen gemessenen und nach Gl. (2) berechneten Bruchlasten

#### Figure 6:

Ratio of measured to calculated failure loads according to equation (2)

Compared to the CEN model the failure loads can be predicted much better, and the scatter is relatively low.

#### **Channel bars**

Using equation (2) to calculate the ultimate concrete edge failure load of channel bars in a concrete member with supplementary reinforcement, the comparison of measured to calculated failure load is very unsatisfying. Fig. 7 shows the measured failure load as a function of the calculated value. The mean ratio is about m=0,85, and the coefficient of variation of v=37% is very high.

#### **Performed tests**

This result leads to the question, why the behaviour of anchor channels could not be explained by the dowel model. Therefore tests were performed. Several parameters were varied in these tests, e.g. the number of stirrups, the distance of the stirrups to the loaded anchors, the diameter of the stirrups etc.. Most of the tests were performed with werden kann. Deshalb wurden Versuche mit Ankerschienen durchgeführt, bei denen verschiedene Parameter variiert wurden. Die meisten Versuche wurden mit der Schienengröße 53/34 durchgeführt. In einer Serie wurde der Einfluss der Schienengröße untersucht. Die verwendete Versuchseinrichtung ist in Abb. 8 dargestellt.

In den folgenden Abbildungen 9 bis 11 sind die Einflüsse der einzelnen Parameter auf die Bruchlast dargestellt.



#### Abbildung 9:

Einfluss des Achsabstandes der Bewehrung für verschiedene Randabstände c

#### Figure 9:

Influence of spacing a of the stirrups for different edge distances c



## Abbildung 10:

Einfluss des Bügeldurchmessers d $_{\rm s}$  für verschiedene Randabstände c

## Figure 10:

Influence of diameter  $d_s$  of the stirrups for different edge distances c

Die Abbildungen 9 bis 11 zeigen, dass die Bruchlasten nicht durch verschiedene Anordnungen der Bewehrung beeinflusst werden. Sowohl der Achsabstand der Bewehrung, als auch die Anzahl der Bügel im Ausbruchkegel als auch der Bügeldurchmesser beeinflussen the channel bar size 53/34. In one series the influence of the size of the channel bars were tested. The test setup is shown in Fig. 8.



Abbildung 8: Versuchseinrichtung Figure 8: Test setup

In the following figures 9 to 11 the influence of the individual parameters is shown.



## Abbildung 11:

Einfluss der Anzahl n der Bügel für verschiedene Randabstände c

#### Figure 11:

Influence of number n of stirrups for different edge distances c

Fig. 9 to Fig. 11 show, that the ultimate failure load is not affected by different assemblies of the reinforcement. The spacing of the stirrups, the number of legs in the concrete break-out body or the diameter of the stirrups did not influence significantly the shear capacity of the anchorage.

This result is very surprising. Therefore numerical investigations were performed to study the failure mechanism. The simulations nicht wesentlich die Querkrafttragfähigkeit der Verankerung.

Dieses Ergebnis ist sehr überraschend. Deshalb wurden numerische Untersuchungen durchgeführt, um den Versagensmechanismus genauer zu untersuchen. Die Simulationen wurden mit dem dreidimensionalen nichtlinearen finite Elementprogramm MASA durchgeführt. In Abb. 12 ist das verwendete Modell dargestellt. Um die Rechenzeit zu verkürzen, wurde die Symmetrie ausgenützt. Die Bewehrung wurde mit eindimensionalen Stabelementen modelliert. Die Endknoten der Stabelemente waren direkt mit den Betonelementen verbunden, so dass der Verbund zwischen den beiden Elementen starr war. In diesem Beispiel wurden insgesamt 4 Bügel modelliert, wovon 2 Bügel zwischen den belasteten Ankern lagen, siehe Abb.13.



Abbildung 13: Modellierte Bewehrung Figure 13: Modelled reinforcement

Das Ergebnis der numerischen Simulation dieses Beispiels ist in Abb. 14 und 15 zu sehen. Man kann erkennen, dass das Rissbild nicht einem normalen Betonkantenbruch entspricht, wie er im unbewehrten Beton auftritt. Der Beton wird vielmehr über die Bewehrung, die direkt unter der Ankerschiene liegt, abgeschert. In den durchgeführten Versuchen wurde ebenfalls dieses Versagen festgestellt. were done with the three-dimensional (3D) nonlinear finite element code MASA. In Fig. 12 the used model is shown. To reduce the calculation time, the symmetry was utilized. For the flexural reinforcement onedimensional bar elements were used. The bar elements shared their end nodes with the adjacent three-dimensional concrete elements, which resulted in a fixed connection between both elements. In this case a total of 4 stirrups were modelled. 2 stirrups were arranged between the loaded anchors, see Fig. 13.



Abbildung 12: Verwendetes Modell Figure 12: Used model

One example of the results of the numerical simulations is shown in Fig. 14 and 15. It can be seen that the failure pattern is not a normal concrete edge failure as it occurs in unreinforced concrete. In fact the concrete is sheared off over the reinforcement bars which lied directly under the channel bar. In the performed tests this failure pattern was also observed.



Abbildung 14: Versagensbild Figure 14: Crack pattern



Abbildung 15: Frontansicht Figure 15: Front view of the mode

Der Grund für dieses modifizierte Rissbild sind die Bügel zwischen den belasteten Ankern. Sie verhindern den normalen Betonkantenbruch. Der Riss beginnt sich zu bilden, wird aber durch die Bügel gehalten.

## Vorschlag zur Berechnung der Bruchlasten für Ankerschienen in bewehrtem Beton

Im vorangegangenen Kapitel wurde das Tragverhalten von Ankerschienen im bewehrten Beton untersucht. Mit den Versuchsergebnissen und numerischen Untersuchungen wurde Gleichung (5) entwickelt, um die Bruchlasten zu berechnen.

 $V_{u,c,re} = \alpha_{re} \cdot c^{-0,12} \cdot V_{u,c} \le \sum A_s \cdot f_{yk}$ (5)
Mit:

 $\alpha_{re} = 4,2$  für Ankerschienen >28/15

= 2,1 für Ankerschienen 28/15

V<sub>u,c</sub>= Bruchlast im unbewehrten Beton entsprechend Potthoff [2]

c = Randabstand

Abb. 16 zeigt den Vergleich zwischen den in den Versuchen und numerischen Simulationen gemessenen Bruchlasten zu den nach Gl. (5) berechneten Bruchlasten. Der Mittelwert beträgt m=1,02, und der Variationskoeffizient liegt bei v=19%. Dies zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch. The reason for this modified failure pattern is, that the stirrups between the loaded anchors prevent the normal concrete edge cone. The crack wants to start, but the stirrups hold the crack together.

## Proposal for calculating the ultimate failure load for channel bars in reinforced concrete

In the previous chapter the behaviour of channel bars in reinforced concrete was discussed. With the results of the performed tests and numerical simulations equation (5) was developed to calculate the ultimate failure load.

$$V_{u,c,re} = \alpha_{re} \cdot c^{-0,12} \cdot V_{u,c} \le \sum A_s \cdot f_{yk}$$
(5)

Where:

 $\alpha_{re} = 4,2$  for channel bars >28/15

= 2,1 for channel bar 28/15

V<sub>u,c</sub>= ultimate failure load of unreinforced concrete according to Potthoff [2]

c = edge distance

Fig. 16 shows the comparison of the failure loads measured in the performed tests and numerical simulations to the failure loads calculated according to equation (5). The mean ratio is about m=1,02, and the coefficient of variation of v=19% confirms a good correlation between predicted and measured failure loads.



#### Abbildung 16:

Vergleich zwischen gemessenen und nach Gl. (5) berechneten Bruchlasten

#### Figure 16:

Comparison of measured and calculated failure loads according to eq. (5)

Die vorgeschlagene Gleichung (5) ist nur gültig innerhalb bestimmter Anwendungsgrenzen:

- Bewehrung in Form von Bügeln
- min. 3 Bügel, wovon 1 Bügel zwischen den Ankern liegen muss
- max. Abstand des 1. Bügels zum Anker:
   50mm
   für Ankerschiene 28/15: 25mm
- horizontale Betondeckung max. 25 mm
- Bügeldurchmesser d<sub>s</sub>
  - Ankerschiene 28/15 and 38/17: 6mm≤d<sub>s</sub>≤8mm Ankerschiene 40/22 and 53/34:

68mm≤d₅≤16mm

Ankerschiene 72/48:

12mm≤d₅≤20mm

- Achsabstand s: 100mm≤s≤300mm
- Randabstand c: 40mm≤c≤300mm

In allen durchgeführten Versuchen war die eingelegte Bewehrung überbemessen. D.h. die maximale Bruchlast berechnet nach Gl. (5) war kleiner als die maximal aufnehmbare Kraft der Bewehrung. Deshalb müssen weitere Versuche durchgeführt werden, um die Gültigkeit der Gl. (5) in diesem Fall zu überprüfen. Es wird erwartet, dass in diesen Versuchen die Anordnung der Bewehrung einen deutlichen Einfluss auf die Bruchlast hat.

## Zusammenfassung

Die Berechnung der Bruchlasten von Kopfbolzen, Kletterkonen und Querkraftdornen im bewehrten Beton mit dem Modell nach CEN (Gl. (1) liefert ziemlich konservative und unwirtschaftliche Ergebnisse. Im Vergleich dazu können die Bruchlasten mit dem Modell, dass in [3] (Gl. (2)) beschrieben ist, wesentlich genauer berechnet werden. Für Ankerschienen ist jedoch dieses Modell nicht sehr brauchbar. Deshalb wurde Gl. (5) vorgeschlagen, um die Betonkantenbruchlasten für Ankerschienen zu berechnen. Diese GleiThe proposed equation (5) is valid within the following boundary conditions:

- reinforcement in form of stirrups
- min. 3 stirrups, whereof 1 stirrup must be positioned between the 2 anchors
- max. distance from the first stirrup to the anchor: 50mm for the channel bar 28/15: 25mm
- horizontal concrete cover max. 25 mm
- diameter d<sub>s</sub> of stirrups
   channel bar 28/15 and 38/17:
   6mm≤d<sub>s</sub>≤8mm
   channel bar 40/22 and 53/34:
   68mm≤d<sub>s</sub>≤16mm
   channel bar 72/48:
   12mm≤d<sub>s</sub>≤20mm
- anchor spacing s: 100mm≤s≤300mm
- edge distance c: 40mm≤c≤300mm

In all performed tests the engaged reinforcement was over-designed. That means, that the ultimate failure load according to equation (5) was smaller than the maximum load capacity of the reinforcement. Therefore tests will be performed to check the validity of eq. (5) in this case. It is expected, that in these tests the anchorage capacity of the supplementary reinforcement will influence significantly the test results.

## Summary

The calculation of the ultimate failure loads of headed studs, climbing cones, dowels and special shear dowels in reinforced concrete with the model given in CEN (eq. (1)) delivers rather conservative, but uneconomic results. By contrast with the model suggested in [3] (eq. (2)) the ultimate failure loads can be predicted with sufficient accuracy. However for channel bars, this model was not very usable. Therefore a new eq. (5) is suggested to calculate the ultimate failure load of channel bars in case of concrete edge failure. This chung ist allerdings nur gültig innerhalb bestimmter Anwendungsgrenzen. In den durchgeführten Versuchen war die eingelegte Bewehrung überbemessen. Es fehlen Versuche für die Fälle, in denen die Bewehrung fließt oder bricht. equation is valid only within certain boundary conditions. In the tests the reinforcement was overdesigned. Tests are missing for the cases, in which the reinforcement yields or ruptures.

## Literatur / References

- 1. European Organisation for Standardization (CEN TS) (2004): Design for Fastenings for Use in Concrete, Final Draft, 2004.
- 2. Eligehausen, R.; Mallée, R.; Silva, John F.: Anchorage in Concrete Construction, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2006.
- 3. Eligehausen, R.: Gutachtliche Stellungnahme zur Umstellung der Schubdornenzulassungen auf DIN 1045-1 - Anonymisierte Fassung - , 2004

## TRAGVERHALTEN VON INJEKTIONSDÜBELN IM MAUERWERK UNTER QUERLASTEN LOAD BEARING BEHAVIOUR OF INJECTION ANCHORS IN MASONRY UNDER SHEAR LOADING

von/ by Georg Welz

## Zusammenfassung

In dem laufenden Forschungsvorhaben wird die Tragfähigkeit von Injektionsdübeln unter Querlasten in Mauerwerk untersucht und den Vorgaben des Entwurfs ETAG 029 gegenübergestellt. Dabei wurden zunächst die Einflüsse bezüglich Lastrichtung, Rand- und Achsabständen und Versagensarten ermittelt und ein Vergleich der Höchstlasten bei Zugund Querbeanspruchung unter gleichen Randbedingungen durchgeführt.

Weiterhin wurden die Interaktionsgleichung für Lastangriff unter beliebigem Angriffswinkel überprüft und für Lochsteine eine alternative Bemessung vorgeschlagen. Es wurden die bei Querbelastung maßgebenden Parameter bestimmt und ein Bemessungsmodell bei der Versagensart "lokales Materialversa-

## Einleitung

Für Befestigungen in Mauerwerk werden Injektionsdübel mit Gewindestangendurchmessern von 6 mm bis 16 mm als Einzelbefestigung eingesetzt. Mitte 2007 wurde dazu von der EOTA- Arbeitsgruppe eine Leitlinie für europäische technische Zulassungen für Injektionsdübel in Mauerwerk [1] verabschiedet. Das dort beschriebene Vorgehen für von der ETAG abweichende Steine setzt dabei voraus, dass die Querlasttragfähigkeit immer mindestens der zentrischen Zugtragfähigkeit entspricht.

Das Tragverhalten von Injektionsdübeln in Mauerwerk nach DIN unter zentrischer Zuglast wurde u. a. in [3] und [5] bis untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Höchstlast von Injektionsdübeln unter zentrischer Belasgen" vor dem Dübel für Voll- und Lochsteine vorgestellt.

Dazu wurden und werden Versuche unter Querlast, zentrische Zugversuche zum Vergleich und Auszugsversuche unter beliebigem Lastangriffswinkel zur Wandoberfläche an großformatigen Steinelementen und gemauerten Wänden aus Voll- und Lochsteinen durchgeführt. Verschiedene Dübeltypen werden als Einzel- und Zweifachbefestigungen mit und ohne Einfluss von Rändern und Fugen untersucht.

Ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen soll im Weiteren das Tragverhalten in numerischen Parameterstudien mit dem von Ozbolt [6] entwickelten nichtlinearen FE-Programm MASA simuliert werden.

tung von zahlreichen Parametern abhängt. Für die Dübeltragfähigkeit sind vor allem die Untergrundeigenschaften und die Steingeometrien einschließlich der Lochkonfiguration von Bedeutung. In [5] wurde dazu aufgrund theoretischer und experimenteller Untersuchungen ein Bemessungsmodell für zentrischen Zug vorgestellt, das die maßgebenden Parameter berücksichtigt.

Das Verhalten von querlastbeanspruchten Injektionsdübeln in Mauerwerk hingegen ist bisher noch kaum erforscht. Es liegen nur wenige Versuchsserien mit Einzeldübeln vor, die zudem fast ausschließlich in Einzelsteinen gesetzt waren. Weiterhin gibt es keine Erkenntnisse zur Verankerung in Steinen aus anderen europäischen Ländern, die nicht einer DIN oder DIBt-Zulassung entsprechen.

Die für den Verankerungsgrund Beton ermittelten Untersuchungsergebnisse und Lastansätze lassen sich aufgrund der geringeren

## Untersuchungen

Für das Forschungsvorhaben standen zunächst die folgenden drei Fragestellungen im Vordergrund:

- Vergleich der Widerstände bei zentrischer Zug- und Querbelastung (ggf. vertikal und horizontal) an gleicher Setzposition; i. d. R. ohne Einfluss von Rändern und Überprüfung der Interaktion für beliebige Winkel
- Untersuchungen am Steinrand (freier Rand oder Fugen) zur Bestimmung des kritischen Randabstandes c<sub>cr</sub>, Vergleich der Ergebnisse mit den Vorgaben in der ETAG 29 für Kantenbruch und zur Behandlung von unvermörtelten Fugen
- Bestimmung des kritischen Achsabstandes s<sub>cr</sub> für Zweifachbefestigungen

Es wurden vier verschiedene Dübelsysteme in Voll- und Lochsteinwänden untersucht. Bei den einzelnen Systemen wurden teilweise verschiedene Hülsenlängen, Hülsendurchmesser und Gewindestangengrößen verwendet. Die Querlastversuche wurden, wenn möglich, zunächst in Referenzposition, d.h. möglichst ohne Rand- oder Fugenein-

## Dübelsysteme und Versuchsaufbau

Die verwendeten Injektionsdübel bestehen aus dem Injektionsmörtel, einer Ankerstange mit Unterlegscheibe und Mutter und einer Siebhülse bzw. Zentriertülle. Siebhülsen werden bei Lochsteinmauerwerk verwendet, um eine Weglaufen des Mörtels in die Kammern des Steines zu verhindern und einen ausreichenden Hinterschnitt zu erzeugen. Der Injektionsmörtel besteht aus den Komponenten Harz und Härter wird ungemischt Festigkeiten und des unterschiedlichen Materialverhaltens von Mauersteinen, aber vor allem auch wegen der planmäßige vorhandenen Kammern und Löchern i. A. nicht übertragen

fluss in Steinmitte durchgeführt. Anschliessend wurden unter den gegeben Fragestellungen ggf. weitere Setzpositionen zu Steinoder Wandrändern hin untersucht. Bei den Steinen, bei denen ein Einfluss der Belastungsrichtung vermutet wurde, wurden Versuche mit vertikaler und horizontaler Querlast durchgeführt.

Die Vorgehensweise bei den Zweifachbefestigungen entsprach diesem Vorgehen im Wesentlichen, wobei keine zentrischen Vergleichsversuche durchgeführt wurden. Als Achsabstände bei den Zweifachbefestigungen wurden i. A. 50 und 100 mm gewählt.

In Bild 1 werden die untersuchten Setzpositionen, Befestigungsarten und Richtungen der Belastung erläutert.



a) Ansicht b) Schnitt **Bild 1:** *Setzpositionen und Dübelanordnung* 

als Mörtelkartuschensystem oder Foliengebinde geliefert (Bild 2). Bei der Montage werden die Komponenten des Mörtels mit einer Auspresspistole mit Statikmischeraufsatz vermengt und in das Bohrloch injiziert.



Bild 2: Bestandteile von Injektionssystemen

Die Querlastversuche werden liegend auf dem am IWB vorhandenen Spannboden mit einer Querzuganlage durchgeführt. Hierzu werden aus den Mauersteinen Wandscheiben in einem Tragrahmen erstellt, der es ermöglicht, das Mauerwerk vorzuspannen und flach abzulegen. Bild **3** zeigt schematisch den Versuchsaufbau mit einem Wandrahmen.

Die Schrägzugversuche erfolgten mit Hilfe einer verstellbaren Vorrichtung (Schrägzuganlage) nach Bild 4, die Auszugwinkel zwischen 30° und 60° ermöglicht.

## Versuchsergebnisse

Die erreichten Querlasten für Einzelversuche ohne Randeinfluss sind abhängig von Art und Festigkeit des Verankerungsgrundes (Steinart), vom Bohrloch- bzw. Hülsendurchmesser, von der Gewindestangengröße und der Einbindetiefe. Bei Lochsteinen hat das Lochbild einen entscheidenden Einfluss auf das Tragverhalten. Vor allem die Abmessungen des Außenstegs und die Tiefe der dahinter liegenden Aussenkammer sind hier die maßgebenden Parameter, da von ihnen abhängt, ob ein Dübel im Innensteg verankern werden kann und sich somit wesentlich günstigere Hebelarmverhältnisse ergeben (vgl. Bild 5).

Bei den Querlastversuchen in Lochsteinen und niederfesten Vollsteinen ( $\beta \le 12N/mm^2$ ) trat immer lokales Versagen des Untergrundes vor dem Dübel auf. Dabei wurde der



**Bild 3:** Mauerwerkswand in Tragrahmen auf Spannboden für Querlastversuche



Bild 4: Schrägzuganlage auf Mauerwerk



Bild 5: Einfluss der Verankerungstiefe

Dübel in den Untergrund eingedrückt und es kam in einigen Fällen zu muschelförmigen Abplatzungen. In Porenbeton und für 50 mm Hülsenlänge in den Leichtbetonsteinen und den höherfesten Kalksandlochsteinen war das lokale Versagen zum Teil kombiniert mit einem lastabgewandten Ausbruchkegel (Pryout), der allerdings erst nach großen Verschiebungen auftrat. In Versuchen in Bei den höherfesten Vollsteinen  $(\beta \ge 12N/mm^2)$ , hier nur den Mauerziegeln, spalten die mit 2 DF sehr kleinformatigen Steine und es kommt nur zu geringen Eindrückungen in den Untergrund ( $\le 5mm$ ) bevor die Höchstlasten erreicht werden und der Dübel durch eine Kombination aus Biegebruch und Abscheren versagt.

Nach dem Spalten des Steines ist bei den durchgeführten Versuchen im Mauerwerksverband im Gegensatz zu den bisherigen Versuchen im Einzelstein noch eine Steigerung der Querkraft möglich.

Bei allen Versuchsserien lag der Mittelwert der Höchstlasten für Querkraftbelastung zumindest gleichauf mit, meist aber deutlich über dem Mittelwert für die vergleichbaren, zentrisch gezogenen Dübel, wie in Bild 6 zu erkennen ist.



Bild 6: Querlasten bezogen auf mittlere zentr. Zuglasten in Voll- (oben) und Lochsteinen (unten)

Die für randferne Befestigungen getroffenen Aussagen gelten allgemein auch für Querlastversuche mit Randeinfluss. Weiterhin ist bei Randeinfluss zwischen Verankerungen innerhalb der Wand mit Abstand zur (unvermörtelten) Stoßfuge, zum freien Rand hin und in der Lager- bzw. Stoßfuge zu unterscheiden. Während bei ersten beiden die Steine im Versuch fast immer spalten (im Verband) bzw. ein Kantenbruch erzeugt wird, kann dies im relativ weichen Mörtel der Lagerfuge und in der Stoßfuge, bei denen quasi bereits in einer Art Riss verankert wird, nicht vorkommen.

Bei den Versuchen in Stoß- und Lagerfugen gibt es z. T. ein geringes lokales Eindrücken in den Untergrund, das eigentliche Versagen ist aber ein aus der daraus resultierenden Biegung mit verursachtes Abscheren des Stahles, so dass die Abscherlasten nach [3] für Verbunddübel in Beton trotz Erfüllen der Randbedingungen nicht erreicht werden.

Bei den Versuchen mit Abstand zur unvermörtelten Stoßfuge ist, wie bei den Versuchen in Steinmitte, nach dem Spalten eine Laststeigerung durch lokales Eindrücken in den Untergrund möglich. Das Spalten ist meist mit einem ersten Lastmaximum verbunden und das nachfolgende Schließen der Stoßfuge bis zum Wiederanstieg der Last durch eine deutliche Verschiebungszunahme gekennzeichnet. Die Höchstlasten liegen im Streubereich der Versuche in Steinmitte.

Bei horizontaler (zum Rand gerichteter) Querbelastung am freien Rand wird die Höchstlast durch Spalten bzw. Kantenbruch erreicht und die Lasten steigen mit Vergrößerung des Randabstandes an. Bei den Vbl-Steinen ist bei einem Randabstand von 100 mm vor dem Kantenbruch bereits lokales Eindrücken in den Untergrund festzustellen und die Höchstlasten erreichen teilweise die Werte in Steinmitte, so dass hier bereits ein Übergangsbereich vorliegt. Bei vertikaler (randparalleler) Querlast in den Vollziegeln erfolgt das Spalten bei der 2,8fachen Lasten gegenüber der Lastrichtung zum Rand und es gibt i. A. noch geringe Steigerungen bis zur Höchstlast unter Stahlbruch mit Biegeeinfluss (s. o.).

In Draft ETAG 029, Anhang C werden für in einer ETA untersuchte Steine Formeln zur Berechnung der Höchstlasten bei Steinkantenbruch angegeben. In Tabelle 1 werden die Versuchsergebnisse den nach o. g. Formeln berechneten Werten gegenübergestellt. Da die Formeln charakteristische Werte liefern, wurden sie durch den Faktor 0,7 dividiert, um sie mit den Mittelwerten aus den Versuchen vergleichen zu können. Für Lochsteine gilt der Wert nur für Randabstände ab 100 mm, deshalb wurde er für den Vergleich ebenfalls umgerechnet.

# **Tabelle 1:** Vergleich der Steinkantenbruchlasten<br/>in Voll- (oben) und Lochsteinen<br/>(unten) mit Regelungen in ETAG 029

| Stein                    | β <sub>ST</sub>  | Versuchs-<br>bezeichnung | с    | Last-<br>richtung | n   | v       | $V_{u,m,test}$     | $V_{u,m,ETAG}^{(1)}$ | V <sub>u,m,test</sub> V <sub>u,m,ETAG</sub> |
|--------------------------|--|--------------------------|------|-------------------|-----|---------|--------------------|----------------------|---|
|                          | [N/mm <sup>2</sup> ]   |                          | [mm] |                   | [-] | [%]     | [kN]               | [kN]                 | [-]   |
| M=12                     | 25.4   | A1_Mz-Q-S60v             | 60   | Vv                | 5   | 8,9     | 9,43 <sup>2)</sup> | 8,20                 | 1,15  |
| WIZ1Z                    | 20,4   | A1_Mz-Q-S60h             | 60   | Vh                | 5   | 18,5    | 3,07               | 4,55                 | 0,67  |
| K010 40E                 | 20.9   | C50QvK4D12C16m10         | 50   | Vv                | 3   | (4,7)3) | $(16,97)^{3)}$     | 6,85                 | (2,48) <sup>3)</sup>                        |
| K312-40F                 | 29,0   | C50QhK4D12C16m10         | 50   | V <sub>h</sub>    | 3   | 18,0    | 5,28               | 3,80                 | 1,39  |
| KODE10                   | 17.0   | Q1                       | 50   | V <sub>h</sub>    | 4   | 6,1     | 6,51               | 2,91                 | 2,24  |
| KSPE12                   | 17,5   | Q2                       | 100  | V <sub>h</sub>    | 4   | 7,8     | 17,26              | 8,34                 | 2,07  |
| VILIO                    | 2.15   | C50QvVbl2A16m8k          | 50   | V <sub>h</sub>    | 5   | 7,0     | 2,97               | 1,22                 | 2,43  |
| VDIZ                     | 3,15   | C100QvVbl2A16m8k         | 100  | Vh                | 6   | 6,8     | 4,87               | 3,45                 | 1,41  |
| PP2                      | 2,3  | D5PB-Q-S50h              | 50   | Vh                | 5   | 10,1    | 1,23               | 1,01                 | 1,22  |
| 1) V <sub>u,m,ETAG</sub> | <ol> <li>V<sub>umETAG</sub> = 1/0.7 V<sub>RKETAG</sub></li> <li>2) Stahlbruch nach Spalten; Stahlbruchlast n. ETAG: V<sub>RKs</sub>=9,2kN</li> </ol> |                          |      |                   |     |         |                    |                      |   |

| 3) Mit Hochstlasten, da Spaltlasten nicht erkennbar. |                      |                          |                     |                |     |                         |               |   |   |
|--|----------------------|--------------------------|---------------------|----------------|-----|-------------------------|---------------|---|---|
| Stein  | β <sub>st</sub>      | Versuchs-<br>bezeichnung | C Last-<br>richtung |                | n   | v V <sub>u,m,test</sub> |               | V <sub>u,m,ETAG</sub> <sup>4)</sup><br>c=50mm | V <sub>u,m,bast</sub> V <sub>u,m,ETAG</sub> |
|  | [N/mm <sup>2</sup> ] | j                        | [mm]                |                | [-] | [%]                     | [kN]          | [kN]  | [-]   |
| LI-12  | 15.7                 | B_HIz_Q-S50v             | 50                  | Vv             | 5   | 9,1                     | 4,58          |   | 3,63  |
| 111212   | 13,7                 | B_HIz_Q-S50h             | 50                  | Vh             | 5   | 18,1                    | 2,30          |   | 1,82  |
|  |                      | A1_Ksl1_Q-S50v           | 50                  | Vv             | з   | 18,3                    | 6,29          | 1,26  | 4,98  |
| Kale   | 11.0                 | A1_Ksl1_Q-S50h           | 50                  | V <sub>h</sub> | 3   | 6,2                     | 2,45          |   | 1,94  |
| KSID   | 11,0                 | A1k_Ksl1_Q-S50v          | 50                  | Vv             | 3   | (3,4)22)                | $(4,94)^{2)}$ |   | (3,91) <sup>2)</sup>                        |
|  |                      | A1k_Ksl1_Q-S50h          | 50                  | V <sub>h</sub> | 3   | 0,6                     | 2,66          |   | 2,10  |
| Kel12  | 17.8                 | C50QvKL2A16m8c_1         | 50                  | Vv             | з   | $(11,1)^{3)}$           | $(7,23)^{3)}$ |   | (5,73) <sup>3)</sup>                        |
| N3112 17,0   |                      | C50QhKL2A16m8c_1         | 50                  | V <sub>h</sub> | 3   | 8,6                     | 3,62          |   | 2,87  |

Brutto-Druckfestigkeit n. DIN
 2) Mit Höchstlasten, da kein Spalten aufgetreten.
 3) Mit Höchstlasten, da entweder kein Spalten aufgetreten oder Spaltlasten nicht erkennba

4) Umrechnung  $V_{u,mETAGe=50mm} = \frac{1}{0.7} V_{PR,ETAGe=100mm} \cdot \left(\frac{C_{bass}}{100}\right)^{1.5}$  mit  $V_{PR,ETAGe=100mm} = 2.5kh$ 

Mit Ausnahme der horizontal belasteten Vollmauerziegel sind alle Mittelwerte in den Versuchen größer als die nach [1] berechneten Werte. Die Ursachen für das schlechtere Verhalten der Mauerziegel liegt zum einen im kleinen 2DF-Format und zum anderen an den bereits im Herstellungsvorgang entstandenen Brennrissen in Pressrichtung, so dass es parallel zur Aussenkante zu einem kompletten durchspalten des Einzelsteines kommt.

Bei den KSPE- und Vbl2-Steinen, in denen der Abstand zum freien Rand variiert wurde, zeigt sich, dass die Berechnungsgleichung zu geringe Werte liefert und dieser Unterschied mit kleiner werdendem Randabstand zunimmt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Regelungen der ETAGT 029 für randnahe Befestigungen bei großformatigen Steinen zum Teil deutlich geringere Traglasten ergeben. Bei kleinerformatigen Steinen wird der negative Einfluss des Formates bisher nicht erfasst. Hier kann es zu einem vorzeitigen Spalten des Einzelsteines kommen und die Bruchlasten können unter die berechneten Werte fallen. Die Ergebnisse in den Lochsteinen belegen, dass auch bei Randabständen unter 100 mm Verankerungen möglich sind. Die hierzu aus der Vorgabe in der ETAG umgerechneten Tragfähigkeiten liegen ebenfalls deutlich unter den Versuchsergebnissen, daher kann für Randabstände über 100 mm ebenfalls angenommen werden, dass die Widerstände höher als nach den Angaben in der ETAG sind.

Auch in den Versuchen mit Zweifachbefestigungen dominierte das lokale Materialversagen. In wenigen einzelnen Versuchen mit geringer Einbindetiefe und in Porenbetonsteinen trat es in Kombination mit einem pryoutähnlichen lastabgewandten Ausbruchkegel nach großen Verschiebungen auf. Für den Achsabstand 100 mm konnten keine wesentlichen Unterschiede im Tragverhalten und bei den Höchstlasten für serielle oder parallele Anordnung der Dübel beobachtet werden. In Bild 7 sind die in den Versuchen mit Zweifachbefestigung unter serieller Beanspruchung erzielten Höchstlasten als bezogene Lasten über dem Achsabstand s für Voll- und Lochsteine aufgetragen. Die Lasten wurden auf den Mittelwert der Querlasttragfähigkeit für einen Einzeldübel bezogen. Die Mittelwerte sind jeweils mit einer gestrichelten Ausgleichsgerade verbunden. Es wurden Achsabstände von 50, 100 und in einem Fall 140 mm gewählt.

In Draft ETAG 029 fehlen Angaben zur Behandlung von Zweifachbefestigungen unter Querkraftbelastung. Für Belastung unter zentrischem Zug werden als Mindestachsabstände für Vollsteine  $s_{min} \ge 50 \text{ mm}$  (bzw.  $\ge 3 \text{ d}_0$ ) und für Lochsteine  $s_{min} \ge 100 \text{ mm}$  (bzw.  $\ge 6 \text{ d}_0$ ) angegeben. Für eine Auswertung der Versuche mit Zweifachbefestigung wird im Folgenden deshalb die Annahme getroffen, dass bei Einhalten dieser Mindestachsabstände die doppelte Tragfähigkeit eines Einzeldübels unter Querlast erreicht wird. In den beiden Schaubildern sind die entsprechenden Geraden als rot gestrichelte Linien eingefügt.

Die Mittelwerte der Höchstlasten in Voll- und Lochsteinen weisen ähnliche Abhängigkeiten zum Achsabstand s auf mit Ausnahme der Versuche im T9-Stein. Die Querlasttragfähigkeiten steigen mit zunehmendem Achsabstand. Bei 50 mm Achsabstand liegen die Höchstlasten zwischen dem 1,4- und 1,9fachen (Vollsteine) bzw. 1,4 bis 1,8-fachen (Lochsteine) des Wertes in Steinmitte und bei 100 mm zwischen 1,7 und 2,3 (Vollsteine) bzw. 1,8 und 2,3 (Lochsteine).

Bei den Vollsteinen wird für s = 50 mm nur in den Vbl-Steinen mit dem 1,9-fachen Wert annähernd die doppelte Traglast erreicht, für die Porenbetonsteine liegt der Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der doppelten Einzeltraglast erst bei ca. 140 mm.



Bild 7: Bezogene mittlere Höchstwerte für serielle Querbelastung von Zweifachbefesti gungen in Voll- (oben) und Lochsteinen (unten) über Achsabstand s

Für weitergehende Aussagen sollten zusätzliche Versuche in Porenbeton mit größerem Achsabstand und in anderen Steinarten durchgeführt werden.

Bei den Lochsteinen kann der Achsabstand von 100 mm als in etwa ausreichender kritischer Abstand betrachtet werden.

Im T9-Stein steigen die Lasten langsamer an und erreichen bei 100 mm mit dem 1,4fachen Wert auch bereits die maximale Tragfähigkeit des Einzelsteines bei vertikaler Querbelastung. Es werden Einflüsse aus Randabständen mit maßgebend, so dass für den Achsabstand 140 mm keine Laststeigerung mehr erfolgt. Als kritischer Achsabstand ist demzufolge die Steinhöhe anzusehen. Zuletzt wurde das Tragverhaltens von Einzeldübeln unter einem Lastangriffswinkel von 45° zur Steinoberfläche untersucht und den Regelungen in [1] gegenübergestellt. Die Versuche wurden in der Fläche der Wand bzw. des Steines möglichst ohne Randeinflüsse in der Mitte der Steinoberfläche durchgeführt. Mit dem Dübeltyp A wurden 2 Serien in Kalksandlochstein und eine in Leichtbeton-Planelementen (Vbl) durchgeführt. In [1] werden in Anhang C Angaben zum Tragfähigkeitsnachweis bei Schrägzuglasten gemacht. In Bild 8 sind die in den Versuchen erhaltenen Mittelwerte der Höchstlasten der Versuche unter 45° zur Oberfläche jeweils links als absolute und rechts als auf die mittleren Höchstlasten bezogene Lasten dargestellt. Jeweils in gleicher Farbe und mit einer Linie verbunden sind die zugehörigen Einzelwerte hinzugefügt, um die Streuung zu verdeutlichen. Weiterhin sind die der ETAG 029 entsprechenden Regelungen abgebildet.



 a) absolute Lasten
 b) bezogene Lasten
 Bild 8: Vergleich der mittleren Höchstlast des Dübeltyps A in Leichtbeton- Planelementen (oben) und Kalksandlochsteinen (unten) mit Regelungen der ETAG 029

Für die Versuche in Vbl-Stein sind das Versuchsergebnisse oberhalb des Bereichs der ETAG und liegen damit auf der sicheren Seite. Die entsprechenden Höchstlasten für reinen zentrischen Zug und Querbelastung unterscheiden sich nur wenig.

In den Kalksandlochsteinen hingegen befinden sich die Mittelwerte unterhalb der Vorgaben und zudem streuen die Lasten sehr stark. Die zugehörigen Werte für reinen zentrischen Zug und Querkraft unterscheiden sich um die Faktoren 1,6 für die kurzen und 1,9 für die langen Dübel. Da das Versagen durch Steinausbruch erfolgt, ist die zentrische Zugtragfähigkeit maßgebend und bestimmt die Höhe der Ausbruchlast. Der vorgegebene Bemessungsansatz ist zu unsicher.

Daher wird folgender Ansatz zur Interaktion bei Lochsteinen vorgeschlagen:

**Gleichung 1:**  $\beta_N + \beta_V \leq 1,0$ 

Mit  $\beta_N$  ( $\beta_V$ ) als Verhältnis der Bemessungswerte von Einwirkungen zu Widerstandsgrößen.

In Bild 9 sind die in den Versuchen erhaltenen Mittelwerte der Höchstlasten der Versuche unter 45° zur Oberfläche als auf die 5%-Fraktilen der Höchstlasten bezogene Lasten dargestellt. Die Werte aus den Einzelversuchen sind wie oben hinzugefügt. Der Bemessungsvorschlag ist als blau gestrichelte Gerade eingezeichnet. Die Mittelwerte der Höchstlasten aus den Versuchen liegen damit außerhalb der Interaktionskurve, d. h. auf der sicheren Seite. Bei den einzelnen Werten liegt jeweils nur ein Ausreißer knapp unter der Kurve, was toleriert werden kann



**Bild 9:** Vergleich der mittleren, auf 5 %-Fraktilen bezogenen Höchstlasten des Dübeltypen A in Kalksandlochstein mit alternativem Vorschlag zur Bemessung

Für das bei der Mehrheit der Versuche beobachtete Verhalten des lokalen Versagens des Untergrundes vor dem Dübel wird im Folgenden ein Bemessungsansatz vorgestellt. Darin werden die maßgebenden Einflussgrößen erfasst. Beim Anbauteil wird der Einspanngrad über die Klemmstärke und das Lochspiel erfasst, wobei letzteres als vernachlässigbar angesehen wird, wenn die Vorgaben nach [1], Anhang A, eingehalten werden.

In einem dünnen Anbauteil wird eine gelenkige Lagerung, für ein ausreichend dickes Anbauteil ein biegesteifer Anschluss angenommen. Beim Dübelsystem finden die Geometrie (Durchmesser von Gewindestange und Hülse/ Bohrloch und Einbindetiefe) und Materialeigenschaften (Stahlzugfestigkeit und Mörteldruckfestigkeit) Eingang. Beim Untergrund werden die Lochgeometrie und die lokale Steindruckfestigkeit berücksichtigt.

Bei den Bemessungsfällen wird zunächst nach der Dicke des Anbauteiles unterschieden. Die in Bild 10 für Vollsteine vorgestellten Fälle A und B gelten für dünne Anbauteile mit Klemmstärke  $t_{fix} \leq 0.5d_s$ . und die Fälle C und D für dicke Anbauteile mit  $t_{fix} \ge d_s$ . Für dazwischen liegende Klemmstärken erfolgt eine lineare Interpolation zwischen den Fällen A und C bzw. B und D. Für die entspre-



Bild 10: Bemessungsfälle für lokales Materialversagen in Vollstein

chende Klemmstärke werden beide Fälle berechnet und ggf. interpoliert, der kleinere Wert ergibt den Bauteilwiderstand. Im Versagenszustand wird bei der Spannungsverteilung die Annahme getroffen, dass das Steinmaterial vollständig durchplastiziert und sich rechteckige Spannungsblöcke ergeben. Diese Näherung vereinfacht den rechnerischen Ansatz, wirkt sich jedoch kaum auf das Ergebnis aus. Im Dübel werden, abhängig vom untersuchten Fall, kein, ein oder 2 Fließgelenke angenommen. Zu beachten ist dabei, dass der Dübelguerschnitt im Bohrloch aus Gewindestange, Mörtel und ggf. Siebhülse besteht und sich daher der plastische Verformungswiderstand erhöht. In den vorliegenden Berechnungen wurde das plastische Moment im Bohrloch als gerissener Sechseckquerschnitt unter Mitwirken des Mörtels in der Druckzone und der metallenen Siebhülse in der Zugzone berechnet.

Im Folgenden wird Herleitung der rechnerischen Tragfähigkeit exemplarisch an Fall C (Vollstein) aufgezeigt. Es werden folgende Annahmen getroffen:

- Volle Einspannung der Gewindestange im Anbauteil ( $t_{fix}>d_s$ )
- Ausbildung eines plastischen Gelenkes in der Gewindestange im Bereich der Scherfuge
- Durchplastizieren des Untergrundes

Damit gelten folgende Zusammenhänge: Gleichung 2: В

$$= Z = d_{nom} \cdot f_1 \cdot \frac{n_{ef} - a}{2}$$

Gleichung 3:

$$M_{Pl,S} = d_{nom} \cdot f_1 \cdot \left[\frac{a^2}{2} - \left(\frac{h_{ef} - a}{2}\right)^2\right]$$

 $V_{C} = D = d_{nom} \cdot f_1 \cdot a$ Gleichung 4:  $f_1 = lokale Steindruckfestigkeit (f_1 > f_b)$  $M_{PI,S} = d_{s,2}^{3} \cdot f_{v,k}/6$ Plastisches Widerstandsmoment der Gewindestange

Durch Einsetzen und Umformen erhält man schließlich für den Fall C: Gleichung 5:

$$V_{C} = d_{nom} \cdot f_{1} \cdot h_{ef} \left( \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{Pl,S}}{d_{nom} \cdot f_{1} \cdot h_{ef}^{2}}} - 1 \right).$$

Durch entsprechende Ansätze erhält man für den Fall A

**Gleichung 6:** 

$$V_A = d_{nom} \cdot f_1 \cdot h_{ef}(\sqrt{2} - 1),$$

für den Fall B Gleichung 7:

 $V_{B} = \sqrt{2 \cdot M_{PLH} \cdot d_{nom} \cdot f_{1}}$ 

M<sub>Pl,H</sub> = Plastisches Widerstandsmoment des Dübelsystems

und für den Fall D Gleichung 8:

$$V_D = \sqrt{2(M_{PI,S} + M_{PI,H}) \cdot d_{nom} \cdot f_1} .$$

In Tabelle 2 sind in Leichtbetonvollstein durchgeführte Versuche den mit Gleichung 6 und Gleichung 8 berechneten Fällen C und D gegenübergestellt. Es wurden die tatsächlichen Streckgrenzen der benutzten Gewindestangen eingesetzt. Die lokale Druckfestigkeit des Untergrundes wurde mit dem 3,5- fachen Wert angenommen, was einem in der Literatur üblichen Wert für Beton entspricht. Der kleinste Wert der Bemessungsfälle wird maßgebend und ist orange hinterlegt dargestellt. Weiterhin abgebildet ist die Berechnung nach Fuchs [4], die für ungerissenen Beton entwickelt wurde.

Die berechneten, maßgebenden Werte weisen im Mittel eine brauchbare Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen auf. Auffallend ist die starke Abweichung bei der Größe M8 mit 95 mm Einbindetiefe. Hier spielt der Effekt der Ausbildung eines Zugbandes einer Rolle. Die Unterschiede bei der Größe M10 in der Berechnung rühren von den eingesetzten tatsächlichen Stahlfestigkeiten her. Der Ansatz nach [1] ergibt in allen Versuchen deutlich zu geringe Lasten und ist daher wenig geeignet.

| Di    | ibeltyp          |                 | Berechnung Vergleich mit Verg |                 |                   | t Vers | uch |      |
|-------|------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------|--------|-----|------|
| Nenn- | d <sub>nom</sub> | h <sub>ef</sub> | nach                          | F <sup>2)</sup> | F/ F <sub>V</sub> | Fv     | n   | v    |
| grobe | [mm]             | [mm]            | Fall                          | [kN]            | [kN]              | [kN]   | [-] | [%]  |
|       |                  |                 | С                             | 4,44            | 0,95              |        |     |      |
| M8    | 16               | 50              | D                             | 5,30            | 1,14              | 4,67   | 5   | 7,6  |
|       |                  |                 | Fuchs 1)                      | 1,51            | 0,32              |        |     |      |
|       |                  |                 | С                             | 6,01            | 1,04              |        | 5   |      |
| M8    | 16               | 75              | D                             | 5,30            | 0,91              | 5,80   |     | 5,0  |
|       |                  |                 | Fuchs 1)                      | 2,42            | 0,42              |        |     |      |
|       |                  |                 | С                             | 7,36            | 1,01              |        | 3   | 14,7 |
| M8    | 16               | 95              | D                             | 5,30            | 0,73              | 7,27   |     |      |
|       |                  |                 | Fuchs 1)                      | 2,42            | 0,33              |        |     |      |
|       |                  | 16 80           | С                             | 7,12            | 1,12              | 6,34   | 5   |      |
| M10   | 16               |                 | D                             | 7,92            | 1,25              |        |     | 12,9 |
|       |                  |                 | Fuchs 1)                      | 3,71            | 0,59              |        |     |      |
|       |                  |                 | С                             | 6,48            | 1,00              |        |     |      |
| M10   | 16               | 16 75           | D                             | 6,78            | 1,04              | 6,50   | 6   | 10,9 |
|       |                  |                 | Fuchs 1)                      | 3,16            | 0,49              |        |     |      |
|       |                  |                 | С                             | 8,60            | 1,11              |        |     |      |
| M12   | 16               | 75              | D                             | 10,10           | 1,30              | 7,75   | 6   | 5,5  |
|       |                  |                 | Fuchs 1)                      | 4,80            | 0,62              |        |     |      |
|       |                  |                 | С                             | 10,07           | 0,97              |        |     |      |
| M12   | 16               | 95              | D                             | 10,10           | 0,97              | 10,41  | 5   | 11,9 |
|       | _                |                 | Fuchs 1)                      | 4,80            | 0,46              |        |     |      |

 Tabelle 2:
 Vergleich Bemessungsvorschlag –

 Versuche in Leichtbetonvollstein

1) n. Diss. Fuchs f. Beton

2) Die Berechnung wurde mit ermittlelten Streckgrenzen fy,m und unter der Annahme von  $f_1{=}3.5{\cdot}f_b$  durchgeführt.

Das Vorgehen bei Lochsteinen ist zunächst analog dem in Vollsteinen, indem nach der Dicke des Anbauteils bzw. dem Einspanngrad im Bauteil unterschieden wird. In nachfolgenden Bildern sind daher zur Vereinfachung nur die Fälle für dicke Anbauteile abgebildet. Allerdings ist bei den Bemessungsansätzen die Lochkonfiguration zu beachten. Verankert ein Dübel nur im Außensteg, so gelten im Prinzip die Annahmen der Fälle C und D für Vollstein mit dem Unterschied, dass in den oben angegebenen Gleichungen statt der Einbindetiefe des Dübels nur die Außenstegdicke angesetzt werden darf.

Weiterhin kann ein Dübel im Außen- und einem Innensteg sitzen (Bild 11). Für diese Verankerung sind die drei möglichen Verteilungen der Reaktionskräfte für die Fälle C und D angegeben. Aus der Herleitung der Fälle C3 und D3 ergibt sich, dass diese nur für  $h_{1\geq}h_2$  möglich sind.





 $\label{eq:Fall C3} \mbox{ (nur für } h_{1 \ge} h_2 \quad \mbox{ Fall D3 (nur für } h_{1 \ge} h_2 \mbox{ )}$ 

Bild 11:Bemessungsfälle für lokales Materialversagen in Lochstein bei Verankerung in Außen- und 1. Innensteg (dickes Anbauteil)

Aus den Gleichgewichtsbedingungen erhält man schließlich für die Fälle C1 und C2:

#### **Gleichung 9:**

$$V_{C1} = V_{C2} = d_{nom} \cdot f_1 \cdot \left( \sqrt{2(h_1 + h_2)^2 + 4 \left[ (2h_1 + h_2 + h_L) \cdot h_L + \frac{M_{Pl,S}}{d_{nom} \cdot f_1} \right]} \right)$$

für den Fall C3: Gleichung 10:

$$V_{C3} = d_{nom} \cdot f_1 \cdot \left( \sqrt{2(h_1 + h_2)^2 + 4\left(h_2 \cdot h_L + \frac{M_{Pl,S}}{d_{nom} \cdot f_1}\right)} \right),$$

und für den Fall D1:

Gleichung 11:

$$V_{D1} = d_{nom} \cdot f_1 \cdot \left( \sqrt{2h_1 \cdot h_L + {h_L}^2 + 2\frac{M_{Pl,S} + M_{Pl,H}}{d_{nom} \cdot f_1}} - h_L \right),$$

Die Gleichungen für die Fälle D2 und D3 entsprechen dem Ansatz D für Vollsteine (siehe Gleichung 8).

Für Verankerungen in mehr als zwei Stegen müssen entsprechende Ansätze hergeleitet werden, die jedoch stark von der Lochgeometrie abhängen. Bei den üblichen Steingeometrien und Dübelabmessungen sind vor allem die Außenstegdicke und die Außenkammertiefe ausschlaggebend, so dass sich Verankerungen in mehreren Innenstegen ggf. auf die hier beschriebenen Bemessungsfälle zurückführen lassen.

Für weitere Vergleiche der Berechnungsformeln in Lochsteinen mit Versuchsergebnissen werden zurzeit die Materialparameter lokale Druckfestigkeit und plastisches Biegemoment des Dübelsystems genauer untersucht.

#### Literatur

- [1] ETAG 029: Metal Injection Anchors for Use in Masonry; B 1040 Brussels: European Organisation for Technical Approvals, Draft Edition 09/06
- [2] EN 771-1 bis 6:2003 + A1:2005: Festlegungen für Mauersteine
- [3] Eligehausen, R.; Mallée, R.: Befestigungstechnik im Beton und Mauerwerkbau; Berlin: Ernst & Sohn; 2000
- [4] Fuchs, W.: Tragverhalten von Befestigungen unter Querlast in ungerissenem Beton. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1990
- [5] Meyer, A.: Zum Tragverhalten von Injektionsdübeln in Mauerwerk. Dissertation; Universität Stuttgart, 2006
- [6] Ožbolt, J.: MASA Finite Element Program for Nonlinear Analysis of Concrete and Rein forced Concrete Structures. Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1998

## KORROSIONSUNTERSUCHUNGEN AN HOCHFESTEN NICHTROSTENDEN STÄHLEN ZUR ANWENDUNG ALS SPANNSTAHL IM SPANNBETONBAU CORROSION INVESTIGATIONS ON HIGH-STRENGTH STAINLESS STEELS FOR APPLICATION AS PRESTRESSING STEEL IN PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES

von/by Yuan Wu

### Einleitung

Die aus Schadensanalysen und Forschung gewonnenen Erkenntnisse haben über Jahre hinweg die korrosionstechnische Durchbildung von Spannbetonbauwerken stetig verbessert. Trotzdem kommt es immer wieder erneut zu korrosionsbedingten Problemen bei dieser Bauweise. Diese Tatsache hängt weniger damit zusammen, dass diese Bauweise grundsätzlich anfällig ist gegenüber korrosiven Einwirkungen. Jedoch wird in Fachkreisen diskutiert, dass sich aus Unkenntnis bestimmter baustoffbezogener Zusammenhänge, immer wieder vorkommender mangelhafter Verarbeitung, Eintreten unvorhergesehener aggressiver Umgebungsbedingungen und gelegentlich auf den Markt gelangende, gegenüber Korrosionseinwirkungen empfindliche Spannstähle, sich Schäden mit der erforderlichen Sicherheit nicht immer vermeiden lassen.

Es lag daher der Gedanke nahe, durch die Anwendung von hochfesten nichtrostenden Stählen als Spannstahl den Spannbetonbau vor Korrosionsschäden zu schützen. Drähte aus kaltgezogenen hochfesten nichtrostenden Stählen können seit über 25 Jahren mit vergleichbaren Festigkeitsund Verformungseigenschaften produziert werden wie niedriglegierter Spannstahl und es lassen sich die für den Spannbetonbau erforderlichen Litzen herstellen. Litzen aus hochfesten nichtrostenden Stahldrähten werden in der Bautechnik bereits bei Brückenseilen, Abund Unterspannungen sowie Flächentragwerken verwendet. Grundlegende Arbeiten zum Korrosionsverhalten der Litzen aus hochfesten nichtrostenden Stählen unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen sind

### Introduction

The prestressed concrete structures have been in use world-wide and developed since many years. Through analyses and researches of collapse cases of this building type, the know-how in view of corrosion mechanism was accumulated extensively. Thus the corrosion protection design of prestressed concrete structures was well advanced in the past. However there are still insufficiently clarified corrosion problems in this field. Such problems are not because of the fact, that the prestressed concrete structures are principally susceptible to corrosive attacks. Expert discussions show that the reasons can be traced back to unawareness of corrosion behavior of the material, unsatisfied processing, unanticipated aggressive corrosion conditions as well the occasional application of prestressing steels which are sensitive to aggressive corrosion attacks.

Referring to the above-mentioned experiences, considerations are made to use highstrength stainless steels as prestressing tendons in pre-stressed concrete structures. Cold-drawn stainless steel strands with comparable strength and deformation characteristics like conventional prestressing steels are produced since about 25 years. This kind of tensile tendon is applied extensively as ropes and cables for bridges, towers as well as the wide-spanned constructions. Corrosion investigations on high-strength stainless steel strands under atmospheric corrosion conditions were already carried out. In chloride and sulphur-dioxide containing atmospheres most of high-strength stainless steel strands are resistant to pitting and crevice corrosion, as well as the stress-corrosion cracking.

schon in den Literaturen dargestellt. Entsprechend hoch legierte Litzen aus austenitischen Stahldrähten sind unter Chloridbeanspruchung und im (SO<sub>2</sub>-haltigen) Industrieklima beständig gegenüber abtragender Korrosion (Loch- und Spaltkorrosion) und Spannungsrisskorrosion.

Die unter Bedingungen der freien Atmosphäre gewonnenen Erkenntnisse sind nicht ohne weiteres auf den Anwendungsfall Spannbeton (sofortiger Verbund oder nachträglicher Verbund) übertragbar, obwohl sich aus dem Verhalten in der Atmosphäre grundsätzlich ein positives Verhalten im Spannbetonbau ableiten lässt. Im Spannbetonbau werden die Spannglieder bis zu 80% der Zugfestigkeit R<sub>m</sub> ausgenutzt (die max. Beanspruchung von Seilen liegt bei 0,4 R<sub>m</sub>). Im Betonbau können grundsätzlich wesentlich höhere Chloridgehalte eine Rolle spielen, da sich diese hier aufkonzentrieren können. Gefügeinstabile nichtrostende Stähle können nach der Kaltumformung Verformungsmartensit aufweisen. Es ist aber noch nicht geklärt, ob sich dieser Martensitanteil nachteilig auf die Korrosionsanfälligkeit des Stahls auswirkt.

Ziele dieses Forschungsvorhabens sind:

- Feststellung des Korrosionsverhaltens hochfester nichtrostender Stähle unter Korrosionsbedingungen, die bekannterweise im Spannbetonbau zu Schäden führen können. Die vorkommenden Umgebungsbedingungen sind alkalischer und carbonatisierter Zementmörtel bzw. Beton mit stark erhöhten Chloridgehalten.
- Abschätzung der Einsatzgrenzen von hochfesten nichtrostenden Stählen im Spannbetonbau mit sofortigem und nachträglichem Verbund.
- Vergleichende Betrachtungen zum Korrosionsverhalten von nichtrostenden (niedrigfesten) Betonstählen und hochfesten Spannstählen.

But results gained under atmospheric corrosion conditions can not be applied directly to prestressed concrete structures. Tensile tendons in prestressed concrete structures are stressed up to 80% of the tensile strength, while the maximum strength of bridge cables does not exceed  $0.4R_m$ . In prestressed concrete structures the influence of carbonation and high chloride concentration is not yet well known. Till now it is not clear, whether martensite content as a result of cold deformation and structural alteration can favour the susceptibility of high alloyed steels to corrosion.

The aim of this research project is to acquire more information about the corrosion behaviour of high-strength stainless steel, which is direct bonded with concrete:

- To study the corrosion behavior of highstrength stainless steel tendons in critical corrosion conditions. The critical corrosion conditions for pre-stressing steels are alkaline and carbonated cement and/or concrete with high chloride concentrations.
- To estimate the possibility of application of high-strength stainless steel tendons in prestressed concrete structures.
- To compare the corrosion behavior of cold-drawn stainless steels (high-strength) and ordinary stainless steels (low-strength).

## Corrosion investigations and intermediate results

In the research program the following materials, which have been used as bridge cables, are tested.

- 1.4301 (X5CrNi 18-10)
- 1.4401 (X5CrNiMo 17-12-2)
- 1.4436 (X3CrNiMo 17-13-3)
- 1.4439 (X2CrNiMoN 17-13-5)
- All of them are austenitic steels.

Through the field and laboratory tests in critical corrosion conditions for prestressing steels, the effects of all the important corrosion types of high-strength stainless prestressing steels are investigated:

## Korrosionsuntersuchungen und bisherige Ergebnisse

Zur Erreichung des angestrebten Forschungsziels werden die hochfesten Litzen aus nichtrosenden Stählen in Natur- und Laborversuchen unter den für Spannstählen kritischen Korrosionsbedingungen untersucht.

Folgende bereits für Brückenseile verwendete austenitischen Stahlsorten wurden untersucht:

- 1.4301 (X5CrNi 18-10)
- 1.4401 (X5CrNiMo 17-12-2)
- 1.4436 (X3CrNiMo 17-13-3)
- 1.4439 (X2CrNiMoN 17-13-5)

Litzen aus den oben genannten Werkstoffen werden hinsichtlich folgender Korrosionsarten untersucht:

- Lochkorrosion in chloridhaltigen, betontypischen Medien in alkalischem und carbonatisiertem Zustand.
- Chloridinduzierte SpRK in Abhängigkeit von Temperatur und pH-Wert.
- Wasserstoffinduzierte SpRK im Hinblick auf die Anfälligkeit gegenüber eventuell vorhandenem Umformungsmartensit.

Im Folgenden werden die durchgeführten Korrosionsuntersuchungen sowie die bisherigen Ergebnisse (vom Juli 2005 bis Juni 2007) zusammengefasst.

• Auslagerungsversuche an vorgespannten Betonbalken:

Insgesamt wurden 8 vorgespannte bewehrte Betonbalken mit sofortigem Verbund für die Versuche hergestellt (Bild 1). Die Betonbalken wurden für 2,5 Jahre lang ausgelagert. Während der Auslagerung werden die Betonbalken mit 1,5 M.-%iger Tausalzlösung analog den Verhältnissen von Bauteilen im Spritzwasserbereich befahrener und mit Tausalz behandelter Straßen beaufschlagt. Zur Ermittlung des Korrosionsverhaltens werden Potentialmessungen entlang der Betonbalken in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Bis heute wurde noch keine Korrosion gemessen.

- Pitting and crevice corrosion in chlorideenriched cement and/or concrete in alkaline and carbonated states.
- Anodic stress corrosion cracking in dependence of temperature and pH-value of media.
- Hydrogen assisted stress corrosion cracking (HAC) in regard to the sensibility of martensite content due to the high degree of cold-drawing.

In the following all of the performed corrosion tests as well as the intermediate results (from July 2005 to June 2007) are shortly introduced.

• Field tests on prestressed concrete beams:

8 prestressed concrete beams (construction details of the beams pleas see Fig. 1) were prepared for field tests. They are investigated outdoors under the exposure of de-icing salt solution (NaCl<sub>2</sub>+CaCl<sub>2</sub>, chloride concentration =1.5 M.-%) for a period of 2.5 years. In defined period potential measurement at different positions of the concrete beam are carried out. Till now still no corrosion damage was found neither in carbonated nor in alka-line concrete.





• Current-potential measurement to determine the Pitting Corrosion Potentials:

The Pitting Corrosion Potentials of tested steels are determined by current-potential measurement with mortar electrodes. The test parameters please see Tab. 1. The test results of pitting corrosion potentials (refer to Ag/AgCl) of cold-drawn high-strength

Die Lochkorrosionspotentiale werden durch potentiostatische Haltversuche an Mörtelelektroden mit Einzeldraht ermittelt. Die Versuchsparameter werden in Tab.1 zusammengestellt. Die ermittelte Lochkorrosionspotentiale (zu Ag/AgCl) der hochfesten nichtrostenden Stähle liegen deutlich oberhalb der im hochchloridhaltigen Beton zu erwartenden Korrosionspotentiale (mehr als +300 mV). Durch Vergleich der Lochkorrosionspotentiale mit jenen von nichtrostenden Betonstählen (niedrigfesten) zeigt sich bisher, dass die höhere Kaltumformung das Lochkorrosionsverhalten der hochfesten nichtrostenden Stähle im alkalischen Beton nicht ungünstig beeinflusst.

 Isotherme Auslagerversuche an Bügelproben zur Ermittlung der Grenztemperaturen:

Grenztemperatur heißt jene kritische Temperatur, unterhalb derer keine Spannungskorrosion auftritt. In Tab.2 werden alle Varianten der Versuchsparameter zusammengestellt. Die 3 ausgewählten pH-Werte der Lösungen sind 4,5 – 8,5 –12,1. Sie orientieren sich an alkalischem Beton – carbonatisiertem Beton – leicht saurer Umgebung.



Bild 2: Standzeiten der Bügelproben aus

- Stahl 1.4401 sowie die Auftrittzeiten der 1. Korrosionsnarbe (Mittelwert) in chloridgesättigter und leicht saurer Lösung (pH=4,5)
- Fig. 2: Lifetimes and the times of occurrence of the 1<sup>st</sup> corrosion pit of steel 1.4401 in chloride saturated and acidulous solution (pH=4.5)

stainless steels lie so far in a high positive potential range (more than +300 mV), which means a high resistance to pitting corrosion. Comparing to those of low-strength reinforcing steels with the same compositions, there is no big difference between the two kinds of steels, which means that the high degree of cold-drawing has no unfavourable effects on corrosion behaviour of high-strength stainless steel.

- Tab.1 Versuchsparameter für potentiostati schen Haltversuche
- Tab.1 Test parameters of current-potential measurement

|                          | 1.4401  |  |  |  |  |  |
|--------------------------|---|--|--|--|--|--|
| Quality of<br>steels     | 1.4436  |  |  |  |  |  |
|                          | 1.4439  |  |  |  |  |  |
| CI <sup>-</sup> relative | 3%  |  |  |  |  |  |
| to cement                | 5%  |  |  |  |  |  |
| State of                 | Alkaline  |  |  |  |  |  |
| concrete                 | Carbonated with 3% CO <sub>2</sub>                          |  |  |  |  |  |
| Setting of<br>Potentials | Beginning with the inactive potential, increment = 50mV/24h |  |  |  |  |  |

• Isotherm exposure tests on bended specimens to determine the threshold temperature curve:

- Tab. 2 Untersuchungsparameter für isothermen Auslagerversuche
- Tab. 2 Test Parameters of isotherm exposure tests

| Quality of steels  | 1.4401  |  |  |  |  |  |  |
|--|---|--|--|--|--|--|--|
|  | 1.4436  |  |  |  |  |  |  |
|  | 1.4439  |  |  |  |  |  |  |
|  | Solution 1: calcium hydroxide solution<br>+ saturated chloride solution, pH=12.1                        |  |  |  |  |  |  |
| Saturated<br>chloride<br>solutions,<br>Cl <sup>−</sup> =200g/l | Solution 2: calcium carbon-<br>ate/bicarbonate buffer solution +<br>saturated chloride solution, pH=8.5 |  |  |  |  |  |  |
|  | Solution 3: acetic acid and natrium acetate buffer solution + saturated chloride solution, pH=4.5       |  |  |  |  |  |  |
| Temp.  | 30°C − 40°C − 50°C − 60°C − 80°C  |  |  |  |  |  |  |

The threshold temperature is the critical temperature, below that no stress corrosion Nach der ca. 1,5 Jahr langen Laufzeit wurden viele Proben gebrochen. Am Stahl 1.4439 sind alle Brüche unter höchster Temperatur (80°C). Am Stahl 1.4436 und Stahl 1.4401 ist es schon möglich, die Grenztemperaturkurven zu zeichnen. Die Standzeit der Bügelproben steigt mit abnehmender Temperatur und zunehmendem pH-Wert des Mediums (Bild 2). Als Untersuchungsergebnisse wurden die Auftrittzeiten der 1. Korrosionsnarbe (optische Beurteilung) auch notiert. Es existiert ein proportionales Verhältnis zwischen der Bruchzeit und der Auftrittzeit der 1. Korrosionsnarbe (Bild 2).

 Standzeitversuche (FIP-Test) zur Bewertung der Empfindlichkeit gegenüber wasserstoffinduzierter SpRK:

In diesem Versuch wurde der Einzeldraht bis 80% der Zugfestigkeit vorgespannt und in Ammoniumthiocyanat-Lösung 20%iger (NH<sub>4</sub>SCN) bei 50 °C untersucht. Derzeit laufen Versuche an den Stahlsorten 1.4401 und 1.4301, deren Gefüge nicht ausreichend stabil sind und nach der Kaltumformung Umformungsmartensit aufweisen. Die Standzeit kann hier als Maßstab für die Empfindlichkeit gegenüber wasserstoffinduzierter SpRK angesehen werden. Aus vorhandener Literatur ist bekannt, dass herkömmlicher Spannstahl (niedrialegiert) stets in einer solchen Lösung bricht. Bei einer normalen Qualität liegen die erreichten Standzeiten kaltgezogener Drähte etwa bei 5 bis 20 h. Bisher liegen die erzielten Standzeiten beim Werkstoff 1.4301 über 100 h und 1.4401 stets über 2000h.

Aufgrund der sehr positiven Untersuchungsergebnisse vom Stahl 1.4401 wurden die Untersuchungsbedingungen in weiteren Untersuchungen noch verschärft. Die Proben wurden entweder mit aufstehenden Tropfen von MgCl<sub>2</sub>-Lösung vorbehandelt, um die Korrosionsnarben an der Oberfläche vor dem Standzeitversuch zu bilden, oder kathodisch polarisiert (-1000mV), um kritische Potentiale für eine Wasserstoffentwicklung einzustellen. Mit Korrosionsnarbe an der Oberfläche wurde die Standzeit des Stahls 1.4401 deutlich vercracking can occur. The test parameters of isotherm exposure tests on bended specimens please see Tab. 2. The pH-values of 4.5 - 8.5 -12.1 are correspond to alkaline concrete - carbonated concrete – light acidic environment.

After about 1.5 years many bended specimens have already broken up. On steel 1.4439 all of the broken-up were in the highest temperature (80 °C). On steel 1.4436 and steel 1.4401 the threshold temperature curves can be determined. The lifetime of bended specimens rises with falling temperature and increasing pH-value (Fig. 2). For further evaluation the times of occurrence of the 1<sup>st</sup> corrosion pit on steels were registered too. A proportional relation between the both kinds of time-values can be found (Bild 2).

• Corrosion exposure tests (FIP-test) to evaluate the resistance to Hydrogen assisted stress corrosion cracking (HAC):

By standard FIP-test, steel wire is centrally prestressed nearly to 80% of the tensile strength and tested in 20% -NH<sub>4</sub>SCN-solution (H-promoter) in a temperature of 50℃. At present steels 1.4301 and 1.4401 have been tested. The both steels contain deformation martensite after cold-drawn due to the unstable microstructures. The stability of steels against HAC is characterised by the lifetime of specimens in the FIP-test. Tests on conventional prestressing steels show that the lifetimes of cold-drawn carbon steels are only a few hours (5 - 20h). The lifetimes of martensite-containing cold-drawn stainless steel 1.4301 are over 100 h and 1.4401 over 2000h in the FIP-tests.

Because of the very long lifetimes of steel 1.4401 the corrosion conditions were in the further tests disadvantaged. The specimens were partially treated with little drops of MgCl<sub>2</sub>-solution and cathodically polarized (-1000mV). With tiny corrosion pits on the surface, the lifetime of steel 1.4401 is much shorter than before (Lifetime > 200 h). After tests the specimens were analyzed in scanning microscope. It was certified that corrokürzt (nur > 200h). Zur Charakterisierung des Korrosionsmechanismus wurden die bereits gebrochenen Proben metallographisch untersucht. Es wurde festgestellt, dass sich die Korrosionsangriffspunkte meistens an den Oberflächenschwachstellen (z.B. hestellungsbedingte Riefen) befinden (Bild 3). Dies bestätigt, dass das Korrosionsverhalten auch durch die Oberflächengüte beeinflusst wird.



sion attacks are mostly at the position, where has relative bad surface quality (e.g. stria due to production process) (See Fig. 3). This confirms that bad surface quality can disadvantage the corrosion behavior of stainless steels.



- Bild 3 REM-Aufnahme des Drahtes 1.4401 mit vorhandener Korrosionsnarbe, Standzeit beim FIP-Test = 218 h
- Fig. 3 Scanning microscope photos of broken wire, steel 1.4401 with previous damage by tiny corrosion pits, lifetime in FIP-test = 218 h

## Folgerungen

Die wichtigen Einflüsse auf die Korrosionsbeständigkeit des kaltgezogenen hochfesten nichtrostenden Stahls sind die chemische Zusammensetzung der Legierungselemente, die Gefügebildung und die magnetischen Eigenschaften (Umformungsmartensitanteil) sowie die Oberflächengüte. Im Folgenden werden die Korrosionsbeständigkeiten der untersuchten Stähle anhand der bisher erzielten Versuchsergebnisse berichtet.

#### • Loch- und Spaltkorrosion

Die Untersuchungsergebnisse von den Naturversuchen an vorgespannten Betonbalken sowie den elektrochemischen Lochkorrosionspotentialenmessungen zeigen dass im hochchloridhaltigen, betontypischen Medien (im alkalischen und im carbonatisierten Zustand) die kaltgezogenen nichtrostenden Stähle eine hohe Lochkorrosionsbeständigkeiten haben.

## Conclusions

The important influences on corrosion resistance of cold-drawn high-strength stainless steel are chemical composition of alloys, microstructure of steel and magnetic characters (content of deformation martensite) as well the surface quality. Based on the test results the corrosion resistances of investigated high-strength stainless steels are explained.

- Pitting corrosion and crevice corrosion Results from field tests on prestressed concrete beams and electrochemical measurements of Pitting Corrosion Potentials show that cold-drawn stainless steels have a very high resistance to pitting corrosion in chloride-enriched cement and/or concrete in alkaline state and also the state of carbonation.
- Chloride induced stress corrosion cracking Visual evaluation of the broken specimens shows, that together with stress corrosion crack there is always also an attack of pitting
### • Chloridinduzierte SpRK

Die visuelle Beurteilung der bereits durch Spannungsrisskorrosion ausgefallenen Drähte zeigt, dass zusammen mit Korrosionsrissen stets auch der pH-Wert durch Hydrolyse der Korrosionsprodukte in den Löchern abgesenkt wird sowie die Konzentration an Chlorid-Ionen durch Überführung erhöht wird.

• Wasserstoffinduzierte SpRK

Die bisher erzielten Standzeiten würden beim Stahl 1.4301 auf eine mäßige und beim Stahl 1.4401 eine hohe Beständigkeit gegen Wasserstoff hinweisen. corrosion. This phenomenon confirms that in the corrosion pit pH-value is lowered by hydrolysis of the corrosion and chloride ions are increased by transfer of the solution.

• Hydrogen assisted stress corrosion cracking

So far the obtained results show that steel 1.4301 has a medium and steel 1.4401 has a high stability against hydrogen induced stress-corrosion cracking.

# Literaturverzeichnis

- [1] Nürnberger, U.; Neubert, B.: Entwicklung und Bewertung des Regelwerkes im Spannbetonbau aus korrosionstechnischer Sicht. Fortschritte im Konstruktiven Ingenieurbau, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1984, Seiten 111 bis 124.
- [2] Durability of post tensioning tendons. Technical report of a workshop held at Ghent University on 15 16 November 2001. fib bulletin 15, Lausanne 2001.
- [3] Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E. V.: Vorträge Betontag 1999. Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2000.
- [4] Schmidt, W.; Dietrich, H.: Mechanische Eigenschaften kaltgezogener Drähte verschiedener rostfreier Drähte bei unterschiedlicher Beanspruchung. Draht 33 (1982), Seiten 111 bis 115, 166 bis 169.
- [5] Nürnberger, U.; Wiume, D; Beul, W.: Korrosionsverhalten von Litzen aus hochfesten austenitischen Stählen. Bauingenieur 65 (1990), Seiten 171 bis 181.
- [6] GfKORR Gesellschaft f
  ür Korrosionsschutz e. V.: Nichtrostende St
  ähle in der Bautechnik Korrosionsbest
  ändigkeit als Kriterium f
  ür innovative Anwendungen. Jahrestagung 2000, 7. und 8. November 2000, Bundesanstalt f
  ür Materialforschung und –pr
  üfung (BAM) Berlin.
- [7] European Federation of Corrosion (EFC): Stainless steel in concrete. Publication number 18, 1996.
- [8] Funke, P.; Bungardt, K.; Küppers, W.: Beitrag zum Einfluss der Austenitstabilität auf das Verhalten nichtrostender Chrom-Nickel-Stähle bei der Kaltumformung. DEW-Techn. Ber. 9 (1969), Seiten 170 bis 197.
- [9] Herbsleb, G.; Pfeiffer, B.: Kritische Werte von Einflussgrößen für die Spannungsrisskorrosion von austenitischem 18Cr-10Ni-Stahl in Chloridlösungen. Werkstoffe und Korrosion 35 (1984), Seiten 254 bis 266.
- [10] Nürnberger, U.: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Bauverlag, Wiesbaden 1995.

# VORTRAGSVERANSTALTUNGEN, SYMPOSIEN, WORKSHOPS, KONFERENZEN

#### 2005



| Titel:             | "Industriell vorgefertigte Verbindungsmittel im Betonfertigteilbau"   |
|--------------------|---|
|                    | Teil 1: Transportanker, Aussteifung, Decken und Fassaden<br>Teil 2: Baurecht, Bauphysik, Durchstanzen               |
| Zeitpunkt:         | 25. November 2005 <u>und</u> 20. Januar 2006  |
| Veranstalter:      | Arbeitskreis "Verankerungen in Beton" in der Studiengemeinschaft für Fertigteilbau e.V.; IWB, Universität Stuttgart |
| Veranstaltungsort: | IWB, Universität Stuttgart  |
| Tagungsband:       | Kurzfassungen der Beiträge unter http://www.sg-fertigbau.de   |
|                    |   |

#### 2006



Titel: "46. Forschungskolloquium des DAfStb"

Zeitpunkt: 30. und 31. März 2006

Veranstalter: DAfStb; Universität Stuttgart

Veranstaltungsort: Universität Stuttgart

Tagungsband: ISBN 3-9808542-4-8

Berichte aus der aktuellen Forschung der ausrichtenden Institute werden vorgestellt. In diesem Zusammenhang geben die jeweiligen Lehrstuhlinhaber auch einen kurzen Überblick über die aktuellen Forschungsaktivitäten der Institute.

Ausrichtende Institute und Personen des 46. Forschungskolloquiums des DAfStb in Stuttgart:

- Institut für Konstruktion und Entwurf (Prof. Dr.-Ing. U. Kuhlmann)
- Institut f
  ür Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren (Prof. Dr.-Ing. W. Sobek; Prof. Dr.-Ing. B. Novák; Prof. Dr.-Ing. K.-H. Reineck)
- Institut f
  ür Werkstoffe im Bauwesen (Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt; Prof. Dr.-Ing. R. Eligehausen)
- Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (Otto-Graf-Institut) (Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt; Prof. Dr.-Ing. U. Nürnberger)



| Titel:             | "Zum Gedenken an Otto Graf, universeller Bauforscher in Stuttgart"<br>Abschiedsvorlesung von Prof. DrIng. HW. Reinhardt |
|--------------------|---|
| Zeitpunkt:         | 04. Juli 2006   |
| Veranstalter:      | Universität Stuttgart   |
| Veranstaltungsort: | Universität Stuttgart   |
| Tagungsband:       | Schriftenreihen der Universität Stuttgart "Reden und Aufsätze" Nr. 71   |

Beinhaltet die Abschiedsvorlesung des langjährigen Leiters des Institut für Werkstoffe im Bauwesen und Direktor der MPA Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Hans-Wolf Reinhardt. Thema der Vorlesung vom 4. Juli 2006 war "**Otto Graf, Rückschau im Licht von heute**".

Ebenso enthält der Band die Rede des neuen Geschäftsführenden Institutsdirektors und des neuen Direktors der MPA, Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen, zur Verabschiedung von Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt, sowie die kurzen Ansprachen des stv. Sprechers des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Prof. Dr.-Ing. Gerd Thielen, des stv. Geschäftsführenden Institutsdirektors, Prof. Dr.-Ing. Rolf Eligehausen, und des Rektors der Universität Stuttgarts, Prof. Dr.-Ing. Dieter Fritsch.



| Titel:             | Abschluss-Workshop "Advanced testing of fresh cementitious materials" |
|--------------------|---|
| Zeitpunkt:         | 03. und 04. August 2006   |
| Veranstalter:      | Universität Stuttgart, DGfZfP, RILEM, DFG                             |
| Veranstaltungsort: | IWB, Universität Stuttgart  |
| Tagungsband:       | ISBN 3-9808542-6-4  |
|                    |   |

Die Forschung interessiert sich in den letzten Jahren in immer stärkerem Umfang für die verschiedenen Zustände des Betons während der Erhärtung (vom Frischbeton bis zum Festbeton). In der Anfangszeit wurden die zementgebunden Baustoffen im frischen und erhärteten Zustand noch mit herkömmlichen Messmethoden untersucht. Die Ergebnisse der eingesetzten Methoden waren allerdings stark vom Messgerät selbst und vom jeweiligen Messverfahren abhängig. Aus diesem Grund wurde im Jahr 1998 der Fachausschuss 185 "Advanced testing of cement based materials during setting and hardening" ins Leben gerufen und 1999 durch RILEM genehmigt. Durch diesen Fachausschuss wurden mehrere RILEM Mitglieder mit umfassenden Kenntnissen auf diesem Gebiet zusammengebracht. Das erste Treffen des Ausschusses fand im April 2000 statt. Daraufhin folgten noch vier weitere Arbeitssitzungen bis März 2004. Im August 2006 organisierte die Universität Stuttgart, RILEM und die Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) in Stuttgart einen abschließenden Workshop. Die dort präsentierten Ergebnisse wurden zusammengefasst und in den "Working Documents" (s.o.) veröffentlicht.

#### 2007



| Titel:             | "Moderne ZfP bei der Bauwerkserhaltung"<br>Abschlusskolloquium DFG-Forschergruppe FOR 384 |
|--------------------|---|
| Zeitpunkt:         | 03. Mai 2007  |
| Veranstalter:      | BASt.   |
| Veranstaltungsort: | BASt., Bergisch-Gladbach  |
| Tagungsband:       | ISBN 3-9808542-8-0  |

Dieses Kolloquium fand an der Bundesanstalt für Straßenwesen in Bergisch Gladbach statt und stellte den Abschluss eines Forschungsprojekts dar, das die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) in den Jahren 2000 bis 2007 unterstützt hat. Es ist die Forschergruppe mit dem Titel "Zerstörungsfreie Strukturbestimmung von Betonbauteilen mit akustischen und elektromagnetischen Echo-Verfahren", deren Sprecher Prof. H.-W. Reinhardt war; Dr. Chr. Große und Dipl.-Ing. R. Beutel (damals IWB) agierten als Geschäftsführer. Teilnehmer an der Forschergruppe waren die Universitäten Darmstadt, Dortmund, Kassel, Stuttgart und Weimar, die BAM Berlin und das Fraunhoferinstitut EADQ Dresden. Außerdem unterstützte eine Gruppe von Firmen und Einrichtungen der Praxis die Forschungsarbeiten, u.a. die BASt. Das Kolloquium diente als Plattform, um die Ergebnisse der Forschungsarbeiten zu präsentieren und Anregungen für weitere Arbeiten und Anwendungen zu erhalten.



 Titel:
 "HPFRCC 2007"

 Workshop on High Performance Fibre Reinforced Cement Composites

Zeitpunkt: 10. bis 13. Juli 2007

Veranstaltungsort: Mainz

Tagungsband: RILEM PRO 53; ISBN 978-2-35158-046-2

HPFRCC stellt eine Klasse von Verbundwerkstoffen dar, die unter Zugbeanspruchung dehnungsverfestigend unter vielfacher Rissbildung sind. Sie zeichnen sich aus durch eine hohe Bruchdehnung und große Bruchenergie. Der Hauptzweck des internationalen Workshops war, den neuesten Stand der Forschung darzulegen. 56 Beiträge über Druck-, Zug-, Schub- und Biegebeanspruchung, über Stoßbelastung, Feuerwiderstand, Erdbebeneinwirkung und Dauerhaftigkeit, sowie zu den Eigenschaften in jungem Alter, zu konstruktiven Anwendungen und zur Anwendung bei Verstärkungsmaßnahmen wurden präsentiert. 83 Teilnehmer aus 22 Ländern waren zugegen. Der Workshop war der 5. seiner Art, der alle 4 Jahre abwechselnd in Mainz und in Ann Arbor, Michigan USA, stattfindet.



| Titel:             | "Advances in Construction Materials 2007"<br>Symposium in honor of Hans W. Reinhardt |
|--------------------|--|
| Zeitpunkt:         | 23. und 24. Juli 2007  |
| Veranstalter:      | Universität Stuttgart, RILEM   |
| Veranstaltungsort: | Universität Stuttgart  |
| Tagungsband:       | Springer 2007; ISBN 978-3-540-72447-6  |

Im Juli 2007 wurde an der Universität Stuttgart das zweitägige Symposium "Advances in Construction Materials" abgehalten. Wissenschaftler aus der ganzen Welt kamen zusammen, um über zukünftige Entwicklungen und die Lösung aktueller Probleme zu diskutieren.

Das Symposium war Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt gewidmet, der in vielen Bereichen des Bauingenieurwesens tätig war und auch immer noch ist. Dazu gehören die Bereiche: Werkstoffe im Bauwesen, Bruchmechanik sowie die zerstörungsfreie Prüfung. Das Programm des Symposiums setzte sich zusammen aus einer Vielzahl an Vorträgen und sonstigen Veröffentlichungen.

Das im Anschluss an das Symposium entstandene Buch mit dem Titel "Advances in Construction Materials 2007" erschien 2007 beim Springer-Verlag. Darin kommen einige der führenden Experten auf ihrem Gebiet zu Wort um ihre Ergebnisse zu präsentieren. Das Buch gibt somit einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung im Bereich der Werkstoffe im Bauwesen.



| Titel:             | 2nd Symposium on<br>"Connections between Steel and Concrete" |
|--------------------|--|
| Zeitpunkt:         | 04. bis 07. September 2007                                   |
| Veranstaltungsort: | Stuttgart  |
| Tagungsband:       | Ibidem-Verlag 2007; ISBN 978-3-89821-807-8                   |

In den letzten Jahrzehnten kam es sowohl in der Befestigungstechnik als auch in der Verbundbauweise mit Stahl und Beton zu großen Fortschritten. Sowohl in dem Bereich der Forschung als auch im Bereich der Technik konnten neue Entwicklungen beobachtet werden. Um deshalb den Erfahrungsaustausch der Experten untereinander anzuregen, wurde ein Symposium mit dem Namen "Connections between Steel and Concrete" ins Leben gerufen.

Nach dem großen Erfolg des ersten Symposiums 2001, wurde im Jahre 2007 vom 4. bis zum 7. September ein weiteres Symposium in Stuttgart abgehalten. Organisiert wurde es unter der Federführung der Universität Stuttgart und der fib (fédération international du béton). Zusätzlich wurde die Veranstaltung von ACI (American Concrete Institute) und SEI (Structural Engineering Institute) unterstützt. Zusammengefasst wurden die vorgestellten Erkenntnisse in einem zweiteiligen Band, der im Ibidem-Verlag erschienen ist.

# UMSTRUKTURIERUNG DES BEREICHES "ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG IM BAUWESEN"

Die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) gewinnt in den letzten Jahren in allen Bereichen der Materialprüfung an Bedeutung. Traditionell ist die ZfP ein wichtiges Hilfsmittel in der Forschung, z. B. bei der Entwicklung von neuen Werkstoffen oder bei der Analyse des Werkstoffverhaltens oder der Schädigung von Bauteilen. Jedoch nimmt die Zahl an Anwendungen zu, die nicht der Grundlagenforschung sondern eher kommerziellen Bereichen zuzuordnen sind. Haupteinsatzbereiche sind dabei die Prüfung bzw. Inspektion von Bauteilen, Werkstoffen, Anlagen und Bauwerken, die Qualitätssicherung z. B. in der Produktion, die Überwachung in der Betriebsphase oder die Erhaltung von Anlagen und Bauwerken.

Es war deswegen nur konsequent, dass zum Jahreswechsel 2006/2007 die neue Abteilung *Zerstörungsfreie Prüfung und Überwachungstechnik* an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart ins Leben gerufen wurde. Diese Abteilung führt einen Großteil der Experten zusammen, die ZfP-Anwendungen in den Bereichen Maschinenbau und Bauwesen in Stuttgart betrieben haben und bislang in verschiedenen Referaten der MPA sowie im Institut für Werkstoffe im Bauwesen arbeiteten. Die Zusammenfassung des vorhandenen Know-hows konzentriert einerseits mit 20 Mitarbeitern eine der größten Gruppen der ZfP im universitären Bereich, andererseits schafft es die Grundlage für eine fachübergreifende Bearbeitung von Forschungs- und Kundenaufträgen.

Auch methodisch und gerätetechnisch ist durch den Zusammenschluss die Palette der Verfahren erweitert worden. Dazu zählen u.a. Ultraschallprüfung und US-Impuls-Echo, Magnetpulver- und Wirbelstromprüfung, Durchstrahlungsprüfung, Optische Prüfung/Endoskopie, Schallemissionsanalyse, Impakt-Echo, Radar, IR-Thermografie und Schwingungsanalyse. Die Kompetenz der Abteilung erstreckt sich dabei jetzt nicht mehr nur auf das Bauwesen sondern auf den gesamten Werkstoffbereich von der Prüfung von Baustoffen (Metalle, Beton, Stein/Mauerwerk, Komposite, Holz, etc.) über Bauteile und Prüfkörper bis zu Anlagen und Bauwerken. Die Aufgaben der Abteilung reichen dementsprechend von der Grundlagenforschung, Inspektion und Dauerüberwachung über die Zulassung und Qualitätssicherung bis zum Denkmalschutz. Diese Vielfalt an Verfahren und Anwendungsbereichen spiegelt sich in der Organisationsstruktur der Abteilung wieder, die in drei Referate unterteilt (Bild 1) und dem Fachbereich 4 der MPA "Erhaltung von Bauten und Anlagen" zugeordnet ist.



Bild 2: Organisationsstruktur der neuen Abteilung (Stand 1.1.2008)

Die Abteilung wird geleitet von Privatdozent Dr.-Ing. Christian Große der gleichzeitig den Fachbereich 4 leitet.

### Ausgewählte Literatur aus dem Bereich ZfP im Bauwesen

- [1] G. Busse, B.-H. Kröplin, F.K. Wittel (Hrsg.), Damage and its Evolution in Fiber-Composite Materials: Simulation and Non-Destructive Evaluation. Univ. Stuttgart, Okt. 2006, 548 S.
- [2] C. Große, R. Beutel, H.-W. Reinhardt, M. Krüger: Impact-echo techniques for non-destructive inspection of concrete structures. Int. Conf. on Conc. Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR), Cape Town, South Africa, Nov. 2005, Balkema Publ. Rotterdam (Hrsg. M. Alexander et al.), 2005, S. 174-176.
- [3] C. Große, H. Wiggenhauser, D. Algernon, F. Schubert, R. Beutel: Impact-Echo. Chapter 3 in: Betonkalender 2007 (Hrsg. Bergmeister + Wörner), Ernst & Sohn 2007, S. 496-505.
- [4] C. Große: Qualitätssicherung von Frischbeton mit Ultraschall. Betonwerk+Fertigteil-Technik, BFT vol. 2 (2005), S. 90-91.
- [5] H.-W. Reinhardt, C. Große, A. Herb, B. Weiler, G. Schmidt: Method for examining a solidifying and/or hardening material using ultrasound, receptacle and ultrasound sensor for carrying out the method. Patent, No. 09/857,536. US Patent and Trademark Office (2003).
- [6] H.-W. Reinhardt, C. Große (Hrsg.): Advanced testing of cement-based materials during setting and hardening. RILEM Report 31, ISBN: 2912143705, RILEM Publ. S.A.R.L.: Cachan ENS, 2005, 341 S.
- [7] J. Frick, G. Grassegger, H.-W. Reinhardt: Entwicklung und Erprobung eines Qualitätssicherungs- und Überwachungskonzeptes mit zerstörungsfreien Methoden für die konservierte Portale des Heilig-Kreuz-Münsters in Schwäbisch Gmünd. 4th International Conference Non-Destructive Testing of Works of Art. Berlin 3. – 8. Oktober 1994, DGZfB Berichtsband 45, Teil 1 (1994), S. 606-618.

- [8] J. Frick: Untersuchungen zum Feuchte- und Schadenszustand am Münster mit zerstörungsfreien bzw. zerstörungsarmen Methoden. Das Salemer Münster, Arbeitsheft 11, Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, ISBN 3-8062-1750-5, Konrad Theiss Verlag Stuttgart, 2002, S. 65-74.
- [9] C. Grosse, F. Finck, J. Kurz, H.-W. Reinhardt: Improvements of the acoustic emission technique using wavelet algorithms, coherence functions and automatic data analysis techniques. J. of Constr. and Build. Mat. 18 (2004), No. 3, S. 203-213.
- [10] C. Grosse, M. Krüger: Drahtlose Sensortechnik für die Dauerüberwachung von Bauwerken, Proc. 29. Darmstädter Massivbauseminar "Sicherheitsgewinn durch Monitoring?", Darmstadt, Sept. 2006, S. 203-214.

# Prüfverfahren und Geräte

Der Abteilung stehen u. a. die folgenden Verfahren und Techniken zur Verfügung:

- Ultraschall-Technik mit verschiedenen Impulsgebern und Leistungsverstärkern, Vorverstärkern, verschiedenen Ultraschallsensoren (resonant, multi-resonant, breitbandig) sowie Netzwerkanalysator und Frequenzgenerator.
- Ultraschall-Anwendungen in Durchschallung, z. B. zur Bestimmung von elastischen Eigenschaften (E-Moduln, Porosität, etc.) von Frischbeton, Ultraschall in Reflexion bzw. in Impuls-Echo-Technik.
- Ultraschall-Phasenspektroskopie.
- Impact-Echo-Technik mit Impactor und regelbarer Impactstärke und verschiedenen Impact-Echo-Sensoren für Anwendungen zum Auffinden von Fehlern (Kiesnester, Hohlräume) und zur Detektion von Rissen und Messung von Rissbreite und -tiefe.
- Radar mit einem GSSI-Radargerät SIR-2 und Antennen mit 500, 900 und 1600 MHz sowie Messrädern für schnelle Profilmessungen.
- Radar-Anwendungen zur Ortung der Bewehrung (schlaffe Bewehrung, Hüllrohre, Spannkabel), Ortung von Fehlstellen und Detektion von Feuchtestellen.
- Infrarotthermographie zur Schadensdiagnostik und Feuchtezustandserfassung.
- Schallemissionsanalyse mit automatischem Schallemissionssystem basierend auf einem Mehr-Kanal-Transientenrekorder, Vorverstärkern und verschiedene Schallemissionssensoren (resonant, multi-resonant, breitbandig).
- Anwendungen der Schallemissionsanalyse zur Detektion von Schäden (Rissen), Lokalisierung (1D, 2D, 3D), Darstellung der raumzeitlichen Schädigungsentwicklung, Analyse von Schädigungsparametern (Bruchgröße, Lage der Bruchflächen, Bruchtyp) sowie zur Untersuchung des Verbundes zwischen Matrix und Bewehrung.
- Modal- und Eigenschwingungsanalyse mit LMS-Modalanalyse-System, Modalanalyse-Hammer und verschiedenen Eigenschwingungssensoren (breitbandig).
- Anwendungen der Eigenschwingungsanalyse zur Bestimmung von elastischen Eigenschaften (E-Moduln, etc.), Bestimmung modaler Größen (Resonanzfrequenz, logarithmisches Dekrement, usw.) und Detektion von Fehlstellen.
- Drahtlose Sensorik mit Sensorknoten (Motes) inklusive Funkübertragungsmodulen, A/D-Wandler, Prozessor und Speicher sowie verschiedenen MEMS-Sensoren. Über Hybridmodule können außerdem fast alle konventionellen Sensoren angeschlossen werden, wobei derzeit Beschleunigungssensoren z. B. für die Modalanalyse bzw. die Schallemissionsanalyse, Feuchte- und Temperatursensoren (innerhalb und außerhalb des Bauteils) und Spannungs-, Dehnungs- und Verschiebungssensoren realisiert sind.

### Aktuelle Forschungsaktivitäten

Seit 2006 sind Mitarbeiter der Abteilung am Projekt "RIWEA - Roboter zur Inspektion der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Thermographie und Ultraschall" beteiligt. Das Projekt wird im Rahmen des InnoNet Programms des BMWi gefördert. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung neuartiger Technologien zur vollständigen Zustandserfassung der Rotorblätter von Windenergieanlagen. Die Projektleitung liegt beim Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und automatisierung IFF, Magdeburg. Durch den Einsatz von modernen Prüfverfahren wie Thermographie, Ultraschall und hochauflösender Kameras in Verbindung mit innovativen Robotern wird eine ganzheitliche Analyse des Blattzustandes ermöglicht, die zukünftig auch für die Darstellung von Schadensentwicklungen und -prognosen herangezogen werden können. Das Projekt hat eine Laufzeit von 4 Jahren.

2003 bis 2007 waren Mitarbeiter der Abteilung am Projekt "Sustainable Bridges - Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives" beteiligt. Es wird von der Europäischen Union als Integriertes Projekt im 6. Rahmenprogramm gefördert. In WP3 ging es um "Condition Assessment and Inspection" und in WP5 um "Monitoring". Im Vordergrund standen dabei die Ertüchtigung von Brückenbauwerken der europäischen Eisenbahnen im Hinblick auf die Zunahme der Zuggeschwindigkeiten, höheren Achslasten und dem insgesamt zunehmendem Zugverkehr u. a. durch die Osterweiterung der EU. Projektkoordinator ist die Fa. Skanska (Schweden) gemeinsam mit der Luleå University of Technology (Schweden). Das Projekt hatte eine Laufzeit von vier Jahren; eine internationale Konferenz zur Präsentation der Forschungsergebnisse fand vom 10. Bis 11. Oktober 2007 in Wroclaw, Polen, statt.

Weitere Informationen zu den Arbeiten der Abteilung sind unter folgender Adresse erhältlich:

Priv.-Doz. Dr.-Ing. Christian Große Abteilung *Zerstörungsfreie Prüfung und Überwachungstechnik* Materialprüfungsanstalt MPA Universität Stuttgart Postfach 801140; 70511 Stuttgart Tel.: 0711-685-66786; Email: christian.grosse@mpa.uni-stuttgart.de

# **PUBLIKATIONEN / PUBLICATIONS**

### 2005

Appl, J.: *Tragverhalten und Bemessung von Verbunddübeln*. In: 45. Forschungskollquium des DAfStb, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (IKI), Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Tragkonstruktion/Betonbau, Technische Universität Wien, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Berlin, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 06.-07.10, Wien. Berlin: Ernst & Sohn, 2005, S. 9-12.

Beckhaus, K.; Vogt, N.; Gehlen, C.: *Geringe Betondeckung bei bewehrten Bohrpfählen - immer ein Schadensfall?. Vortrag zum 12. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 17. März 2005.* In: Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt (2005), Heft 71. - Darmstadt, März 2005

Beckhaus, K.; Vogt, N.; Gehlen, C.: *Erweiterte Qualitätsprüfungen zum Nachweis ausreichender Betondeckung von bewehrten Bohrpfählen.* In: Bautechnik 82(2005), Nr. 7, S. 434-442.

Beutel, R.; Finck, F.; Große, C.U.; Reinhardt, H.-W.: *Untersuchung der inneren Struktur einer Spannbetonbrücke mit Hilfe des Impact-Echo- und des Radar-Verfahrens*. In: DGZfP Jahrestagung 2005. DGZfP, Rostock, BB 94. Berlin: 2005.

Beutel, R.; Große, C.U.: *Untersuchung der Dicke und des Erstarrungsverhaltens von Frischbeton mit dem Impact-Echo-Verfahren*. In: DGZfP Jahrestagung 2005. DGZfP, Rostock, BB 94. Berlin: 2005.

Beutel, R.; Leuze, C.: *Untersuchung des Erstarrungsverhaltens und der Dicke von Beton mit dem Impact-Echo-Verfahren*. In: IWB Mitteilungen. Bd. 2005/1: Jahresbericht 2002/04 Activities. IWB, Stuttgart: 2005.

Borrmann, J.; Schwarte, J.: *E-Learning Aktivitäten am IWB unter dem Einsatz von LORe*. In: Jahresbericht 2002/04 Activities. 2005/1: IWB-Mitteilungen. Stuttgart: Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 2005.

De Belie, N.; Große, C.U.; Kurz, J.; Reinhardt, H.-W.: *Ultrasound monitoring of the influence of different accelerating admixtures and cement types for shotcrete on setting and hardening behav-iour*. In: Cement and Concrete Research 35(2005), pp 2087-2094.

De Belie, N.; Große, C.U.; Reinhardt, H.-W.: *Ultrasound monitoring of setting and hardening of shotcrete including alkali-rich or alkali-free accelerators*. In: Alexander, M.G., Beushausen, H.-D., Dehn, F. and Moyo, P. (Eds.) Proc. of Int. Conf. "Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting". ICCRRR, 21.-23.11.2005, Cape Town, South Africa. 2005, pp 907-912.

Eligehausen, R.; Appl, J.; Lehr, B.; Meszaros, J.; Fuchs, W.: *Tragverhalten und Bemessung von Befestigungen mit Verbunddübeln unter Zugbeanspruchung. Teil 2: Dübelgruppen und Befestigungen am Bauteilrand.* In: Beton- und Stahlbetonbau 100(2005), 10, 856-864.

Eligehausen, R.; Appl, J.; Lehr, B.; Meszaros, J.; Fuchs, W.: *Tragverhalten und Bemessung von Befestigungen mit Verbunddübeln unter Zugbeanspruchung (Teil2)*. In: Beton- und Stahlbetonbau 100(2005), 10, 856-864.

Eligehausen, R.; Ozbolt, J.: *Design of Fastenings based on Fracture Mechanics*. In: 11th International Conference on Fracture. Carpinteri, A., March 2005, Turin. Turin: 2005, S.283. – CD

Fuchs, W.: *Post-installed Rebar Connections - State of the Art.* In: Sino-German Building Reinforcement Technology Symposium. Chongqing Research Institute of Building Science, December 15, 2005, Chongqing, China. 2005.

Fuchs, W.: *Prüfung und Zertifizierung von Transportankersystemen; deutsche und europäische Position*. In: Transportanker, Aussteifung, Decken und Fassaden. Industriell vorgefertigte Verbindungsmittel im Betonfertigteilbau, Studiengemeinschaft für Fertigteilbau e.V., 25.11.2005, Stuttgart. 2005.

Fuchs, W.; Asmus, J.: *Aktueller Stand bei Transportankern*. In: 49. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage. Faszination Beton, Fachverband Beton- und Fertigteilindustrie, 16. Februar 2005, Ulm. Gütersloh: Bauverlag, 2005.

Gehlen, C.; Sodeikat, C.: *Alternative Schutz- und Instandsetzungsmethoden für Stahlbetonbauteile.* In: Beton- und Stahlbeton Spezial 2005 (2005), S. 15-23.

Gehlen, C; Dauberschmidt, C.: *Damage assessment of a RC tunnel structure showing delaminations.* In: International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR). 21-23 November 2005, Cape Town, South Africa. 2005, pp. 671-675.

Große C. U.; Beutel, R.; Reinhardt, H.-W.; Krüger, M.: *Impact-echo Techniques for Nondestructive Inspection of Concrete Structures*. In: Int. Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR), Cape Town, South Africa. 2005. - on CD

Große, C. U.; Beutel, R.; Pessiki, S.: *Impact-Echo*. In: Advanced testing of cement based materials during setting and hardening. Reinhardt & Große (eds.), RILEM Report 31: Report of RILEM Technical Commitee 185-ATC. Bagneux, France: RILEM Publ. S.A.R.L., 2005, pp. 239-253.

Große, C.U.; Reinhardt, H.-W.: *Moderne Prüfmethoden für zementgebundene Materialien während der Erhärtungsphase*. In: BetonWerk International 8(2005), Heft 5, S. 66-81. - (auch in deutsch, französisch, italienisch, spanisch)

Große, C.U.; Kurz, J.H.; Beutel, R.; Reinhardt, H.-W.; Krüger, M.; Saukh, O.; Marrón, P.J.; Rothermel, K.; Meyer, J.; Bischoff, R.; Feltrin, G.: *Combined Inspection and Monitoring Techniques for SHM of Bridges*. In: 5th Int. Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM). Stanford University, 12.-14.09.2005, Stanford (USA). 2005, pp 1403-1410.

Große, C.U.; Reinhardt, H.-W.; Herb, A.T.: *Mechanical wave propagation - Ultrasound in throughtransmission*. In: H.W. Reinhardt and C.U. Große (Eds.) "Advanced testing of cement based materials during setting and hardening". RILEM Report 31: 2005, S. 163-190. Große, C.U.; Reinhardt, H.-W.; Krüger, M.; Beutel, R.: *Application impact-echo techniques for crack detection and crack parameter estimation in concrete.* In: 11th Intern. Conference on Fracture ICF 11, Turin. 2005, Abstract Book S. 954, paper auf CD.

Große, C.U.; Kurz, J.; Reinhardt, H.-W.; Krüger, M.; Marrón, P.J.; Rothermel, K.; Meyer, J.; Feltrin, G.: *Wireless monitoring of concrete structures using Micro-Electro-Mechanical Sensors (MEMS).* In: Alexander, M.G., Beushausen, H.-D., Dehn, F. and Moyo, P. (Eds.) Proc. of Int. Conf. "Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting". ICCRRR, 21.-23.11.2005, Cape Town, South Africa. 2005, pp 1327-1332.

Große, C.U.; Reinhardt, H.-W.: *Zerstörungsfreie Prüfung von Faserverbundwerkstoffen im Bauwesen*. In: Dehn, F., Holschemacher, K., Tue, N.V. (Hrsg.) "Faserverbundwerkstoffe - Innovationen im Bauwesen". Bauwerk-Verlag, 2005, S. 121-139.

Jüngert, A.; Kurz, J.H.: *Layer Thickness Determination of Polymer Concrete*. In: Otto Graf Journal (2005), Vol. 16, 203-212.

Krüger, M.; Reinhardt, H.-W.; Raupach, M.; Orlowsky, J.: *Textilbewehrter Beton unter Brandbean-spruchung*. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 71(2005), Nr. 10, S. 38-48.

Krüger, M.; Reinhardt, H.-W.; Raupach, M.; Orlowsky, J.: *Textile-reinforced concrete exposed to fire (chinesisch)*. In: Concrete Plant + Precast Technology China 2(2005), S. 9-14.

Kurz, J.H.; Große, C.U.; Reinhardt, H.-W.: *Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete.* In: Ultrasonics 43(2005), pp 538-546.

Lettow, S.; Mayer, U.; Eligehausen, R.: *The influence of the parameter*  $\Phi$ /peff on crack widths, *Discussion*. In: Structural Concrete - Journal of the fib Volume 6(2005), Number 4, pp. 155-160. - Lausanne, Switzerland

Mönnig, S.: *Water saturated super-absorbent polymers used in high strength concrete*. In: OGJ 2005(2005), Vol. 16, pp. 193-203.

Naaman, A.E.; Reinhardt, H.-W.: *Proposed classification of HPFRCC composites based on their tensile response*. In: N. Banthia, T. Uomoto, A. Bentur, S.P. Shah (Eds.) "Construction Materials". ConMat<sup>'</sup>05 and Mindess Symposium, Vancouver. 2005, Abstract Book S. 458, paper auf CD.

Negele, A.; Eligehausen, R.; Ozbolt, J.: *Increasing the Punching Capacity of Flat Slabs with a New Type of Shear Reinforcement*. In: Keep Concrete Attractive. Hungarian Group of fib, 23 bis 25 Mai 2005, Budapest. Budapest: Publishing Company of Budapest University of Technology and Economics, 2005, S. 570-576. - ISBN 963 420 837 1 Ö

Negele, A.: *Durchstanzverhalten von Flachdecken mit neuer Schubbewehrung und Drucklagern aus UHPC*. In: Tagungsband Doktorandensymposium. 45. Forschungskolloquium des DAfStb, Beton- und Stahlbetonbau, 6.-.7.10.05, Wien. Berlin: Ernst und Sohn, 2005, S. 153-157.

Ožbolt, J.; Kožar, I.; Eligehausen, R.; Periškić, G.: *Instationäres 3D Thermo-mechanisches Modell für Beton*. In: Beton- und Stahlbetonbau 2004(2005), 80, 283-290.

Ožbolt, J.; Kožar, I.; Eligehausen, R.; Periškić, G.: *Three-dimensional FE analysis of headed stud anchors exposed to fire*. In: Computers and Concrete 2004(2005), Vol. 2, No.4, 249-266.

Ožbolt, J.; Reinhardt, H.-W.: *Rate dependent fracture of notched plain concrete beams*. In: G. Pijaudier-Cabot, B. Gérard, P. Acker (Eds.) "Creep, shrinkage and durability of concrete and concrete structures". CONCREEP 7, Nantes. 2005, pp 57-62.

Ožbolt, J.; Reinhardt, H.-W.: *Dehnungsgeschwindigkeitsabhängiger Bruch eines Kragträgers aus Beton*. In: Bauingenieur 80(2005), S. 283-290.

Ožbolt, J.; Periškić, G.; Eligehausen, R.: *Transient thermal 3D FE analysis of anchor bolts under high temperature*. In: Keep concrete attractive - Proceedings of the fib Symposium in Budapest, Hungary, 23-25 May 2005. Publishing Company of Budapest University of Technology and Economics, 2005, pp. 657-662. - ISBN 963-420-839-8

Ožbolt, J.; Periškić, G.; Eligehausen, R.: *Ersatz von Zulassungsversuchen für Befestigungselemente durch numerische Untersuchnungen: Schlussbericht.* Fraunhofer IRB Verlag, 2005. - ISBN 978-3-8167-6515-8

Ožbolt, J.; Kožar, I.; Eligehausen, R.; Periškić, G.: *Three-dimensional FE analysis of headed stud anchors exposed to fire*. In: Computers and Concrete 2005(2005), Heft 2, Nummer 4, 249-266.

Ožbolt, J.; Eligehausen, R.; Kožar, I.; Periškić, G.: *Transient thermal 3D FE analysis of headed stud anchors exposed to fire.* In: Fire Design of Concrete Structures: What now? What next? - Proceedings of the Workshop by fib Task Group 4.3. 2005, pp. 185-198. - ISBN 88-88847-91-X

Potthoff, M.; Eligehausen, R.: *Design of Channel Bars under Shear load*. In: Keep Concrete Attractive, Hungarian Group of fib, 23. - 25. Mai 2005, Budapest. Budapest: Publishing Company of Budapest University of Technology and Economics, 2005. - ISBN 963 420 837 1 Ö

Reinhardt, H.-W.: Achievements and prospects of high-performance normal and fiber reinforced concrete. In: Z. Lü, Z. Wu., A. Li and S. Meng (Eds.) "Innovation & Sustainability of Structures" (ISISS 2005). 20.-22.11.2005, Nanjing (China). 2005, pp 142-155.

Reinhardt, H.-W.: Concrete with enhanced durability. In: Otto Graf Journal 16(2005), pp 9-20.

Reinhardt, H.-W.; Aicher, S.; Finn, R.: *Energy dissipation and fracture softening of doweled wood-fiber gypsum board joints: the potential for seismically loaded shear walls.* In: N. Banthia, T. Uomoto, A. Bentur, S.P. Shah (Eds.) "Construction Materials". ConMat<sup>o</sup> and Mindess Symposium, Vancouver. 2005, Abstract Book S. 193, paper auf CD.

Reinhardt, H.-W.; Finck, F.; Große, C.; Kurz, J.: *Brazilian test of concrete evaluated by AE.* In: 11th Intern. Conference on Fracture ICF 11, Turin. 2005, Abstract Book S. 961, paper auf CD.

Reinhardt, H.-W., Große, C.U.: *Mechanical wave propagation - Basics*. In: H.W. Reinhardt and C.U. Große (Eds.) "Advanced testing of cement based materials during setting and hardening". RILEM Report 31: 2005, S. 83-96.

Reinhardt, H.-W.; Große, C.U. (Eds.): Advanced testing of cement based materials during setting and hardening. RILEM Report 31. Bagneux: 2005. - 341 S.

Reinhardt, H.-W.; Huss, A.: *Frostwiderstand von Betonen - Vergleich von Labor- und Auslagerungsversuchen*. In: Tagungsband zum Kolloquium "Frostwiderstand von Beton in Labor und Praxis". Düsseldorf. 2005, S. 49-57.

Reinhardt, H.-W.; Koenders, E.A.B.: *Introduction*. In: H.W. Reinhardt and C.U. Große (Eds.) "Advanced testing of cement based materials during setting and hardening". RILEM Report 31: 2005, S. 1-11.

Reinhardt, H.-W.; Krüger, M.: *Vorgespannte textilbewehrte Betonplatten*. In: Holschemacher, K. (Hrsg.): Stahlbetonplatten - Neue Aspekte zur Bemessung, Konstruktion und Bauausführung, 6. Tagung Betonbauteile, Leipzig, März 2005. Bauwerk-Verlag, 2005, S. 121-132.

Reinhardt, H.-W.; Naaman. A.E.: *Geschichtliche Entwicklung hochduktiler Betone mit Kurzfaserbewehrung*. In: V. Mechterine (Hrsg.) "Hochduktile Betone mit Kurzfaserbewehrung". Kaiserslautern. ibidem-Verlag Stuttgart, 2005, S. 1-9.

Reinhardt, H.-W.; Ožbolt, J.: *Strain-rate dependent fracture of a concrete cantilever beam*. In: Mindess Symposium, Vancouver. 2005, auf CD.

Reinhardt, H.-W.; Stegmaier, M.: *Verhalten von selbstverdichtendem Beton bei Brandbeanspruchung*. In: Beton 55(2005), Nr. 6, S. 296-303.

Reinhardt, H.-W.; Stegmaier, M.: *Einfluss der Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften von SVB.* In: Betonwerk + Fertigteiltechnik 71(2005), Nr. 5, S. 34-45.

Reinhardt, H.-W.; Weiss, G.C.: *Research and development on connections - New joint material for dismantling concrete structures*. In: 18th BIBM International Congress, Amsterdam. 2005, pp 152-153.

Reinhardt, H.-W.; Wüstholz, T.: *Rissneigung von SVB bei frühem Austrocknen im Luftzug*. In: BetonWerk International 8(2005), Heft 4, S. 70-81.

Schießl, P.; Gehlen, C.: *Potential and limits of durability design*. In: International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR). 21-23 November 2005, Cape Town, South Africa. 2005, pp. 37-42.

Schießl, P.; Gehlen, C.: *New approach of service life design for concrete structures*. In: Int. Workshop "Durability of Reinforced Concrete under Combined Mechanical and Climatic Loads (CMCL)", Oct. 2005. Qingdao, China. 2005, pp 3-14. Simons, I.; Eligehausen, R.: *Bond behaviour and design of post-installed rebar connections*. In: M.G. Alexander; H.-D. Beushausen; F. Dehn; P. Moyo: Proceedings of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR). 21-23 November, 2005, Cape Town, South Africa. London, UK: Taylor & Francis, 2005, pp. 433.

Simons, I.; Eligehausen, R.; Kirtzakis, V.: *Behaviour of Post-Installed Rebars in Uncracked and Cracked Concrete.* In: Keep Concrete Attractive. Hungarian Group of fib. 23 - 25 Mai 2005, Budapest University of Technology and Economics. Budapest: 2005, pp. 669-674. - ISBN 963 420 837 1 Ö

Simons, I.; Eligehausen, R.; Kretzschmar, M.: *Bond behaviour of post-installed rebars under onedirectional and reversed cyclic loading.* In: M.G. Alexander; H.-D. Beushausen; F. Dehn; P. Moyo: Proceedings of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR). 21-23 November, 2005, Cape Town, South Africa. London, UK: Taylor & Francis, 2005, pp. 416.

Sodeikat, C; Gehlen, C.; Schießl, A.: *Damage assessment of a RC bridge structure showing damages at the pre-stressing steel.* In: International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR). 21-23 November 2005, Cape Town, South Africa. 2005, pp. 665-670.

Voigt, Th.; Große, C.U.; Sun, Z.; Shah, S.P.; Reinhardt, H.-W.: *Comparison of ultrasonic wave transmission and reflection with P- and S-waves on early age mortar and concrete.* In: Materials and Structures 38(2005), S. 729-738.

Volland, G.; Herterich, U.; Krause, G.; Reinhardt, H.-W.: *Nachweis von Betonzusatzmitteln in er-härteten, zementgebundenen Baustoffen*. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 71(2005), Nr. 11, S. 48-56.

Xu, S.; Reinhardt, H.-W.: *Shear fracture on the basis of fracture mechanics*. In: Otto Graf Journal 16(2005), pp 21-78.

Xu, S.; Reinhardt, H.-W.; Zhang, X.: *Shear capability of reinforced concrete beams without stirrups predicted using a fracture mechanical approach*. In: 11th Intern. Conference on Fracture ICF 11, Turin. 2005, Abstract Book S. 1114, paper auf CD.

#### 2006

*Materials Science-Based Models in Support of Internal Water Curing.* In: RILEM state-of-the-art report. 2006.

*Basic concepts for a model of different internal water sources.* In: Concrete Durability and Service Life Planning - ConcreteLife' 06. PRO 46: proceedings. RILEM: RILEM Publications, 2006, pp. 235-244.

Aicher, S.; Klöck, W.; Reinhardt, H.-W.: *Fracture toughness of wood fiber gypsum panels from size effect law.* In: Journal of Engineering Mechanics 132(2006), No. 7, pp 730-738.

Appl, J.; Eligehausen, R.; Potthoff M: *BIONIK in der Befestigungstechnik*. In: 46. Forschungskolloquium . DafStb, 30.03-31.03.2006, Stuttgart. Berlin: 2006, S. 129-138.

Appl, J.; Eligehausen, R.; Potthoff M.: *BIONIK in der Befestigungstechnik*. In: 46. Forschungskolloquium . DafStb, 30.03-31.03.2006, Universität Stuttgart. Berlin: DafStb, 2006, S.129-138.

Beutel, R.; Große, C. U.; Reinhardt, H.-W.: *Evaluation of Setting and Hardening of Freshly Mixed Concrete in Plate Structures Using the Impact-Echo Method*. In: Advanced Testing of Fresh Cementitious Materials, DGZfP, August 3-4, 2006, Stuttgart. 2006. - on CD

Beutel, R.; Reinhardt, H.-W.; Große, C. U.; Glaubitt, A.; Krause, M.; Maierhofer, C.; Algernon, D.; Wiggenhauser, H.; Schickert, M.: *Performance Demonstration of Non-Destructive Testing Methods.* In: 9th European Conference on NDT (EC-NDT), DGZfP, September 25-29, 2006, Berlin. On CD: 2006.

Borrmann, J.; Schwarte, J.: *A System of Concepts to Enhance the Information Content of Online Documents in Concrete Technology*. In: Proceedings of the Knut Højgaard Conference. Advanced Cement-Based Materials: Research and Teaching, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, 12.06.-15.06.2005, Lyngby, Denmark. BYG-DTU, 2006, Seite 351-362. - Report R-155; ISBN 87-7877-227-3

Brameshuber, W.; Brockmann, T.; Curbach, M.; Meyer, C.; Vilkner, G.; Mobasher, B.; Peled, A.; Reinhardt, H.-W.; Krüger, M.; Wastiels, J.: *Concrete/Matrix*. In: W. Brameshuber (Ed.) "Textile Reinforced Concrete". RILEM Report 36: 2006, S. 29-56.

Brameshuber, W.; Brockmann, T.; Mobasher, B.; Pachow, U.; Peled, A.; Reinhardt, H.-W.; Krüger, M.; Wastiels, J.: *Production technologies*. In: W. Brameshuber (Ed.) "Textile Reinforced Concrete". RILEM Report 36: 2006, S. 57-81.

Büteführ, M.; Fischer, C.; Gehlen, C.; Menzel, K.; Nürnberger; U.: *On-site investigations on concrete resistivity - a parameter of durability calculation of reinforced concrete structures.* In: Materials and Corrosion 57(2006), No. 12, 932 - 939. Eligehausen, R.; Cook, R.; Appl, J.: *Behavior and Design of Adhesive Bonded Anchors*. In: ACI Structural Journal V.103(2006), No. 1, pp. 822-832.

Eligehausen, R.; Hoehler, M. S.: *Reassessment of Seismic Ductilty Ceriteria for Fastenings Based on New Experimental Data.* In: fib proceedings of the 2nd International Congress. fib Italia, Juni 2006, Neapel. Neapel: fib Italia, 2006, ID 8-32, Session 8.

Eligehausen, R.; Mallée, R.; Silva, J.F.: Anchorage in Concrete Construction. Berlin: Ernst & Sohn, 2006. - ISBS-13 978-3-433-01143-0

Eligehausen, R.; Simons, I.; Kretzschmar. M.: *Behaviour of Post-Installed Rebars under Reversed Cyclic Loading*. In: Proceedings of the 2nd fib Congress. Fédération Internationale du Béton, fib CEB-FIP, June 5-8, 2006, Naples, Italy. 2006, ID 16-3.

Fuchs, W.: *Prüfung und Zertifizierung von Transportankersystemen - aktuelle deutsche und europäische Position*. In: Transportanker, Aussteifung, Decken und Fassaden. Industriell vorgefertigte Verbindungsmittel, Studiengemeinschaft für Fertigteilbau e.V., 24.11.2006, Bochum. 2006.

Fuchs, W.; Eligehausen, R.: *Forschungsaktivitäten des IWB im Bereich der Befestigungstechnik.* In: Beiträge zum 46. Forschungskolloquium. DAfStb-Forschungskolloquium, DAfStb, 30. und 31. März 2006, Universität Stuttgart. Stuttgart: 2006, 95-106.

Gehlen, C.; Dauberschmidt, C.; Nürnberger, U.: *Condition Control of Existing Structures by Performance Testing*. In: Otto Graf Journal 17(2006), S. 19-44.

Gehlen, C.; Nürnberger, U., Neubert, B.: *Stahlrost in Beton*. In: "Wechselwirkungen", Jahrbuch aus Lehre und Forschung der Universität Stuttgart. 2006, S. 12-21.

Große, C.; Wiggenhauser, H.; Algernon, D.; Schubert, F.; Beutel, R.: *Impact-Echo, Stand der Technik und Anwendungen des Verfahrens*. In: DAfStb Heft 565: Zerstörungsfreie Prüfverfahren und Bauwerksdiagnose im Betonbau. Berlin: Beuth Verlag, 2006, S. 17-24.

Große, C.U.; Reinhardt, H.-W.; Krüger, M.; Beutel, R.: *Ultrasound through-transmission techniques for quality control of concrete during setting and hardening*. In: Advanced Testing of Fresh Cementitious Materials, DGZfP, August 3-4, 2006, Stuttgart. 2006, on CD.

Jüngert, A.; Große, C. U.: *Measurements of the Vibrations of a Building*. In: Otto Graf Journal (2006), Vol. 17, pp. 73 -87.

Krüger, M.; Große, C.U.; Reinhardt, H.-W.: *Crack depth determination at large concrete structures using scanning impact-echo-techniques.* In: P.J.S. Cruz, D.M. Frangopol, L.C. Neves (Eds.) "Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost". IABMAS 2006, Portugal. 2006, on CD.

Krüger, M.; Reinhardt, H.-W.: *Composite Materials - Fire resistance*. In: W. Brameshuber (Ed.) "Textile Reinforced Concrete". RILEM Report 36: 2006, S. 211-219.

Kurz, J.H.; Finck, F.; Große, C.U.; Reinhardt, H.-W.: *Stress drop and stress redistribution in concrete quantified over time by the b-value analysis.* In: Structural Health Monitoring 5(2006), No. 1, pp 69-81.

Lettow, S.: *Numerische Simulation des Verbundverhaltens von Bewehrungsstäben*. In: DAfStb-Forschungskolloquium. Beiträge zum 46. Forschungskolloquium, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 30. und 31. März 2006, Universität Stuttgart. Stuttgart: 2006, S.119-128.

Münsch, R.; Reinhardt, H.-W.: Bauschäden an Membrantragwerken und zugehörige Werkstoff-Prüfverfahren. In: Bauingenieur 81(2006), S. 332-336.

Naaman, A.E.; Reinhardt, H.-W.: *Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response*. In: Materials and Structures 39(2006), No. 5, pp 547-555.

Ožbolt, J.; Rah, K.K.; Meštrović, D.: *Influence of loading rate on concrete cone failure*. In: International Journal of Fracture 2005(2006), 139, 239-252.

Ožbolt, J.; Periškić, G.: *Befestigungen unter Temperaturbeanspruchung*. In: Beiträge zum 46. DAfStb-Forschungskolloquium, 30-31. März 2006, Stuttgart, Germany. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2006, pp. 151-160. - ISBN 3-9808542-4-8

Piehl, C.; Mönnig, S.: A model for the prediction of the material attributes of hybrid high strength concrete. In: Otto Graf Journal 2006(2006), Vol. 17, pp. 57-73.

Pregartner, T.; Eligehausen, R.: *Tragverhalten von Kunststoffdübeln in gerissenem Beton.* . In: Beton- und Stahlbetonbau 101(2006), 1, S. 31 - 39.

Reinhardt, H.-W.: *Ultraschall-Monitoring der Eigenschaftsentwicklung von jungem Beton*. In: Müller, H.S., Nolting, U., Haist, M. (Hrsg.) "Innovationen in der Betonbautechnik". 15.03.2006, Karlsruhe. 2006, S. 91-96.

Reinhardt, H.-W.: *DFG-Forschergruppe "Zerstörungsfreie Strukturbestimmung von Betonbauteilen mit akustischen und elektromagnetischen Echo-Verfahren"*. In: "Zerstörungsfreie Prüfverfahren und Bauwerksdiagnose im Betonbau", Beiträge zur Fachtagung des DAfStb in Zusammenarbeit mit der BAM. 11.03.2005, Berlin. 2006, S. 7-9.

Reinhardt, H.-W.: *Verfeinerte ZfP-Verfahren im Bauwesen*. In: Tagungsbericht Band 2. 16. ibausil, Weimar. 2006, S. 2-1107-2-1122.

Reinhardt, H.-W.: *Beton*. In: Bergmeister, K., Wörner, H.-D. (Hrsg.): BetonKalender 2007; Teil 1, 96. Jahrg. Berlin: Ernst & Sohn, 2006, S. 353-478.

Reinhardt, H.-W.: Forschungs am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) und am Otto-Graf-Institut (OGI). In: Beiträge zum 46. Forschungskolloqium am 30. und 31. März 2006 an der Universität Stuttgart. Stuttgart. 2006, S. 1-24. Reinhardt, H.-W.: New German guideline for design of concrete structures for the containment of hazardous materials. In: Otto Graf Journal 17(2006), pp 9-18.

Reinhardt, H.-W. (Ed.): *Advanced testing of fresh cementitious materials (Working documents)*. DGZfP. Stuttgart: 2006. - 348 S.

Reinhardt, H.-W.; Finn, R.; Aicher, S.: *Static and dynamic response of cellulose fibergypsumboard wall elements.* In: A.M. Brandt, V.C. Li, I.H. Marshall (Eds.) "Brittle Matrix Composites 8". 2006, pp 73-84.

Reinhardt, H.-W.; Große, C.U.; Kurz, J.H.: *Short fiber reinforced concrete*. In: G. Busse, B.-H. Kröplin, F.K. Wittel (Eds.) "Damage and ist evolution in fiber-composite materials: simulation and non-destructive evaluation", Kapitel 2.1.2. Universität Stuttgart. 2006, S. 143-155.

Reinhardt, H.-W.; Große, C.U.; Kurz, J.H.: *Continuous fiber reinforced concrete*. In: G. Busse, B.-H. Kröplin, F.K. Wittel (Eds.) "Damage and ist evolution in fiber-composite materials: simulation and non-destructive evaluation", Kapitel 2.2.3. Universität Stuttgart. 2006, S. 251-262.

Reinhardt, H.-W.; Große, C.U.; Beutel, R.; de Belie, N.; Kurz, J.H.: *On-line monitoring of setting and hardening of concrete.* In: J. Marchand, B. Bissonnette, R. Gagné, M. Jolin, F. Paradis (Eds.) "Advances in Concrete through Science and Engineering". RILEM PRO 51: 2006, S. 421 (Abstract book).

Reinhardt, H.-W.; Krüger, M.: *Serviceability and ultimate limit state of textile reinforced and prestressed concrete.* In: P. Nimityongskul, A.E. Naaman, J.E. Bolander, C. Jaturapitakkul, C. Sujivorakul, S. Sayamipuk (Eds.) "Ferrocement and thin reinforced cement composites". FERRO-8, Bangkok. 2006, pp 23-32.

Reinhardt, H.-W.; Krüger, M.; Bentur, A.; Brameshuber, W.; Banholzer, B.; Curbach, M.; Jesse, F.; Mobasher, B.; Peled, A.; Schorn, H.: *Composite Materials - Bond*. In: W. Brameshuber (Ed.) "Tex-tile Reinforced Concrete". RILEM Report 36: 2006, S. 83-131.

Reinhardt, H.-W.; Krüger, M.; Ožbolt, J.: *Innovative concrete panels prestressed with a textile fabric.* In: M.H. Harajli, I.E. Harik, A.E. Naaman (Eds.) "Civil Engineering Infrastructure Systems". CEIS 2006, Lebanon. 2006, 10 pp (on CD).

Reinhardt, H.-W.; Stegmaier, M.: *Dauerhaftigkeit von wärmebehandeltem Selbstverdichtendem Beton (SVB)*. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 72(2006), H. 3, S. 20-32.

Reinhardt, H.-W.; Stegmaier, M.: *Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of self-compacting concrete (SCC)*. In: Cement and Concrete Research 36(2006), H. 5, pp 879-885.

Reinhardt, H.-W.; Stegmaier, M.: *Self-consolidating concrete in fire*. In: ACI Materials Journal 103 103(2006), No. 2, pp 130-135.

Reinhardt, H.-W.; Wüstholz, T.: *Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Fließeigenschaften von SVB*. In: Beton 56(2006), Nr. 1+2 / Nr. 3, S. 30-35 / S. 102-107.

Reinhardt, H.-W.; Wüstholz, T.: *About the influence of the content and composition of the aggregates on the rheological behaviour of self-compacting concrete.* In: Materials and Structures 39(2006), No. 7, pp 683-693.

Reinhardt, H.-W.; Öttl, C.: *Zur Beurteilung des Alkaliangriffes von Bindemittelgemischen aus Portlandzement und Steinkohlenflugasche mit dem SIC-Test.* In: Tagungsbericht Band 2. 16. ibausil, Weimar. 2006, S. 2-0493 - 2-0499.

Schießl, P.; Bamforth, P.; Baroghel-Bouny, V.; Corley, G.; Faber, M.; Forbes, J., Gehlen, C. et al.: *Model code for service life design*. In: fib bulletin 34(2006), 110 Seiten.

Schießl, P.; Gehlen, C.: *New approach of service life design for concrete structures*. In: Restoration of Buildings and Monuments 12(2006), No. 4, pp 285-298.

Schießl, P.; Gehlen, C.; Kapteina, G.; Dauberschmidt, C.: *Monitoring von Stahlbetonbauwerken mit Hilfe von Korrosionssensoren – Anwendungen, Auswertungen und Implementierung der Ergebnisse in eine Dauerhaftigkeitsprognose*. In: Sicherheitsgewinn durch Monitoring: Zum 65. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Grübl. Freunde des Inst. für Massivbau der Techn. Univ. Darmstadt e.V. 2006, S. 387-403.

Schwarte, J.; Reinhardt, H.-W.: *Grundzüge des Online-Informationssystems "Nachhaltig Bauen mit Beton"*. In: DAfStb-Statusseminar "Nachhaltig Bauen mit Beton". 26.10.2006, Berlin. 2006, S. 14-21.

Schwarte, J.; Borrmann, J.: *Wissensbasierte Systeme in Lehre und Forschung*. In: Beiträge zum 46. DAfStb-Forschungskolloquium. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 30.-31.03.2006, Stuttgart. Berlin: DAfStb, 2006, S. 47-57. - ISBN 3-9808542-4-8

Schwarte, J.; Borrmann, J.; Reinhardt, H.-W.: *Computer Aided Teaching in Civil Engineering Materials Science at the University of Stuttgart*. In: Proceedings of the Knut Højgaard Conference. Advanced Cement-Based Materials: Research and Teaching, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, 12.06.-15.06.2005, Lyngby, Denmark. BYG-DTU, 2006, Seite 363-373. - Report R-155; ISBN 87-7877-227-3

Sodeikat, C.; Dauberschmidt, C.; Schießl, P.; Gehlen, C.; Kapteina, G.: *Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken für Public Private Partnership Projekte*. In: Beton- und Stahlbetonbau 101(2006), H. 12, S. 932-942.

Van der Veken, P.; Ožbolt, J.; Grassegger, G.; Reinhardt, H.-W.: *Experimentelle Untersuchungen und FE-Simulation an baden-württembergischem Schilfsandstein zur thermisch-hygrischen Belastbarkeit*. In: Grassegger, G., Patitz, G. & Landesdenkmalamt B.-W. (Hrsg.): "Natursteinsanierung, Stuttgart 2006 – Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen". 17. März 2006, Stuttgart. 2006, S. 69-80.

Volland, G., Herterich, U., Krause, G., Reinhardt, H.-W.: *Nachweis von Betonzusatzmitteln in erhärteten, zementgebundenen Baustoffen.* In: Concrete Plant + Precast Technology China (2006), S. 9-11 (in Chinese).

### 2007

Aicher, S.; Reinhardt, H.-W.: *Delaminierungseigenschaften und Scherfestigkeiten von verklebten rotkernigen Buchenholzlamellen*. In: Holz als Roh- und Werkstoff 65(2007), Nr. 2, S. 125-136.

Asmus, J.; Schneider, J.; Eligehausen R.: *Load bearing behavior of climbing cones with large load bearing area.* In: Connections between Steel and Concrete, Vol. 1. 2nd Symposium on Connections between Steel and Concrete, Eligehausen, R.; Fuchs, W.; Genesio, G; Großer, P., 04. - 07.09.2007, Stuttgart. Stuttgart: ibidem-Verlag, 2007, S. 441 - 452.

Asmus, J.; Schneider, J.; Eligehausen R.; Oelhafen, U.: *Design of shear load connectors with supplementary reinforcement*. In: Connections between Steel and Concrete, Vol. 1. 2nd Symposium on Connections between Steel and Concrete, Eligehausen, R.; Fuchs, W.; Genesio, G; Großer, P., 04. - 07.09.2007, Stuttgart. Stuttgart: ibidem-Verlag, 2007, S. 569 - 582.

Beutel, R.; Reinhardt, H.-W.; Große, C. U.; Krause, M.; Algernon, D.; Streicher, D.; Maierhofer, C.; Glaubitt, A.: *Quantitativer Verfahrensvergleich*. In: Betonkalender 2007 (Eds. Bergmeister, Wörner). Berlin: Ernst & Sohn, 2007, S. 567-573.

Bischoff, R.; Feltrin, G.; Meyer, J.; Bachmaier, S.; Krüger, M.; Saukh, O.: *Prototype implementation of a wireless sensor network*: *Report SB 5.7.* http://www.sustainablebridges.net: Sustainable Bridges (6th EU framework programme), 2007.

Cook, R. A.; Eligehausen, R.; Appl J.: *Transient Thermal 3D FE Analysis of Anchor Bolts under High Temperature*. In: Beton- und Stahlbetbonbau (2007), 102, S. 16 . 20.

Eligehausen, R.; Asmus, J.; Lotze, D.; Potthoff, M.: *Ankerschienen*. In: BetonKalender 2007. Berlin: Ernst & Sohn, 2007, S. 377- 435.

Eligehausen, R.; Fuchs, W.: *Recent developments and open problems in fastening technique*. In: Connections between Steel and Concrete. Universität Stuttgart, fib, Sept. 4th - 7th, 2007, Stuttgart. ibidem-Verlag, 2007.

Eligehausen, R.; Appl, J.: *Nachträglich eingemörtelte Bewehrungsstäbe* – . In: Concrete Solutions. 51. BetonTage, FBF Betondienst GmbH, 13.- 15.02.07, Neu-Ulm. 2007, S.- 148 -149 . - BFT01/2007

Eligehausen, R.; Appl, J.: *Behavior and design of fastenings with bonded anchors: Numerical analysis and experimental verification.* In: Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures Volume 2: Design, Assessment and Retrofitting of RC Structures. Carpinteri, A.; Gambarova, P.; Ferro, G; Plizzari, G., 17.-22.06.07, Catania. London: Taylor & Francis Group, 2007, S. 643 - 654.

Eligehausen, R.; Fichtner, S.: *Stiffness requirements of baseplates*. In: Design, Assessment and Retrofitting of RC Structures, Volume 2. 6th Int. Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Carpinteri, A.; Gambarova, P.; Ferro, G; Plizzari, G., 17.-22. Juni 2007, Catania. London: Taylor & Francis Group, 2007, S. 945 - 949.

Eligehausen, R.; Fuchs, W.: *Actual tendencies in fastening technology*. In: Advances in construction materials. Universität Stuttgart, 23. /24. Juli 2007, Stuttgart. Springer-Verlag, 2007.

Eligehausen, R.; Fuchs, W.; Genesio, G.; Großer, P.: *Connections between Steel and Concrete*. Vol. 1-2: Stuttgart: ibidem-Verlag, 2007.

Fichtner, S.; Eligehausen, R.: *Stiffness requirements of base plates.* In: Connections between Steel and Concrete, Vol. 2. 2nd Symposium on Connections between Steel and Concrete, Eligehausen, R.; Fuchs, W.; Genesio, G; Großer, P., 04. - 07.09.2007, Stuttgart. Stuttgart: ibidem-Verlag, 2007, S. - 1059 - 1071.

Fuchs, W.: *The human factor in fastening technology - a force to be reckoned with*. In: Connections between Steel and Concrete. Universität Stuttgart, fib, Sept. 4th -7th, 2007, Stuttgart. ibidem-Verlag, 2007.

Fuchs, W.: *Befestigungsmittel im Hochbau - eine Übersicht*. In: Befestigungsmittel im Hochbau - Korrosionsprobleme und Abhilfemassnahmen. 3-Länder-Korrosionstagung, Gesellschaft für Korrosionsschutz, 18. und 19. April 2007, Stuttgart. Frankfurt: DECHEMA, 2007, 5-14.

Fuchs, W.; Eligehausen, R.: *Neue europäische Regelungen und ihre Auswirkungen auf die Befestigungstechnik im Mauerwerksbau*. In: Mauerwerk Kalender 2007. Bemessung, Instandsetzung, Schallschutz. Berlin: Ernst & Sohn, 2007.

Fuchs, W.; Eligehausen, R.: *Behaviour and Testing of Fastenings to Concrete for Use in Seismic Applications*. In: Seismic Safety of Structures, Risk Assessmment and Disaster Mitigation. 3rd Indo-German Workshop, March 12-13, 2007, Mumbai, India. Mumbai, india: BRNS, 2007, 85-94.

Gehlen, C.: *Durability design according to the New Model Code for Service Life Design*. In: "Concrete under severe conditions - Environment and Loading". Proc. of 5th Intern. Conference CON-SEC'07 (04.-06.2007), F. Toutlemonde, K. Sakai, O.E. Gjørv, N. Banthia (Eds.), Tours. 2007, Vol. 1, pp 35-50.

Gehlen, C.: Vielfalt (Editorial). In: Beton- und Stahlbetonbau 102(2007), H. 3, S. 143.

Gehlen, C.; Dauberschmidt, C.: *Condition control of existing structures by performance testing.* In: Performance based evaluation and indicators for concrete durability (RILEM PRO 47). Institute of Construction Science "Eduardo Torroja", CSIC, Madrid, Spain, 19-21 March 2006. RILEM Publ. SARL, 2007, pp 277-294.

Gehlen, C.; Schießl, P.: *fib-"Mustervorschrift": Lebensdauerbemessung*. In: Beton + Fertigteil-Jahrbuch 2008. Ausgabe 56. Bauverlag Gütersloh, 2007, pp 173-179.

Gehlen, C.; Mayer, T.F.: *Regensburger Dom: Zur Instandsetzung des Südturmhelms*. In: "Natursteinsanierung, Stuttgart 2007 – Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen", 16.03.2007. Grassegger, G., Patitz, G. & Wölbert, O. (Hrsg.), Stuttgart. 2007, S. 77-84.

Gehlen, C.; Schießl-Pecka, A.: *Reduzierung der erforderlichen Betondeckung durch Optimierung der Materialwiderstände*. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 73(2007), H. 2, S. 100-101.

Genesio, G.; Periškić, G.; Schmid K.; Appl, J.; Eligehausen R.: *Requirements of Technical Approvals versus practice (Bonded Anchors and Post-installed Rebars)*. In: 2nd Symposium on Connections between Steel and Concrete. Universität Stuttgart, September 4th - 7th, 2007, Stuttgart, Germany. ibidem Verlag, 2007, pp. 75-84.

Große, C.U.; Gehlen, C.; Glaser, S.D.: *Sensing methods in civil engineering for an efficient construction management.* In: "Advances in Construction Materials 2007". C.U. Große (Ed.). Springer Verlag, 2007, pp 546-561.

Große, C. U.; Beutel, R.; Wiggenhauser, H.; Algernon, D.; Schubert, F.: *Impact-Echo*. In: Betonkalender 2007 (Eds. Bergmeister, Wörner). Berlin: Ernst & Sohn, 2007, S. 496-504.

Große, C. U.; Reinhardt, H.-W.; Beutel, R.; Öztürk, T.: *Qualitätssicherung des Erstarrens und Erhärtens von zementgebundenen Baustoffen mit Ultraschall*. In: Betonkalender 2007 (Eds. Bergmeister, Wörner). Berlin: Ernst & Sohn, 2007, S. 505-511.

Große, C.U.; Reinhardt, H.-W.: *A new concept for bridge monitoring using a wireless sensor net-work*. In: M.I. Russell, P.A.M. Basheer "Concrete Platform 2007. Belfast. 2007, S. 271-283.

Große, C.U.; Reinhardt, H.-W.: *Monitoring the steel-concrete interaction using acoustic emission techniques.* In: R. Eligehausen, W. Fuchs, G. Genesio, P. Großer (Eds.) "Connections between steel and concrete", Vol. 2. ibidem, 2007, pp 785-794.

Großer, P.; Fuchs, W.; Eligehausen, R.: *Quadruple fastenings under torsion loading*. In: Connections between Steel and Concrete. Universität Stuttgart, fib, Sept. 4th - 7th, 2007, Stuttgart. ibidem-Verlag, 2007.

Hall, C.; Hoff, W.D.; Reinhardt, H.-W.; Pfingstner, A.; Wilson, M.A.; Serino, L.: *Sequential imbibition of two immiscible liquids into concrete*. In: Journal of Physics D: Applied Physics 40(2007), pp 4642-4646.

Hüer, T.; Eligehausen, R.: *Design of bonded fasteners for splitting failure mode*. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Connections between Steel and Concrete. Universität Stuttgart, fib, Sept. 4th - 7th, 2007, Stuttgart. Stuttgart: ibidem-Verlag, 2007, pp. 363-372.

Hüer, T.; Eligehausen, R.: *Splitting failure mode of bonded anchors*. In: Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. FraMCoS-6, 17-22 June 2007, Catania, Italy. Taylor and Francis, 2007, pp. 753-760. - ISBN 978-0-415-44616-7

Krüger, M.; Große, C.U.; Reinhardt, H.-W.: *Structural health monitoring with wireless sensors to enhance sustainability in structural engineering*. In: IABSE Bericht "Improving infrastructure worldwide". IABSE Symposium 2007, Weimar. 2007, on CD.

Mönnig S.; Lura P.: *Superabsorbent Polymers-An additive to Increase the Freeze-Thaw Resistance of High Strength Concrete.* In: Advances in Construction Materials 2007. Springer, 2007, pp. 351-358.

Negele, A.; Eligehausen R.: *Punching tests on corner slab column connections with shear reinforcement.* In: Connections between Steel and Concrete, Vol. 2. 2nd Symposium on Connections between Steel and Concrete, Eligehausen, R.; Fuchs, W.; Genesio, G; Großer, P., 04. -07.09.2007, Stuttgart. Stuttgart: ibidem-Verlag, 2007, S. 995 - 1005.

Negele, A.; Eligehausen, R.; Ožbolt, J.; Polak, M. A.: *Finite-element simulations on punching tests of shear-retrofitted slab-column connections*. In: Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. FRAMCOS 6, 17-22 June, Catania. Leiden: BALKEMA, 2007, pp. 911-918.

Ožbolt, J.; Periškić, G.; Eligehausen, R.: *3D Thermo-hygro-mechanical model for concrete*. In: Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - Proceedings of the 6th international conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures, Catania, Italy, 17-22 June 2007. Taylor & Francis, 2007, pp. 533-540. - Volume 2: Design, Assessment and Retrofitting of RC Structures; ISBN 978-0-415-44616-7

Ožbolt, J.; Kožar, I.; Periškić, G.: *Three-dimensional FE analysis of headed stud anchors exposed to fire*. In: Extreme Man-Made and Natural Hazards in Dynamics of Structures, NATO Advanced Research Workshop, Opatija, Croatia. Springer, 2007, pp. 177-198. - ISBN 953-6953-12-19

Ožbolt, J.; Eligehausen, R.; Periškić, G.; Mayer, U.: *3D FE analysis of anchor bolts with large embedment depths.* In: Engineering fracture mechanics 2006(2007), No. 74, pp. 168-178.

Ožbolt, J.; Periškić, G.; Reinhardt, H.-W.; Eligehausen, R.: *Numerical analysis of spalling of concrete cover at high temperature*. In: Connections between Steel and Concrete, Vol. 1. 2nd Symposium on Connections between Steel and Concrete, Eligehausen, R.; Fuchs, W.; Genesio, G; Großer, P., 04. - 07.09.2007, Stuttgart. Stuttgart: ibidem-Verlag, 2007, S. 881 - 891.

Ožbolt, J.; Eligehausen, R.; Periškić, G.; Mayer, U.: *3D FE analysis of anchor bolts with large embedment depths.* In: Engineering Fracture Mechanics 2006(2007), 74, 168-178.

Ožbolt, J.; Periškić, G.; Reinhardt, H.-W.; Eligehausen, R.: *Numerical analysis of spalling of concrete cover at high temperature*. In: R. Eligehausen, W. Fuchs, G. Genesio, P. Großer (Eds.) "Connections between steel and concrete", Vol. 2. ibidem, 2007, pp 881-892.

Ožbolt, J.; Kožar, I. and Periškić, G.: *Three-dimensional FE analysis of headed stud anchors exposed to fire*. In: Extreme Man-Made and Natural Hazards in Dynamics of Structures. ISBN 953-6953-12-19: NATO Advanced Research Workshop. Ed. A. Ibrahimbegović and I. Kožar. Opatija, Croatia: Springer, 2007, 177-198.

Periškić, G.; Ožbolt; J.; Eligehausen, R.: *3D Finite Element analysis of stud anchors with large head and ebmedment depth.* In: Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - Proceedings of the 6th international conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures, Catania, Italy, 17-22 June 2007. Taylor & Francis, 2007, pp. 761-768. - Volume 2: Design, Assessment and Retrofitting of RC Structures; ISBN 978-0-415-44616-7

Pregartner, T.; Eligehausen, R.: *Load Bearing Behaviour of Plastic anchors in Cracked Concrete*. In: Beton- und Stahlbetonbau (2007), 102, S. 22 - 30.

Pregartner, T.; Eligehausen, R.; Fuchs, W.: *Load bearing behaviour of a heavy load undercut grouted anchor.* In: Connections between Steel and Concrete. 2nd Symposium on Connections between Steel and Concrete, Eligehausen, R.; Fuchs, W.; Genesio, G; Großer, P.; 04. - 07.09.2007, Stuttgart. Stuttgart: ibidem-Verlag, 2007, S. 817 - 825.

Rao, G. A.; Pandurangan, K.; Eligehausen, R.: *Effect of embedment length on bond stress-slip response in high strength concrete*. In: Connections between Steel and Concrete, Vol. 2. 2nd Symposium on Connections between Steel and Concrete, Eligehausen, R.; Fuchs, W.; Genesio, G; Großer, P., 04. - 07.09.2007, Stuttgart. Stuttgart: ibidem-Verlag, 2007, S. 1161 - 1170.

Rao, G. A.; Vijayanand, I.; Eligehausen, R.: *Studies on ductility of RC beams in flexure and size effect.* In: Volume 2: Design, Assessment and Retrofitting of RC Structures. Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Carpinteri, A.; Gambarova, P.; Ferro, G; Plizzari, G., 17.-22. Juni 2007, Catania. London: Taylor & Francis Group, 2007, S. 671-675.

Rao, G.A.; Kunal, K.; Eligehausen, R.: *Shear strength of RC deep beams*. In: Design, Assessment and Retrofitting of RC Structures, Volume 2 . 6th Int. Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Carpinteri, A.; Gambarova, P.; Ferro, G; Plizzari, G., 17.-22. Juni 2007, Catania. London: Taylor & Francis Group, 2007, S. 693 - 699.

Rao, G.A.; Pandurangan, K.; Sultana, F.; Eligehausen, R.: *Studies on the pull-out strength of ribbed bars in high-strength concrete*. In: Design, Assessment and Retrofitting of RC Structures, Volume 2. 6th Int. Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Carpinteri, A.; Gambarova, P.; Ferro, G; Plizzari, G., 17.-22.06.2007, Catania. London: Taylor & Francis Group, 2007, S. 775 - 780.

Reinhardt, H.-W.: *Baustoff-Forschung*. In: Gebaute Visionen - 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Berlin: Beuth-Verlag, 2007, S. 144-151.

Reinhardt, H.-W.: *Joost C. Walraven - 60 Jahre*. In: Beton- und Stahlbetonbau 102(2007), H. 2, S. 141-142.

Reinhardt, H.-W.: *Demountable concrete structures - A contribution of the concrete prefab industry to the sustainability of construction*. In: F. Lichu, S. Limin, S. Zhi (Eds.) Proc. of 2007 Intern. Symp. on Integrated Life-cycle Design and Management of Infrastructure (ILDMI). 2007, Abstract book p 152, full paper on CD.

Reinhardt, H.-W.: *Fluid transport in wedge-split cracked concrete*. In: K. Audenaert, L. Marsavina, G. de Schutter (Eds.) "Transport mechanisms in cracked concrete". Leuven. 2007, pp 13-18.

Reinhardt, H.-W.: *Otto Graf, Rückschau im Licht von heute (Abschiedsvorlesung)*. In: Zum Gedenken an Otto Graf, universeller Bauforscher in Stuttgart: Reden zur Abschiedsvorlesung von Prof. Dr.-Ing. H.W. Reinhardt am 4. Juli 2006. Stuttgart. 2006 (Reden und Aufsätze) 71(2007), S. 7-42.

Reinhardt, H.-W.; Naaman, A.E. (Eds.): *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites* (*HPFRCC5*). RILEM PRO 53. Bagneux: 2007. - 518 S.

Reinhardt, H.-W.; Ožbolt, J.: *of concrete beams at different loading rates*. In: A. Carpinteri, P.G. Gambarova, G. Ferro, G.A. Plizzari "Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures". FraMCoS 6, Catania (Italien). 2007, Vol. 1, pp 563-569.

Reinhardt, H.-W.; Ožbolt, J.; Krüger, M.; Periškić, G.: *Numerical investigation of fire tests on textile-reinforced concrete elements.* In: H.W. Reinhardt and A.E. Naaman (Eds.) "High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5)". RILEM PRO 53: 2007, pp 351-360.

Reinhardt, H.-W.; Schellhorn, H.: *Getempertes Phonolith-Gesteinsmehl als Betonzusatzstoff mit hohem k-Wert*. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 73(2007), H. 1, S. 24-31.

Reinhardt, H.-W.; Schellhorn, H.: *Getempertes Phonolith-Gesteinsmehl als Betonzusatzstoff mit hohem k-Wert.* In: Zement Kalk Gips 60(2007), Nr. 3, S. 78-84.

Reinhardt, H.-W.; Schwarte, J.: *Grundzüge eines Online-Informationssystems (Teilprojekt A3)*. In: Schlussbericht zur ersten Phase DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhaben "Nachhaltig Bauen mit Beton". DAfStb Heft 572. Beuth-Verlag, 2007, S. 101-130.

Reinhardt, H.-W.; Wiens, U.: Ausgewählte Auslegungen zu DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 - Einordnung von Bauteilen in Expositionsklassen. In: beton 57(2007), H. 3, S. 82-85.

Reinhardt, H.-W.; Wüstholz, T.: *Tensile deformation behaviour of self-compacting concrete under sustained loading*. In: G. de Schutter, V. Boel (Eds.) "Self-compacting concrete". RILEM PRO 54, Vol. 2: 2007, S. 591-598.

Reinhardt, H.-W.; Öttl, C.: *Einsatz des SIC-Tests für Normalbetone*. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 73(2007), H. 5, S. 34-43.

Schmid, K.; Eligehausen, R.: *Influence of anchor reinforcement on behaviour of anchorages under shear load*. In: Connections between Steel and Concrete. 2nd Symposium on Connections between Steel and Concrete, Eligehausen, R.; Fuchs, W.; Genesio, G; Großer, P., 04. - 07.09.2007, Stuttgart. Stuttgart: ibidem-Verlag, 2007, S. 583 - 596.

Schwarte, J.; Borrmann, J.; Reinhardt, H.-W.: *Computer aided teaching in civil engineering materials science at the University of Stuttgart.* In: Materials and Structures 40(2007), pp. 441-448. Simons, I.; Eligehausen, R.: *Behaviour and design of post-installed rebars under cyclic loading*. In: Connections between Steel and Concrete, Vol. 1. 2nd Symposium on Connections between Steel and Concrete, Eligehausen, R.; Fuchs, W.; Genesio, G; Großer, P. , 04.07.09.2007, Stuttgart. ibidem-Verlag, 2007, S. 405 - 413.

Weiß, G.C.; Reinhardt, H.-W.: *Demontables Bauen mit Beton und demontable Deckenscheiben*. In: BetonWerk International 10(2007), H. 6, S. 170-176.

Wildermuth, A.; Fuchs, W.; Eligehausen, R.: *Fastenings under tension load in lightweight and normalweight concrete.* In: Connections between Steel and Concrete. Universität Stuttgart, fib, Sept. 4th - 7th, 2007, Stuttgart. ibidem-Verlag, 2007.

Wüstholz, T.; Reinhardt, H.-W.: *Deformation behaviour of self-compacting concrete under tensile loading*. In: Materials and Structures 40(2007), No. 9, pp 965-977.

# DIPLOMARBEITEN

# 2005

| Nr. | Kandidat             | Betreuer               | Thema  |
|-----|----------------------|------------------------|--|
| 1   | Kiassif,<br>Erkan    | Mönnig                 | Vergleich wassergesättigter Zusätze in Mörtelprismen   |
| 2   | Kontzi,<br>Christian | Appl                   | Tragverhalten von Einzel- und Gruppenbefestigungen   |
| 3   | Ceylan,<br>Cerdal    | Nürnberger             | Untersuchungen zur Korrosionsschutzentwicklung von Zink-<br>Spritzschichten auf Beton  |
| 4   | Barth,<br>Ulrike     | Horn                   | Vom Industrie- zum Kulturzentrum   |
| 5   | Van der Veken        | Ozbolt &<br>Grassegger | Werkstoffmechanische Betrachtung und numerische Simulation zur<br>Rissentstehung an baden-württembergischen Schilfsandsteinen für<br>den Einsatz an historischen Bauwerken |

#### 2006

| Nr. | Kandidat             | Betreuer        | Thema  |
|-----|----------------------|-----------------|--|
| 1   | Coutlas,<br>Vasilios | Prof. Reinhardt | Beitrag zur Systematik "Steinschlag durch Eigenbewurf"<br>Contribution to system of self induced rock impact   |
| 2   | Memis,<br>Bülent     | Mönnig          | Vergleich wassergesättigter Zusätze und Zuschläge in Mörtelpro-<br>ben.  |
| 3   | Egner,<br>Claudia    | Simons          | Vergleich des Tragverhaltens von einbetonierten und einge-<br>mörtelten Bewehrungsstäben unter zyklischer Beanspruchung<br>Comparison of the bond behaviour of cast-in-place and<br>post-installed rebars under cyclic loading |
| 4   | Piehl,<br>Christian  | Mönnig          | Untersuchung und Modellierung des Einflusses vorgesättigter<br>Leichtzuschläge auf hochfest Betone<br>Examination and modelling of influences of presaturated lightweight<br>aggregates on high strength concrete              |
| 5   | Bingöl,<br>Aydogan   | Krüger          | Detektion von Rissen in Betonbauteilen unter Verwendung von<br>Impact-Echo-Verfahren<br>Determination of cracks in concrete structures using Impact-Echo-<br>Techniques  |

#### 2007

| Nr. | Kandidat             | Betreuer | Thema  |
|-----|----------------------|----------|--|
| 1   | Toksöz,<br>Murat     | Appl     | Befestigungssysteme in Natur und Technik (BIONIK)<br>Fastening Systems in nature and engineering (Bionics)   |
| 2   | Maier,<br>Achim      | Aicher   | Sicherheit und langfristige Beständigkeit harnstoffharzverklebter<br>tragender Holzbauteile<br>Safety and long-term reliability of structural timber components<br>glued with urea-formaldehyde adhesives  |
| 3   | Xu,<br>Chengjie      | Negele   | Einfluss des Versuchsaufbaus auf das Durchstanzen von Flachde-<br>cken ohne Durchstanzbewehrung  |
| 4   | Radojkovic,<br>Nenad | Schwarte | Evaluieren eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Eigenschaften<br>verschiedener Zemente aus laufender Werksproduktion hinsichtlich<br>des Fließverhaltens basierend auf der Konsistenzprüfung der Hol-<br>cim Cone TM Methode, in Korrelation zu den Frischbetoneigen-<br>schaften |
| 5   | Koc,<br>Yilder       | Mönnig   | Untersuchung des Einflusses superabsorbierender Polymere auf der<br>Frost-Tausalzbeständigkeit von Betonen und Vergleich mit Refe-<br>renzbetonen  |
| 6   | Lehmann,<br>Frank    | Krüger   | Detection and Evaluation of Concrete Defects and their Causes in<br>Tunnel Construction using Non-Destructive Test Methods   |

In Kooperation mit der Universität Karlsruhe (TH) entstanden am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) im Jahre 2007 auch die beiden folgenden Diplomarbeiten:

| Nr. | Kandidat            | Betreuer | Thema   |
|-----|---------------------|----------|---|
| 1   | Grosser,<br>Philipp | Fuchs    | Zum Tragverhalten von randnahen Einzelbefestigungen in dünnen<br>Bauteilen unter Querlast zum Rand sowie randnahen Vierfachbefes-<br>tigungen unter Torsionsbeanspruchung |
| 2   | Eckardt,<br>Frank   | Fuchs    | Zum Tragverhalten von randnahen, parallel und senkrecht zum Bau-<br>teilrand angeordneten Zweifachbefestigungen unter Quer- und Tor-<br>sionsbeanspruchungen              |

# **DISSERTATIONEN / THESES**

### 2005

### Büteführ, Marita

Einfluss des Aluminiumgehaltes gespritzter Zinküberzüge auf den Korrosionsschutz von StahlHauptberichter:Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf ReinhardtMitberichter:Prof. Dr.-Ing. Bernhard ElsenerMitberichter:Prof. Dr.-Ing. habil. Ulf NürnbergerTag der mündlichen Prüfung:13.12.2005 Schriftenreihe / Otto-Graf-Institut ; 91URL:<a href="http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2006/2505/">http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2006/2505/</a>

# Finck, Florian

Untersuchung von Bruchprozessen in Beton mit Hilfe der SchallemissionsanalyseHauptberichter:Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt.Mitberichter:Prof. Dr. rer. nat. Manfred JoswigTag der mündlichen Prüfung:19.07.2005URL:<a href="http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2005/2360/">http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2005/2360/</a>

# Meyer, Andrea

Zum Tragverhalten von Injektionsdübeln in MauerwerkHauptberichter:Prof. Dr.-Ing. Rolf EligehausenMitberichter:Prof. Dr.- Ing. Konrad BergmeisterTag der mündlichen Prüfung:14.12.2005 / IWB-Mitteilungen ; 2006/1URL:<a href="http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2006/2630/">http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2006/2630/</a>

# Ruck, Hans-Jürgen

Erfassung der Schadensentwicklung von mineralischen Baustoffen mit Hilfe der Ultraschallphasenspektroskopie Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Neisecke Tag der mündlichen Prüfung: 21.07.2005 URL: <u>http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2005/2350/</u>

# Stegmaier, Michael

Eigenschaften von wärmebehandeltem Selbstverdichtendem BetonHauptberichter:Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf ReinhardtMitberichter:Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. mult. Jochen StarkTag der mündlichen Prüfung:22.07.2005 / Deutscher Ausschuss für Stahlbeton ; 562URL:<a href="http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2005/2343/">http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2005/2343/</a>

# Wüstholz, Timo

Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von selbstver-<br/>dichtendem BetonHauptberichter:Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf ReinhardtMitberichter:Prof. Dr.-Ing. Harald S. MüllerTag der mündlichen Prüfung:12.07.2005 / Deutscher Ausschuss für Stahlbeton ; 564URL:<a href="http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2005/2344/">http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2005/2344/</a>

### 2006

### Bruckner, Markus

Anwendung von Ankerstäben in Rahmenecken, Rahmenendknoten und Stütze-Fundament-Verbindungen Hauptberichter: Prof. Dr.–Ing. Rolf.Eligehausen Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák Tag der mündlichen Prüfung: 24.07.2006 / IWB-Mitteilungen ; 2007/2 URL: http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2007/3013/

# Hoehler, Matthew S.

| Behavior and testing of | fastenings to concrete for use in seismic applications |
|-------------------------|--|
| Hauptberichter:         | Prof. DrIng. Rolf Eligehausen                          |
| Mitberichter:           | Prof. DrIng. Lothar Stempniewski                       |
| Tag der mündlichen Pr   | üfung: 02.08.2006 / IWB-Mitteilungen ; 2006/2          |
| URL:                    | http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2006/2758/ |

# Kurz, Jochen H.

Verifikation von Bruchprozessen bei gleichzeitiger Automatisierung der Schallemissionsanalyse an Stahl- und Stahlfaserbeton

| Hauptberichter:       | Prof. DrIng. Prof. h.c. DrIng. E.h. Hans-Wolf Reinhardt |
|-----------------------|---|
| Mitberichter:         | Prof. Dr. rer. nat. habil. Manfred Joswig               |
| Tag der mündlichen Pr | üfung: 02.02.2006                                       |
| URL:                  | http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2006/2548/  |

# Lettow, Steffen

Ein Verbundelement für nichtlineare Finite Elemente Analysen : Anwendung auf Übergreifungs-<br/>stößeHauptberichter:Prof. Dr.-Ing. Rolf EligehausenMitberichter:Prof. Dr.-Ing. Lothar StempniewskiMitberichter:Prof. Dr.-Ing. Balthasar NovákTag der mündlichen Prüfung:18.01.2006 / IWB-Mitteilungen ; 2007,1URL:http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2006/2689/
## 2007

### Bekalo, Samson Ayele

The Utilization of Coffee Husk and Hulls for Construction MaterialsHauptberichter:Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf ReinhardtMitberichter:Prof. Dr.-Ing. Hanno ErtelTag der mündlichen Prüfung:25.06.2007

## Simons, Isabelle

Verbundverhalten von eingemörtelten Bewehrungsstäben unter zyklischer BeanspruchungHauptberichter:Prof. Dr.–Ing. Rolf EligehausenMitberichter:Prof. Dr.-Ing. Lothar StempniewskiTag der mündlichen Prüfung:18.01.2007 / IWB-Mitteilungen ; 2007/3URL:<a href="http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2007/3102/">http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2007/3102/</a>

## PERSONAL / STAFF

### Institutsleitung

| Prof. DrIng. Christoph Gehlen            | Geschäftsführen   | der Direktor |
|--|-------------------|--------------|
| Prof. DrIng. Rolf Eligehausen            | Stellvertretender | Direktor     |
| Regina Jäger                             | Sekretariat Prof. | Gehlen       |
| Silvia Choynacki                         | Sekretariat Prof. | Eligehausen  |
| Prof. DrIng. DrIng. E.h. DrIng. h.c. Gal | lus Rehm          | (emeritiert) |

#### Honorarprofessoren, Außerplanmäßige Professoren, Lehrbeauftragte

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt

| DrIng. Michael Aufrecht                 | Lehrbeauftragter                      |
|---|---------------------------------------|
| DrIng. habil. Christian Große           | Hochschuldozent, MPA                  |
| DrIng. Heiko Lünser                     | Lehrbeauftragter                      |
| apl. Prof. DrIng. habil. Ulf Nürnberger | Außerplanmäßiger Professor, MPA       |
| apl. Prof. DrIng. habil. Josko Ožbolt   | Außerplanmäßiger Professor, IWB       |
| DrIng. Michael Reick                    | Lehrbeauftragter                      |
| DiplIng. Rudolf Brinkmann               | Lehrbeauftragter, gest. am 05.01.2008 |

Die Nachricht vom Tod von Herrn Dipl.-Ing. Rudolf Brinkmann, Jahrgang 1936, traf uns unerwartet. Herr Brinkmann trat 1960 als Versuchsingenieur und wissenschaftlicher Mitarbeiter in die Stahlabteilung des Otto-Graf-Instituts ein. Es war die Zeit, als die elektrische Messtechnik die mechanische Messtechnik abzulösen begann und so widmete sich Herr Brinkmann mit viel Geschick und Fachkenntnis der Aufgabe, die neue Messtechnik im Otto-Graf-Institut zu etablieren. Auch rüstete er die Zug- und Druckprüfmaschinen auf elektrische Messtechnik mit elektronischer Anzeige um. Aufgrund seiner Ausbildung zum Sprengmeister war er immer gefragt, wenn Hochgeschwindigkeitsversuche anstanden. Daneben war er langjähriger Vorsitzender des örtlichen Personalrats, wo er sich maßgeblich dafür einsetzte, dass die gleitende Arbeitszeit eingeführt wurde. In den 90er Jahren engagierte sich Herr Brinkmann sehr stark beim Aufbau des Deutschen Akkreditierungsverfahren im In- und Ausland. Für das Fach Akkreditierung und Zertifizierung war er Lehrbeauftragter an der Universität Stuttgart. Wir werden ihn in dankbarer Erinnerung behalten.

(im Ruhestand)

# Abteilung Werkstoffe und Konstruktion, Wissenschaftliche Mitarbeiter

| Bachmaier, Sebastian        | DiplIng. (BA)      | seit 01.11.2006               |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Beutel, Ralf                | DiplIng.           | bis 31.01.2007                |
| Borrmann, Jens              | DiplIng.           | bis 30.06.2006                |
| Chatzichrisafis, Panagiotis | DiplIng.           | von 01.08.2006 bis 30.11.2007 |
| Finck, Florian              | DiplGeophys.       | bis 31.05.2005                |
| Fischer, Christian          | DiplIng. (FH), MSc | seit 01.07.2006               |
| Herterich, Uwe              | Dr. rer. nat.      | bis 30.04.2007                |
| Jüngert, Anne               | DiplGeophys.       | seit 01.06.2005               |
| Kessler, Sylvia             | DiplIng.           | seit 01.10.2006               |
| Krüger, Markus              | DrIng.             | bis 28.02.2007                |
| Mönnig, Sven                | DiplIng.           |                               |
| Mielich, Oliver             | DiplIng.           | von 01.05.2005 bis 31.05.2007 |
| Rinder, Tassilo             | DrIng.             | bis 31.07.2007                |
| Schwarte, Joachim AOR       | DrIng.             |                               |
| Stegmaier, Michael          | DiplIng.           | bis 30.09.2005                |
| Weirich, Tim                | DiplIng.           | seit 01.09.2007               |
| Wu, Yuan                    | DiplIng.           | seit 01.06.2005               |
| Wüstholz, Timo              | DiplIng.           | bis 31.03.2006                |

# Abteilung Befestigungstechnik, Wissenschaftliche Mitarbeiter

| Appl, Jörg            | DiplIng. | bis 31.12.2006  |
|-----------------------|----------|-----------------|
| Bezecny, Lubor        | DiplIng. |                 |
| Blochwitz, Ronald     | DiplIng. | seit 01.09.2006 |
| Fichtner, Stefan      | DiplIng. | bis 31.03.2006  |
| Fuchs, Werner         | DrIng.   |                 |
| Genesio, Giovacchino  | DiplIng. | seit 01.09.2005 |
| Grosser; Philipp      | DiplIng. | seit 01.04.2007 |
| Herzog, Martin        | DiplIng. | seit 01.09.2005 |
| Hoehler, Matthew      | M.Sc.    | bis 31.07.2005  |
| Hüer, Thorsten        | DiplIng. |                 |
| Kontzi, Christian     | DiplIng. | seit 01.11.2005 |
| Lettow, Steffen       | DiplIng. | bis 31.07.2006  |
| Lin, Yong-Zhi         | DrIng.   | bis 31.03.2005  |
| Mahrenholz, Philipp   | DiplIng. | seit 01.10.2006 |
| Mahrenholz, Christoph | DiplIng. | seit 01.01.2007 |
| Maliha, Ramzi         | DiplIng. | bis 31.08.2005  |
| Meyer, Andrea         | DiplIng. | bis 31.08.2005  |
| Negele, Anita         | DiplIng. | seit 01.01.2005 |
| Periskic, Goran       | DiplIng. |                 |
| Piehl, Christian      | DiplIng. | seit 01.07.2006 |
| Potthoff, Michael     | DiplIng. | bis 31.01.2007  |
| Rößle, Kerstin        | DiplIng. | bis 31.03.2006  |
| Schlottke, Bernd AOR  | DiplIng. |                 |

| Schmid, Klaus    | DiplIng.     |                 |
|------------------|--------------|-----------------|
| Schneider, Josef | DiplIng.(FH) | bis 31.07.2005  |
| Simons, Isabelle | DiplIng.     | bis 31.07.2006  |
| Welz, Georg      | DiplIng.     |                 |
| Wildermuth, Anke | DiplIng.     | seit 01.06.2005 |

## Nichtwissenschaftliche Mitarbeiter

| Bahr, Gerhard          |      |            |
|------------------------|------|------------|
| Baur, Gisela           |      |            |
| Choynacki, Silvia      |      |            |
| Geiger, Paul           |      |            |
| Jäger, Regina          | seit | 01.12.2006 |
| Korkowski, Engela      | bis  | 31.07.2006 |
| Langenfeld, Mike       |      |            |
| Lindenmeier, Eugen     |      |            |
| Scherf, Peter          |      |            |
| Schmidt, Hella         | bis  | 31.12.2006 |
| Schmidt, Markus        | bis  | 30.09.2006 |
| Washington, Luis Oscar | bis  | 31.03.2006 |
| Werner, Monika         |      |            |



Am 1. April 2006 hat der gebürtige Düsseldorfer Christoph Gehlen die W3-Professur "Werkstoffe im Bauwesen" und die Leitung des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen übernommen. Gleichzeitig wurde er Direktor der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, die derzeit knapp 400 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beschäftigt.

1966 geboren, studierte er nach absolviertem Zivildienst zunächst in Bonn Physik/Chemie. Im Jahr 1989 wechselte er aber dann Studientort und -fach, um an der RWTH Aachen Bauingenieurwesen zu studieren. Nach seinem Diplom im Jahre 1995 arbeitete er an der RWTH Aachen am Institut für Bauforschung (ibac) drei Jahre als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe "Stahlbeton und Bewehrungen", die er dann im Anschluss ein Jahr lang verantwortlich leitete. Seine im Jahr 2000 verfasste Dissertation über die "Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken" wurde mehrfach ausgezeichnet (Readymix Förderpreis Beton 2000; Rüsch-Forschungspreis 2001 des Deutschen Betonvereins; Borchers-Plakette 2000 der RWTH Aachen).

Von März 2000 an war Christoph Gehlen als geschäftsführender Gesellschafter eines in München ansässigen Ingenieurbüros freiberuflich tätig. Seit 2003 war er zusätzlich bis zu seiner Berufung nach Stuttgart Lehrbeauftragter an der TU München. Das von ihm in der Lehre vertretene Thema war "Bauschäden in der Praxis". On the 1st April, 2006 the native of Düsseldorf Christoph Gehlen has taken over the W3 professorship "Construction Materials" and the management of the Institute of Construction Materials.

At the same time he became the director of the Materialprüfungsanstalt at the University of Stuttgart, where nowadays approximately 400 employees are working.

In 1966 born, he studied after finished Alternative Service at first Physics / Chemistry in Bonn. Then, in 1989 he changed the place / field of study in order to study civil engineering at the RWTH in Aachen.

After his diploma in 1995 he worked at the RWTH in Aachen in the Institute of Building Materials Research (ibac) for three years as a research assistant in the working group "Reinforced concrete and Reinforcement" which he finally led for 1 year.

For his doctoral thesis written in 2000 about the "Probability-based service life design of reinforced concrete structures" he received several awards ("Readymix-Förderpreis" Concrete 2000; "Rüsch-Forschungspreis" 2001 by the Deutschen Betonverein; "Borchers-Plakette" 2000 of the RWTH Aachen).

From March 2000 on Christoph Gehlen was managing partner for an engineering consultancy in Munich. Since 2003 he was additionally lecturer at the TU Munich until he became University Professor at the University of Stuttgart. At the TU Munich he was responsible for the lecture course "Structural

Forschungsschwerpunkte von Christoph Gehlen sind Dauerhaftigkeit, Life-Cycle-Management von Stahl- und Spannbeton, Korrosionsforschung (einschließlich dazuge-Inspektions-/Überwachungstechnik) höriger und Instandsetzung von Stahlbetonbauten. Ergebnisse dieser Arbeiten wurden in zahlreichen internationalen und deutschsprachigen Veröffentlichungen publiziert.

Neben weiteren, traditionell schon über Jahrzehnte am Institut behandelten Forschungsschwerpunkten werden diese einen zusätzlichen Schwerpunkt in Stuttgart bilden. damage in practice".

The main areas of research of Christoph Gehlen are durability, Life-Cycle-Management of reinforced and prestressed concrete, corrosion research (including techniques for inspection and monitoring) and maintenance of reinforced concrete constructions.

Results of these works were published in numerous international and German-speaking publications.

Beside the research topics, which were traditionally treated at the institute, these new topics will form an additional main focus in Stuttgart.

#### Verzeichnis

1986/1

der bisher in der Schriftenreihe "IWB-Mitteilungen" erschienenen Hefte:

Institutsbericht 1983-1985 Activities

1987/1 Verdrehfähigkeit plastizierter Tragwerksbereiche im Stahlbetonbau, von Peter Langer 1987/2 Jahresbericht 1986 Activities Übertragbarkeit von Werkstoffkennwerten bei Glasfaser-Harz-Verbundstäben, von G. Rehm und 1987/3 B. Schlottke 1988/1 Zum Tragverhalten kunstharzgebundener Glasfaserstäbe im Bereich von Endverankerungen und Rissen in Beton, von Martin Faoro (ISBN 3-9801833-0-0) Einfluß der Stahlkennlinie auf den möglichen Grad der Schnittkraftumlagerung bei Stahlbetontrag-1988/2 werken 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 Querzug-, Schrägzug- und Biegebeanspruchung -Loadbearing Behaviour of Anchor Fastenings under Shear, Combinded 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 Zwangeinwirkung, von Helmut Kreller (ISBN 3-9801833-4-3) Untersuchungen zum Verbundverhalten gerippter Bewehrungsstäbe mit praxisüblicher Betonde-1989/5 ckung, von Rolf Eligehausen, Helmut Kreller, Peter Langer (ISBN 3-9801833-5-1) Jahresbericht 1987-1988 Activities 1989/6 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) 1990/2Tragverhalten 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) 1991/2Jahresbericht 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<br>(ISBN 3-9803044-2-6)   |
|--------|---|
| 1994/2 | Zum Trag- und Verschiebungsverhalten von Kopfbolzen bei zentrischem Zug, von Johannes Fur-<br>che<br>(ISBN 3-9803044-3-4)                                     |
| 1994/3 | Tragverhalten von Metallspreizübeln im ungerissenen und gerissenen Beton bei der Versagensart<br>Herausziehen, von Rolf Lehmann<br>(ISBN 3-9803044-1-8)       |
| 1994/4 | Ein energetisches Materialmodell zur Berechnung des Tragverhaltens von zugbeanspruchtem Be-<br>ton, von Gottfried Sawade<br>(ISBN 3-9803044-4-2)              |
| 1994/5 | Zur bruchmechanischen Modellierung des Kurzzeit-Bruchverhaltens von Holz im Rißöffnungsmo-<br>dus I, von Tino Schatz<br>(ISBN 3-9803044-5-0)                  |
| 1995/1 | Rotationsfähigkeit von plastischen Gelenken im Stahl- und Spannbetonbau, von Longfei Li<br>(ISBN 3-9803044-6-9)   |
| 1995/2 | Maßstabseffekt 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<br>Dinku<br>(ISBN 3-9803044-8-5)                                      |
| 1996/2 | Nachbehandlungsunempfindlicher Hochleistungsbeton, von Silvia Weber<br>(ISBN 3-9803044-9-3)   |
| 1996/3 | Zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetontragwerken unter Betriebsbelastung, von<br>Thomas M. Sippel<br>(ISBN 3-9805102-0-4)                          |
| 1996/4 | Tragverhalten von Ankerschienen ohne Rückhängebewehrung, von Rolf Wohlfahrt<br>(ISBN 3-9805102-1-2)   |
| 1997/1 | Jahresbericht 1996-1997 Activities  |
| 1999/1 | Bemessung von zugbeanspruchten Befestigungen bei Versagensart Spalten des Betons, von<br>Jörg Asmus<br>(ISBN 3-9805102-2-0)                                   |
| 1999/2 | Jahresbericht 1998-1999 Activities  |
| 2000/1 | Ökobilanzierung von Baustoffen am Beispiel des Recyclings von Konstruktionsleichtbeton, von<br>Julian Kümmel<br>(ISBN 3-9805102-4-7)                          |
| 2001/1 | Dichtheit von Heißwasser-Langzeitspeichern aus Hochleistungsbeton, von Martin Jooß<br>(ISBN 3-9805102-3-9)  |
| 2001/2 | Zum Trag- und Rotationsverhalten von Stahlbetontragwerken mit nicht-linearer Schnittgrößenermitt-<br>lung, von Eckhart Fabritius<br>(ISBN 2-9805102-5-5)      |
| 2001/3 | Jahresbericht 2000-2001 Activities  |
| 2001/4 | Brandverhalten von Befestigungen mit großem Randabstand in Beton bei zentrischer Zugbean-<br>spruchung, von Michael Reick<br>(ISBN 3-9805102-6-3)             |
| 2002/1 | Zum Einfluß der Oberflächengestalt von Rippenstählen auf das Trag- und Verformungsverhalten<br>von Stahlbetonbauteilen, von Utz Mayer<br>(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 au 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