

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM



FAKULTÄT FÜR  
BAU- UND UMWELT-  
INGENIEURWISSENSCHAFTEN

RUB

# NEWSLETTER 2019/2

FAKULTÄT FÜR BAU- UND  
UMWELTINGENIEURWISSENSCHAFTEN





**SEHR GEEHRTE LESERIN,  
SEHR GEEHRTER LESER,**

unsere Universität hat sich als Antragstellerin in die Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder eingebracht. Zum dritten Mal war sie antragsberechtigt aufgrund der

erreichten Forschungserfolge, insbesondere zweier Forschungscluster und einer hohen Zahl von Verbundforschungsprojekten, und in die Endrunde eingezogen. Zwar hat die Exzellenzkommission wie stets Anerkennung und Lob für das Erreichte ausgesprochen, jedoch entschieden, dass unsere Universität auch diesmal nicht zu den elf Exzellenzuniversitäten Deutschlands gehört, sondern sich für die Universitäten in Aachen, Berlin, Bonn, Dresden, Hamburg, Heidelberg, Karlsruhe, Konstanz, München und Tübingen entschieden. Unser Rektor, Magnifizenz Schölmerich, kommentierte dies in einem Rundschreiben vom 24. Juli 2019 unmissbar nach der Entscheidung wie folgt: „... Ich begrüße es sehr, dass die Entscheidung der Exzellenzkommission eine wissenschaftsgeleitete war. Das ist ein deutliches und selbstbewusstes Zeichen unseres Wissenschaftssystems angesichts einer weltweit zu beobachtenden Einschränkung der Freiheit von Forschung und Lehre. Wenngleich der Abschluss des Wettbewerbs für uns kein krönender war, so war der gesamte Prozess aber von richtungsweisender Bedeutung. Für unsere gesamte strategische Ausrichtung wie auch für die Region Ruhrgebiet ist es gut, dass wir bis zum Schluss im Rennen waren und uns deutlich profilieren konnten. Wir wissen, dass das Votum in dieser letzten Runde sehr knapp war und wir stolz darauf sein können, was wir in den letzten Jahren in Bochum erreicht haben. Auch ohne die Auszeichnung als Exzellenzuniversität haben wir ein deutliches Signal für die Weiterentwicklung des Ruhrgebiets als Wissensstandort gesetzt. Wir sind nicht nur ein Teil davon, wir sind erheblicher Treiber dieser Entwicklung. Unsere Universität wird auch ohne Exzellenztitel weiter an Bedeutung zu-

nehmen. Ich freue mich darauf und ermutige Sie, diesen Weg mitzugehen. ...“

Die Reakkreditierung unserer Studiengänge steht für 2021 auf dem Plan. Ein wesentlicher Punkt der Vorbereitungen ist die Überarbeitung der verschiedenen Curricula. Hierbei befinden wir uns in einer bildungspolitischen Diskussion. Es ist erklärtes Ziel, noch bessere Chancen unserer Absolventinnen und Absolventen auf dem Arbeitsmarkt, deutlich kürzere Studienzeiten, weniger Studienabbrüche und eine stärkere Internationalisierung des deutschen Hochschulsystems zu erreichen. Es gibt Vorstellungen, dies zum Teil dadurch zu erreichen, dass die Wahlmöglichkeiten der Studierenden erweitert werden, ihre Ausbildung im Baumanagement verstärkt und die Zahl der Prüfungen verringert wird. Dies birgt die Gefahr, die Qualität der Ingenieursausbildung selbst zu verändern. Der Akkreditierungsverbund für Studiengänge des Bauwesens (ASBau) e.V., eine Gemeinschaftsinitiative aus der bauausführenden Wirtschaft, Kammern und berufsständischen Verbänden, Planungsbüros, öffentlichen Arbeitgebern aus Bund, Ländern und Kommunen, dem Fakultätentag für Bauingenieurwesen und Geodäsie (Universitäten), dem Fachbereichstag Bauingenieurwesen (Fachhochschulen) sowie den Bau-Fachschaften, hat Empfehlungen erstellt, an denen sich Akkreditierungsentscheidungen orientieren können, um ein hohes Niveau der Hochschulausbildung im Bauwesen zu erhalten. Wesentlicher Aspekt ist dabei die Sicherung eines MINT-Anteils der Lehrinhalte, d.h. eines Curricularanteils an Modulen aus den Bereichen Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik von mindestens 70%. Dieser Forderung haben sich auch die Ingenieurkammern der Länder angeschlossen. Mit diesem großen Verbund im Rücken, geht auch unsere Fakultät die Aufgabe der Reakkreditierung an.

**MIT BESTEN GRÜSSEN,  
IHR PROF. DR.-ING. RÜDIGER HÖFFER**

# DIE FAKULTÄT GRATULIERT ZUR PROMOTION

- **Dr.-Ing. Zdenek Ziska**  
Stability of a Slurry Supported Tunnel Face Considering Transient Support Mechanism during Excavation in non Cohesive Soils
- **Dr.-Ing. Alexander Buttgerreit** (Bild 1)  
Ansätze für ein Erhaltungsmanagement kommunaler Straßen unter Berücksichtigung des NKF
- **Dr.-Ing. Benjamin Mewes** (Bild 2)  
Application of Machine Learning Enhanced Agent-based Techniques in Hydrology and Water Resource Management
- **Dr.-Ing. Markus Obel** (Bild 3)  
Ein konsekutives probabilistisches Konzept zur Risikobewertung setzungsinduzierter Tragwerksschädigungen
- **Dr.-Ing. Stefan Niewerth** (Bild 4)  
Eine entscheidungstheoretische Erweiterung der Data Envelopment Analysis für die Angebotsbewertung bei öffentlichen Bauaufträgen
- **Dr.-Ing. Abhishek Rawat** (Bild 5)  
Coupled Hydro-mechanical Behavior of Compacted Bentonite-Sand Mixture: Experimental and Numerical Investigations
- **Dr.-Ing. Korbinian Kätzl** (Bild 6)  
Anaerobic Biochar Filtration of Municipal Raw Sewage for Wastewater Reuse
- **Dr.-Ing. Hennig Oppel** (Bild 7)  
Entwicklung eines selbstkalibrierenden Niederschlags-Abfluss-Modells auf Basis der geomorphologischen Einheitsganglinie und Methoden des Machine Learning
- **Dr.-Ing. Heinz Hiegemann** (Bild 8)  
Optimization and Scale Up of Microbial Fuel Cell Technology Towards Municipal Wastewater Treatment Plant Integration
- **Dr.-Ing. Tuan Minh Tran** (Bild 9)  
Thermodynamic Dislocation Theory with Applications in Crystal Plasticity
- **Dr.-Ing. Ahmed Marwan**  
Computational Analysis of Segmental Linings in Mechanized Tunneling



Bild 1: Dr.-Ing. Alexander Buttgerreit



Bild 2: Dr.-Ing. Benjamin Mewes



Bild 3: Dr.-Ing. Markus Obel



Bild 4: Dr.-Ing. Stefan Niewerth



Bild 5: Dr.-Ing. Abhishek Rawat



Bild 6: Dr.-Ing. Korbinian Kätzl



Bild 7: Dr.-Ing. Hennig Oppel



Bild 8: Dr.-Ing. Heinz Hiegemann



Bild 9: Dr.-Ing. Tuan Minh Tran

# NEUES AUS DER FAKULTÄT RÜCKBLICK

## MIT MAUS UND BRAUS: DIE FAKULTÄT ÖFFNET IHRE TÜREN FÜR KLEINE FORSCHERINNEN UND FORSCHER AM MAUSTÜRÖFFNERTAG

Stauende Kinderaugen, geschäftige kleine Hände, hier und da ein ungläubiges "Oaoh": So spannend kann Wissenschaft sein. Zum ersten Mal öffnete die Fakultät ihre Labor- und Werkstatttüren für kleine Forscherinnen und Forscher – mit überwältigender Resonanz.



Bild 1: Willkommen zum Maustag

Ob beim Sturmerzeugen im Windkanal, einer Bootsregatta in der Kipprinne im Hydrologie-Labor oder beim Ausschalen der Lieblingshelden in Beton im Labor des Lehrstuhls für Baustofftechnik: Die Workshop-Angebote boten vielfältige Möglichkeiten zum Mitmachen, Ausprobieren und Untersuchen.



Bild 2: Kinder formen ihre Helden aus Beton

Die daran anschließende Schatzsuche wurde unter dem Dach der PR-Kooperative AllesING! zusammen mit den beiden Nachbarfakultäten Elektrotechnik & Informationstechnik und Maschinenbau ausgerichtet. Die kleinen Besucherinnen und Besucher hatten dabei die Möglichkeit, ihre Lieblingsfilmfiguren aus Beton zu formen, Playmobilmännchen einem Sturm im Windkanal auszusetzen und selbstgebaute Boote auf eine Regatta in der Kipprinne zu schicken. An der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik konnten sie zuschauen, wie die Maus aus dem 3D-Drucker hüpfet und sich ihre eigenen blinkenden Maus-Charaktere löten. Die Maschinenbauer\*innen boten spannende Ansichten unter dem Rasterelektronenmikroskop und Zauberticks mit Büroklammern, die auf wundersame Weise ihre Form zunächst verloren und dann wieder zurückgewannen.



Bild 3: Kleine Forscherinnen und Forscher beim Bau einer Brücke

Der Maus-Türöffner-Tag findet bundesweit jährlich am 3. Oktober statt. Neugierige kleine und große Mausfans haben dann die Chance, hinter die Türen von Einrichtungen zu schauen, die sonst verschlossen sind, und dabei spannende Sachgeschichten live zu erleben. Nach diesem Erfolg werden die Türen unserer Fakultät im kommenden Jahr sicherlich erneut geöffnet werden.

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## INSTUDIES - RESSOURCENEFFIZIENTES BAUEN - FACHSCHAFT UTRM

### ZWEI UTRM-STUDIERENDE RUFEN INTERDISZIPLINÄRE RINGVORLESUNG „NACHHALTIGES BAUEN UND WOHNEN AUF KLEINEM RAUM AM BEISPIEL EINES TINY HOUSES“ INS LEBEN

Das Thema Wohnen betrifft jeden Menschen jeden Tag auf unterschiedliche Weise. In den letzten 50 Jahren hat sich der durchschnittliche Wohnraum in Deutschland pro Kopf von ca. 20m<sup>2</sup> auf über 40m<sup>2</sup> verdoppelt. Aus ökologischer Sicht bringt dies viele Probleme mit sich. Erhöhter Ressourcen- und Energieverbrauch sowie zunehmende Flächenversiegelung sind nur einige der zu nennenden Schlagworte. Das Prinzip des ständigen Wachstums ist in vielen Köpfen als selbstverständlich verankert. In den letzten Jahren haben sich aber Bewegungen entwickelt, diesem Trend des Konsums entgegenzuwirken und sich mit Effizienz-, Suffizienz- und Konsistenzgedanken zu beschäftigen. Die Reduzierung auf das Wesentliche und der effiziente Umgang mit Ressourcen spielen dabei eine zentrale Rolle. Gerade der Bau- und Wohnsektor bietet enormes Verbesserungspotential bei effizienten Raumnutzungskonzepten und dem Gebrauch von nachhaltigen sowie recycelfähigen Materialien.



Bild 1: Vorderseite des Veranstaltungsflyers der Ringvorlesung

Um dieses spannende Thema an die Uni zu bringen haben Ulrike Emonds und Marvin Nöller (Master-Studierende Umwelttechnik und Ressourcenmanagement) die interdisziplinäre Ringvorlesung „Nachhaltiges Bauen und Wohnen auf kleinem Raum am Beispiel eines Tiny Houses“ konzipiert, die im Sommersemester 2019 angeboten wurde. Das studentische Initiativ-Projekt wird auch bei der Fortsetzung im neuen Semester von InSTUDIES unterstützt.

Jede Woche wurde das heterogene Publikum mit spannenden Vorträgen ausgewählter ExpertInnen versorgt. Hier eine Auflistung der Themen:

- Projektablauf, Planungsschritte eines Tiny Houses
- Platzsparende Möbelgestaltung
- Leben auf kleinem Wohnraum: Psychologische Aspekte in kulturvergleichender Perspektive
- Domo Parva. Das kleine Haus in der Geschichte
- Nachhaltige Bau- und Dämmmaterialien und Materialrecycling
- Baubiologie und Raumklima
- Tiny Houses in der Städteplanung
- Weiche Kriterien zur Wohnstandortwahl in Verbindung mit Baurecht
- Flächeninanspruchnahme und Flächenversiegelung: Ursachen, Auswirkungen und Monitoring
- Energiekreisläufe in nachhaltigen Wohnmöglichkeiten
- Finanzierungsmöglichkeiten eines Tiny Houses und Erfahrungsbericht eines Tiny House Bewohners
- Vom Konzept zum plastischen Modell

Ergänzend zum Vortragsangebot wurden auch drei Exkursionen angeboten. Auf den Besuch einer Tiny House-Schreinerei in Hamm folgte ein sehr schönes Erleben gemeinschaftlichen Wohnens im Öko-Dorf Aardehuis in den Niederlanden. Abgerundet wurde das Angebot durch die Besichtigung des Forschungs-Tiny Houses „Tiny-Lab“ der DEZENTRALE aus Dortmund.

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## INSTUDIES - RESSOURCENEFFIZIENTES BAUEN - FACHSCHAFT UTRM



Bild 2: Exkursionsziel Öko-Dorf Aardehuis (NL)

Zwanzig Studierenden wurde außerdem die Möglichkeit gegeben, eine Prüfung abzulegen, um dieses Modul mit 3 Credit Points in ihr Curriculum zu integrieren. Die Studierenden fanden sich in Kleingruppen zusammen, um sich gemeinsam ein möglichst nachhaltiges Bau- und Wohnkonzept zu überlegen. Die Prüfungsleistung war die Vorstellung dieser Wohnkonzepte in schriftlicher Form und die Präsentation anhand selbst gebauter Modelle im Maßstab 1:20. Um den Studierenden eine gute Grundlage für den Modellbau zu bieten, wurden Workshops zum Umgang mit 3D-Druckern und Lasercuttern sowie spezielle Modellbauworkshops angeboten. Das „Makerforum“ im UFO bot den Modellbauern eine perfekte Kreativumgebung mit allen nötigen Ressourcen.

Die Veranstaltungsreihe war ein voller Erfolg und wurde am 30. Juli 2019 am Modellpräsentationstag zu einem schönen Abschluss gebracht. Nachdem die Studierenden unter Prüfungsbedingungen ihre Konzepte mit Hilfe eines visuellen Vortrags im Makerforum vorgestellt haben, ging es danach in lockerer Runde weiter und bei Pizza, Obst und Getränken konnten interessierte Besucherinnen und Besucher ihre Fragen zu den Modellen und den Wohnkonzepten direkt an die Studierenden richten.

Im Laufe der Modellbauphase sind sechs schöne Modelle entstanden, von denen fünf vor der Bibliothek im IC- Gebäude (Ebene 04) öffentlich begutachtet werden können.



Bild 3: Schiffscontainerhaus aus Recyclingmaterialien



Bild 4: Ausbau eines vorhandenen Bauwagens zu einem 1-Personen Tiny House



Bild 5: Häuslein wechselt dich – Das kleine Haus auf einer Wechselbrücke

## NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

### INSTUDIES - RESSOURCENEFFIZIENTES BAUEN - FACHSCHAFT UTRM

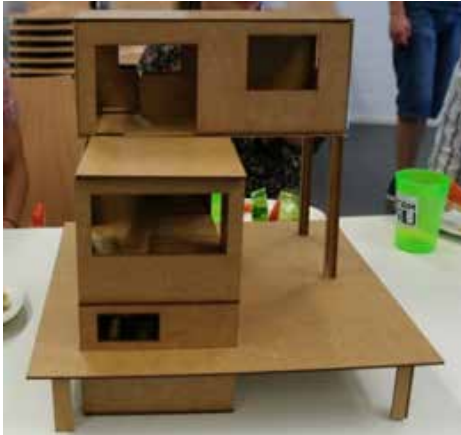


Bild 6: Wohnen und Leben auf kleinem Raum in einer Gemeinschaftssiedlung



Bild 7: Modellprojekt Tiny House Village in Minden als Reallabor für unterschiedliche Bauweisen – Schilf-Lehm-Wand

Projektpartner des studentischen Forschungsprojekts „Tiny House“ sind:

- Lehrstuhl für Ressourceneffizientes Bauen
- Nachhaltigkeitsforum
- InSTUDIES
- Projektbüro für Bauen und Umwelt
- Worldfactory – Makerforum
- Fachschaft UTRM

Ab dem Wintersemester 2019/20 geht das Projekt in die nächste Runde. Ziel ist es, zusammen mit einem interdisziplinären Team aus Studierenden und Interessierten einen Entwurfsplan für eine möglichst nachhaltige und effiziente Wohnform zu entwickeln.

Der aktuelle Projektstatus lässt sich auf <https://nachhaltigkeitsforum.wordpress.com> verfolgen. Fragen und Anregungen zu dem Projekt können über die Mailadresse [tinyhouse-nhf@rub.de](mailto:tinyhouse-nhf@rub.de) an die ProjektkoordinatorInnen weitergeleitet werden.

## NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

### RESSOURCENEFFIZIENTES BAUEN

#### LEITLINIE ZUR VEREINFACHUNG DER PLANUNG UND DURCHFÜHRUNG VON AUFSTOCKUNGS-/ERWEITERUNGSMASSNAHMEN ALS NACHVERDICHTUNGSMASSNAHME IN INNERSTÄDTISCHEN BEREICHEN

Das Forschungsvorhaben „Leitlinie zur Vereinfachung der Planung und Durchführung von

Aufstockungs-/Erweiterungsmaßnahmen als Nachverdichtungsmaßnahme in innerstädtischen Bereichen“ wurde am Lehrstuhl Ressourceneffizientes Bauen erfolgreich abgeschlossen. Neben der Ruhr-Universität Bochum waren die Technische Universität Braunschweig, Institut für Baukonstruktion und Holzbau, die Techni-

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## RESSOURCENEFFIZIENTES BAUEN

sche Universität München, Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion, sowie Wohnungsbaun-ternehmen aus Braunschweig, Frankfurt und Bo-chum (VBW Bauen und Wohnen GmbH) betei-ligt. Projektträger war die Initiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raum-forschung (BBSR).

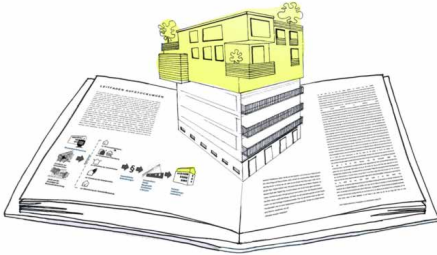


Bild 1: Schematische Darstellung des Leitfadens

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, das Potential von baulichen Maßnahmen der Aufstockung als innerstädtische Nachverdichtungsmaßnahme durch die Verringerung des Planungsaufwands signifikant zu erhöhen. Hierzu wurde ein Leitfaden erarbeitet, der wesentliche Indikatoren und Parameter, die für eine umfassende Bewertung einer Aufstockungsmaßnahme im Kontext des Bestandsgebäudes notwendig sind, einschließt. Des Weiteren wurden Lösungsvorschläge für identifizierte Problemstellungen

in der Aufstockungsplanung gegeben, die als Orientierungshilfe zu sehen sind. Der Leitfaden soll planenden Architektinnen und Architekten sowie Ingenieurinnen und Ingenieuren ein Werkzeug für die Planung und Umsetzung urbaner Nachverdichtungsmaßnahmen zur Verfügung stellen.

Aus Sicht der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit bieten Aufstockungsmaßnahmen die Möglichkeit, innerstädtischen Wohnraum ohne weitere Flächenversiegelung zu schaffen und bestehende Gebäudestrukturen weiter zu nutzen. Darüber hinaus findet häufig im Zuge der Aufstockung eine Sanierung der Bestandsgebäude statt, was zu Energieeinsparungen führt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Systematik zur Erstellung von ökologischen Bilanzierungen von Aufstockungsmaßnahmen erstellt, sowie ein Überblick über das Vorkommen und den Umgang mit Schadstoffen in verschiedenen Baualterklassen gegeben.

Neben diesen Themen wurden innerhalb des Forschungsprojekts hauptsächlich die Untersuchung von Bestandstragwerken, baurechtliche Aspekte von Aufstockungen, Brandschutzkonzepte sowie die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Aufstockungsmaßnahmen bearbeitet.

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## UMWELTECHNIK UND ÖKOLOGIE IM BAUWESEN

### KAWATECH SOLUTIONS – LÖSUNGEN FÜR DIE WASSERVERSORGUNG IN EINEM WASSERMANGELGEBIET IN VIETNAM

U+Ö im Bauwesen trägt im Rahmen des BMBF-geförderten FuE-Vorhabens KaWa-Tech Solutions zur Verbesserung der Wasserversorgung im UNESCO-Geopark Dong-Van im Norden Vietnams bei. Es handelt sich um ein Projekt mit einer

technischen Komponente zur Wasserförderung und -verteilung und einer planerischen Komponente zur Ermittlung des heutigen und zukünftigen Wasserbedarfes und zum Gewässerschutz.

Der UNESCO-Geopark Dong Van auf dem Dong Van Karst Plateau im Norden Vietnams (Provinz Ha Giang) ist ein extrem wasserarmes Karstge-



# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## RESSOURCENEFFIZIENTES BAUEN

biet. Der größte Teil des jährlichen Niederschlags fällt in drei bis vier Sommermonaten, versickert überwiegend und fließt unterirdisch im Karst ab.

Die ursprüngliche Lebensweise dortiger ethnischer Minderheiten war leidlich an die schwierigen Bedingungen im Karstgebiet angepasst. Heute aber entstehen moderne Siedlungen und Verkehrswege; die Bevölkerungszahlen nehmen zu; der Tourismus im landschaftlich beeindruckenden Geopark Dong Van wächst rapide. Diese Entwicklung erfordert eine, trotz der ungünstigen Verhältnisse im Karst, ganzjährig quantitativ und qualitativ ausreichende und sichere Wasserversorgung.



Bild 1: Karstkegel im UNESCO-Geopark Dong Van

Ziel des FuE-Vorhabens KaWaTech Solutions ist die Entwicklung und Errichtung einer innovativen und effizienten Pilotanlage für die Wasserversorgung in Dong Van als Vorbild für vietnamesische Nachfolgeprojekte. Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) hat dafür die technische Komponente entwickelt: eine Wasserförderung mit Hilfe von Wasserkraft aus dem tief eingeschnittenen Tal des ganzjährig wasserführenden Seo Ho Flusses zur Wasserverteilung in einen Hochbehälter.

U+Ö hat als planerische Komponente den heutigen und zukünftigen Wasserbedarf ermittelt und

Konzepte zum Gewässerschutz entwickelt; beides in Form eines GIS-basierten wasserwirtschaftlichen Informationssystems. Hierfür erfolgte die Kartierung und Bewertung potentieller Schadstoffquellen, der Verletzlichkeit der Wasserressourcen und die Ermittlung des Kontaminationsrisikos für die Wasserressourcen. Aus den Ergebnissen lassen sich auch geeignete Wasserschutzmaßnahmen ableiten.



Bild 2: Montage der Wasserförderanlage durch KIT-Mitarbeiter (Quelle: KIT)

Ende Oktober 2019 fand in Anwesenheit von Vertretern des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und des vietnamesischen Ministerium für Wissenschaft und Technologie (MOST) die feierliche Einweihung der neu errichteten Anlage zur Wasserförderung und -verteilung statt.

Forschungspartner im FuE-Vorhaben KaWaTech Solutions sind:

- RUB U+Ö Umwelttechnik und Ökologie im Bauwesen
- KIT Karlsruher Institut für Technologie (IWG Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, AGW Institut für Angewandte Geowissenschaften, IMB Institut für Massivbau und Baustofftechnologie), die Projektkoordination liegt beim KIT (Prof. Dr. Nestmann)
- Außerdem sind Firmen für Pumptechnik, Geotechnik, Datenverarbeitung usw. beteiligt

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## UMWELTECHNIK UND ÖKOLOGIE IM BAUWESEN

U+Ö ist seit 20 Jahren mit zahlreichen FuE-Projekten in Vietnam tätig und kooperiert dort mit dem Wissenschaftsministerium (MOST), dem

Planungsministerium (MPI), dem Umweltministerium (MONRE) und den wichtigen wasserwirtschaftlichen Forschungseinrichtungen.

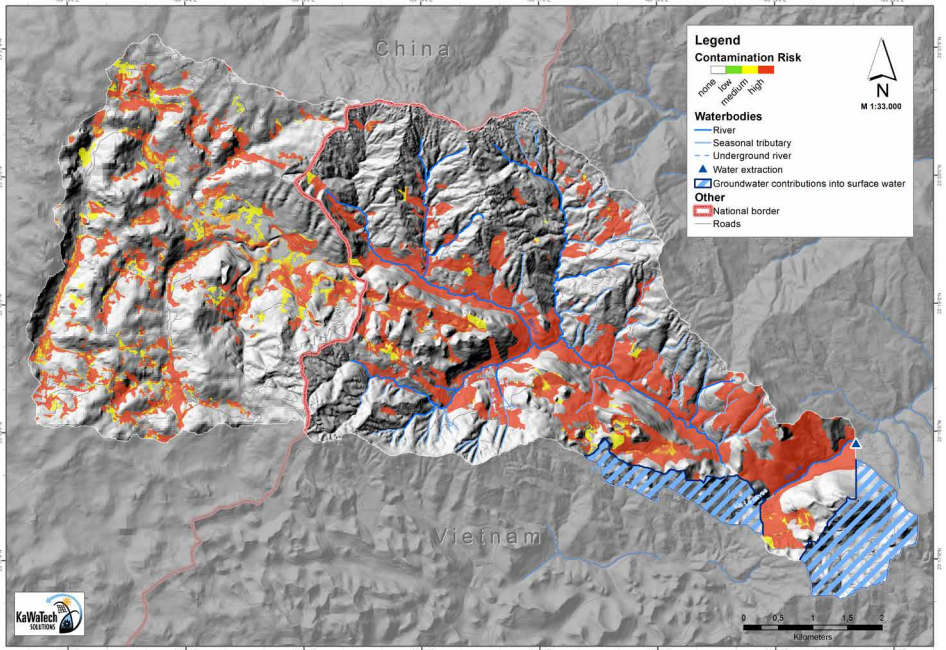


Bild 3: Kontaminationsrisiko für Oberflächengewässer im Einzugsgebiet der Wasserentnahme am Seo Ho Fluss durch die Landwirtschaft

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## TUNNELBAU, LEITUNGSBAU UND BAUBETRIEB

### KOINOR – KONZEPTE ZUR BRANDSCHUTZTECHNISCHEN ERTÜCHTIGUNG UND NACHRÜSTUNG UNTERIRDISCHER VERKEHRSBAUWERKE

Der Tunnelbauwerksbestand in Deutschland ist einerseits von einer Überalterung geprägt, andererseits entsprechen die Bauwerke nicht mehr den zum Teil mehrfach novellierten Richtlinien

der Gesetzgeber. Dies kann zu einer erheblichen Anhebung der Anforderungen an die betriebliche Sicherheit, die Dauerhaftigkeit, die Widerstandsfähigkeit oder den baulichen Brandschutz führen.

Daher werden im Rahmen des Forschungsprojektes KOINOR verkehrsträgerspezifische Konzep-

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN TUNNELBAU, LEITUNGSBAU UND BAUBETRIEB

te und Verfahren zur brandschutztechnischen Ertüchtigung und Nachrüstung unterirdischer Verkehrsbauwerke erarbeitet. Zentraler Fokus ist dabei die Entwicklung eines neuen spritzbaren Instandhaltungssystems für Tunnelschalen auf der Basis eines Geopolymerbetons, mit dessen Hilfe die Synergie zwischen Instandhaltung und brandschutztechnischer Instandsetzung realisiert werden kann. Gleichzeitig sollen ökonomische, operative, verfahrenstechnische und baustofftechnische Optimierungspotentiale ausgeschöpft werden.

Bei KOINOR handelt es sich um ein für drei Jahre gefördertes Projekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms „Forschung für die zivile Sicherheit“; es ist ein gemeinsames Forschungsprojekt folgender Verbundpartner (Bild 1, links): Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum (TLB), Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen (STUVA), MC-Bauchemie und PORR Deutschland. In enger Abstimmung mit den assoziierten Partnern (Bild 1, rechts) Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Hamburger Hochbahn AG, Eisenbahnbundesamt (EBA), der DB Engineering und Consulting und der DB Netz AG, wird an einer möglichst universell einsetzbaren, flexiblen und normkonformen Lösung geforscht.

Für die Entwicklung eines Instandhaltungssystems wurden zunächst die regelwerksbezogenen Anforderungen an den konstruktiven Brandschutz und die Dauerhaftigkeit sowie die bautechnischen Anforderungen und Randbedingungen in ein gesamtheitliches Anforderungsprofil integriert. Das Anforderungsprofil gilt somit als Leitfaden und definiert die grundsätzlichen Ansprüche an die zu konzipierende Baustofftechnik und Bauverfahrenstechnik. Des Weiteren wurden die Anforderungskriterien jedes Verkehrsträgers bezüglich Konstruktion, konstruktivem Brandschutz sowie Standsicherheit und Einwirkungen zusammengefasst und die Anforderungen an das Lichtraumprofil und den Innenausbau gegenübergestellt. Als Ergebnis aus dem Anforderungsprofil und aus dem Adaptionpotential resultiert je ein System für die Instandsetzung und die bauliche Verbesserung, welches sowohl im Trocken- als auch im Nassstrom auszuführen sein soll.

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass ein Geopolymerbeton gute Materialeigenschaften hinsichtlich seiner verringerten Abplatzungsneigung aufweist. Daher erfolgt die Entwicklung einer zementfreien Basisrezeptur, welche für erste Untersuchungen anhand verschiedener Ausgangsstoffe sowie derer Zusammensetzung variiert und hinsichtlich spezifischer Kenngrößen wie Druck- und Biegezugfestigkeit getestet wird. Dabei erfolgt die Entwicklung mit zunehmendem Untersuchungsumfang von kleinformatischen hin zu großformatigen Probekörpern. Auf diese Weise werden passende Rezepturen in sukzessiven Schritten weiterentwickelt. Als Ausgangspunkt dienen dabei zunächst Untersuchungen zum Verhalten unter Temperatureinwirkung an kleinformatischen Probekörpern. Das Verhalten der unterschiedlichen Rezepturvariationen unter normativer Brandlast in einem Muffelofen wurde dabei an der RUB in Tastversuchen ermittelt. Unter der Temperatureinwirkung sind die Probekörper gesintert, teilweise wurde das Eutektikum erreicht und die Probekörper begannen zu



Bild 1: Projektpartner (links) und assoziierte Partner (rechts)

## NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN TUNNELBAU, LEITUNGSBAU UND BAUBETRIEB

fließen. Die Betonrezeptur mit dem für den Anwendungsfall günstigsten Materialverhalten wird für weitere Untersuchungen genutzt (Bild 2).



Bild 2: Probekörper nach Temperaturbeaufschlagung

Da eine gespritzte Applikation des zu entwickelnden Baustoffs vorgegeben ist, wurden manuell gesteuerte Spritzversuche am TLB-Spritzbetonstand durchgeführt, wobei die Konzeptionierung der Maschinenteknik bereits das Ziel einer möglichst platzsparenden als auch flexiblen Einsatzmöglichkeit berücksichtigte. Die ersten Erkenntnisse waren eine gute Pumpfähigkeit der ausgewählten Rezeptur im Trockenspritzverfahren. Im Endergebnis konnte ein homogenes Spritzbild (Bild 3) erzeugt werden, welches auch im Bereich größerer Schichtdicken ein gutes Haftverbundverhalten auf der verwendeten Holzpalette aufzeigte.



Bild 3: Spritzbetonapplikation im Spritzbetonversuchsstand

Für die nächste Projektphase sind zum einen die Weiterentwicklung der Rezepturen und zum anderen die Optimierung der Verfahrenstechnik zur Herstellung des spritzbaren Instandsetzungssystems geplant. Der spritzbare Geopolymerbeton wird bspw. hinsichtlich seiner Wärmeleitfähigkeit untersucht, indem Probekörper mit integrierten Thermoelementen hergestellt und unter der normativen Bemessungsbrandlast geprüft werden. Auf der gewonnenen Ergebnisgrundlage werden gegebenenfalls erforderliche Anpassungen der Rezeptur zur Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit durchgeführt.

## NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN BAUSTOFFTECHNIK

### INSTANDSETZUNG VON GESCHÄDIGTEN BETONFAHRBAHNDECKEN MIT CARBONBEWEHRTEM BETON

In Deutschland werden Betonfahrbahndecken i.d.R. unbewehrt ausgeführt. Zur Vermeidung einer wilden Rissbildung, hervorgerufen durch Zwangsspannungen aus behinderten hygrischen und thermischen Verformungen, werden gezielt Querscheinfugen als Sollbruchstellen geschnitten (siehe Abb. 1). Diese Fugen stellen allerdings eine maßgebliche Schwachstelle dar und erfordern eine kontinuierliche Wartung und Instandhaltung.

Ziel eines derzeit am Lehrstuhl für Baustofftechnik laufenden Forschungsprojekts ist es, eine Instandsetzungsmethode für Betonfahrbahndecken zu entwickeln, die es ermöglicht nur den (geschädigten) Oberbeton zu erneuern und dabei den intakten Unterbeton fugenlos zu überbauen. Bisher werden Betonfahrbahndecken meist durch einen Tiefeinbau komplett erneuert. Zwar haben fugenlose Betonfahrbahndecken mit durchgehender Längsbewehrung (s. Bild 2, links) in mehreren Praxisversuchen ein gutes Gebrauchsverhalten gezeigt, ein adaptiver Einsatz

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## BAUSTOFFTECHNIK



Bild 1: Einschneiden von Längs- und Querfugen (links), Querfuge in junger Betonfahrbahndecke mit Riss (rechts)

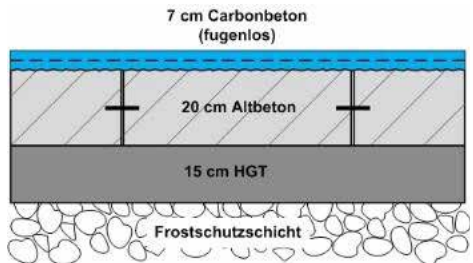
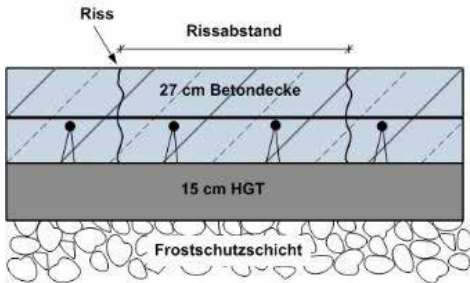


Bild 2: Prinzipskizze durchgehend bewehrte Betonfahrbahndecke (Quelle: [www.beton.org](http://www.beton.org)) (links), Prinzipskizze Instandsetzung mittels fugenloser Carbonbetonschicht (rechts)

für dünnere Instandsetzungen von nur rd. 3 bis 7 cm Stärke (s. Bild 2, rechts), wie sie hier angestrebt werden, lässt sich so aber allein aus Korrosionsschutzgründen nicht realisieren. Um die Anforderungen an die Dicke der Instandsetzungsschicht, den Korrosionsschutz und das Rissbildungsverhalten zu gewährleisten, kommt hier Carbonbeton zum Einsatz. Dieser wird anstatt mit der üblichen Stahlbewehrung mit Bewehrungsmatten aus Carbonfilamenten (Rovings) bewehrt (s. Bild 3). Da für Carbon im Gegensatz zu Stahl, auf Grund seiner chemischen Eigenschaften, für die üblichen Beanspruchungen im Bauwesen keine Korrosionsgefahr besteht, kann die Betondeckung auf wenige Millimeter reduziert werden.

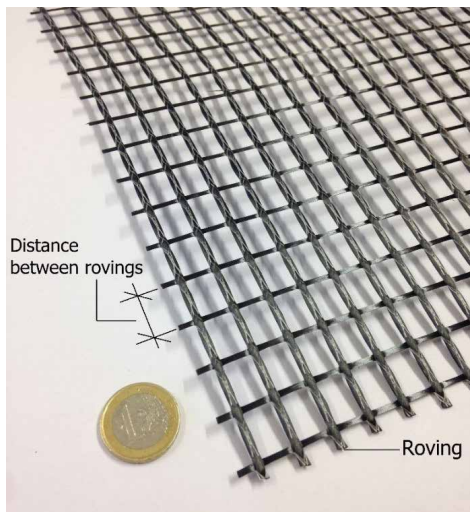


Bild 3: Beispiel für ein Carbontextil

Im Rahmen des C3-Projekts, gefördert durch das BMBF, wird in Zusammenarbeit mit dem Institut

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN BAUSTOFFTECHNIK

für Massivbau der TU Dresden in zwei Teilprojekten zum einen das Verbundverhalten zwischen dem neuen Carbonbeton und dem darunterliegenden Altbeton unter Ermüdungsbeanspruchung untersucht. Zum anderen stehen Untersuchungen und Modellierungen der Rissentwicklung und -verteilung des Verbundwerkstoffes Carbonbeton unter den spezifischen Beanspruchungen einer Betonfahrbahn im Fokus des Projekts. Im ersten Schritt werden zunächst sowohl die Frischals auch die Festbetoneigenschaften eines herkömmlichen Waschbetons für Betonfahrbahndecken auf die Verwendung im Carbonbeton abgestimmt und ein geeignetes Carbondtextil ausgewählt. Im nächsten Schritt werden Verbundbalken hergestellt, welche aus einem (alten) Straßenunterbeton und einer aufbetonierten Carbonbetonschicht (Neubeton) bestehen (s. Bild 4).

Diese werden zyklischen Biegebeanspruchung unterzogen, die den überrollenden Verkehr in situ simulieren. Nachfolgend wird das Verbundverhalten zwischen Straßen- und Carbonbeton sowie zwischen der Carbonbewehrung und dem Beton untersucht. Außerdem wird in statischen Biegezugversuchen das Auszugverhalten des Carbontextils und das Nachbruchverhalten des Carbonbetons ermittelt. Im zweiten Teilprojekt werden die entscheidenden Materialeigenschaften des Carbonbetons bestimmt (Zugfestigkeit, Verbundverhalten, Übergreifungslängen, etc.). Diese dienen unter anderem als Eingangswerte für die Entwicklung eines Rechentools zur Berechnung der Verbundspannung-Schlupf-Beziehung, Verankerungslängen, Rissabständen und -breiten. Die Untersuchungen in beiden Teilprojekten sind derzeit in Bearbeitung.

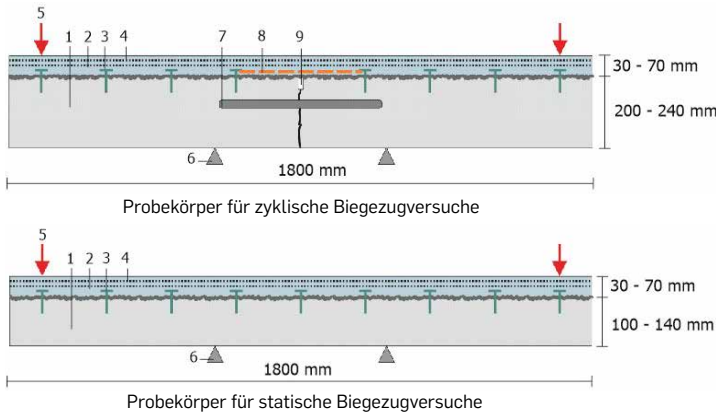


Bild 4: Verbundbalken für zyklische und statische Biegezugversuche; 1 Altbeton (Straßenbeton), 2 Carbonbetonschicht, 3 Verbunddübel, 4 Carbonbewehrung, 5 Lastangriffspunkt, 6 Auflager, 7 Straßbaudübel, 8 Verbundtrennung, 9 Querfuge

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN MASSIVBAU

## OPTIMIERTE HYBRIDE TÜBBINGSYSTEME FÜR EINEN DAUERHAFTEN UND ROBUSTEN TUNNELAUSBAU

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 837 „Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau“ an der Ruhr-Universität Bochum wird derzeit am Lehrstuhl für Massivbau die ganzheitliche Verbesserung eines mehrschaligen Tunnelausbaus mit Tübbings im Hinblick auf Sicherheit, Dauerhaftigkeit und Robustheit angestrebt.

„Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau“ an der Ruhr-Universität Bochum wird derzeit am Lehrstuhl für Massivbau die ganzheitliche Verbesserung eines mehrschaligen Tunnelausbaus mit Tübbings im Hinblick auf Sicherheit, Dauerhaftigkeit und Robustheit angestrebt.

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN MASSIVBAU

Ziel ist es, die bislang im SFB 837 erarbeiteten Methoden und Elemente bei Tübbings weiterzuentwickeln. Geplant ist die Nutzung von Systemen für den Einsatz in Störzonen mit erhöhten Gebirgsverformungen, die aus trag- und verformungsfähigen Schichten bestehen. Letztere (Weichschicht) stellt ein plastisches Stauchungsverhalten bei einwirkendem Gebirgsdruck sicher, was durch eine hohe Porigkeit der Gesteinskörnung bzw. der Zusatzstoffe und der Zementmatrix ermöglicht wird. Die erreichten Verbesserungen sollen gegenüber klassischen Konzepten und prototypischen Gesamtbauteilen experimentell validiert werden, wobei das Ziel eine weitgehende Reduktion des tragenden Tübbingquerschnitts ist.

Methodisch werden hybride, topologische Optimierungsverfahren genutzt, in denen die globale Strukturfindung durch die Minimierung der Nachgiebigkeit erfolgt. Ausgangspunkt bilden Kombinationen von jeweils zugehörigen last- bzw. verformungsinduzierten Beanspruchungen des Rings, der Querkraftkopplungen, von Pressenansatzpunkten und Ringfugen. Hier hat sich eine topologische Optimierung mit linear-elastischem Materialverhalten bei ebenen Problemen als geeignet erwiesen. Tatsächlich herrschen in Tübbings dreidimensionale Verteilungen der Hauptspannungen vor, sodass die Methodik zu einem räumlichen Ansatz erweitert werden soll. Bild 1 zeigt dies exemplarisch am Beispiel eines

„L-Cantilever“ Balkens, getrennt für Kontinuums- und Stabwerkselemente. Vorgesehen ist es, beide Ansätze in einer einzigen Implementierung zu kombinieren, was den Entwurf komplexerer Bewehrungskonzepte erlaubt. Dafür wird der geometrische Raum sowohl mit Kontinuums- (Beton) als auch mit Stabwerkselementen (Stahl) diskretisiert. Mit einer geeigneten Bestrafung innerhalb des Lösungsalgorithmus wird das Design so gesteuert, dass materialspezifisch Beton ausschließlich unter Druck beansprucht wird und Stahl nur Zugkräfte aufnimmt.

Zur experimentellen Verifikation der strukturoptimierten Tübbings wird ein Großversuchsstand mit zweiachsiger Laststeuerung entwickelt, der kombinierte Beanspruchungsszenarien an den Flanken und den Längsfugen erlaubt (s. Bild 2). Darin werden prototypische Tübbings bzgl. ihrer Tragfähigkeit und die Weichschichten mit kompressiblem Material auf ihre Verformungseigenschaften im halbertechnischen Maßstab unter realistischen Einbaubedingungen bis zum Versagen getestet. Die Umsetzung erfolgt auf dem Spannungsfeld der Versuchshallen KIBKON.

Ziel ist die Analyse und Bewertung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der strukturoptimierten Prototypen im Vergleich zu herkömmlichen Tübbings unter Berücksichtigung der Biege-Normalkraftinteraktion. Momenten-

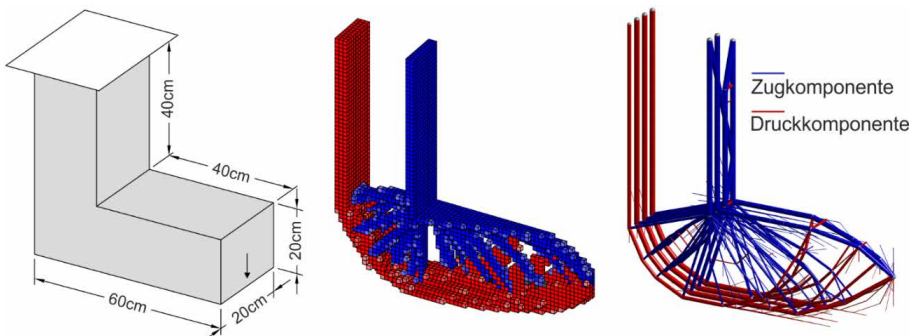


Bild 1: Kontinuums- (mitte) und Stabwerksoptimierungslösung (rechts) für einen „L-Cantilever“ Balken (links)

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## MASSIVBAU

Normalkraft-Verhältnisse ( $M/N$ ) sollen im Versuch aktiv steuerbar sein und nicht von starren Lagerungsverhältnissen abhängen, so dass angesteuerte Hydraulikzylinder sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung genutzt werden. Damit werden die Bettungsreaktion des Bodens und Normalkräfte im Tübbing simuliert, die aus dem Kontakt mit angrenzenden Elementen resultieren. In Vertikalrichtung sind Großzylinder mit Kapazität von jeweils 3 MN bzw. 2,5 MN vorgesehen, und in Horizontalrichtung ein Großzylinder von 5 MN, so dass Ringnormalkräfte bis ca. 6 MN

möglich sind. Die Tübbings sollen Abmessungen bis zu 0,75 m in der Breite und Dicken bis 0,25 m aufweisen. Vertikallasten werden an acht Punkten der Tübbingaußenseite eingeleitet, um die real flächige Beanspruchung zu simulieren.

Die Umsetzung der flächigen Lasteinleitung erfolgt mittels übereinander angeordneter Stahlträger (s. Bild 2). Die einzelnen Komponenten sind zu entwerfen, zu bemessen und konstruktiv durchzubilden, was auch die kraftgeregelte Zylinderkopplung einschließt.

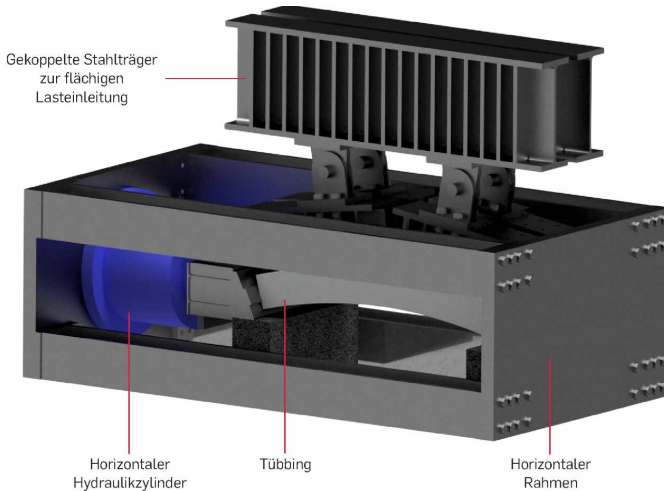


Bild 2: Visualisierung des geplanten Großversuchsstands für die experimentelle Untersuchung von Tübbings im halbertechnischen Maßstab

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## HIGH PERFORMANCE COMPUTING - KONTINUUMSMECHANIK

### DIE HPC-ARBEITSGRUPPE INTENSIVIERT IHRE KOOPERATION MIT DEM LEHRSTUHL FÜR KONTINUUMSMECHANIK

Finite-Elemente-Simulationen von partiellen Differentialgleichungen resultieren in großen Gleichungssystemen, deren Lösung den signifikanten Teil der Rechenzeit darstellt. Das sogenannte Mehrgitterverfahren bietet zur Lösung

eine besonders schnelle und effiziente Methodik an, bei der iterativ und unter zur Hilfenahme von gröberen Netzauflösungen die gesuchte Lösung auf die gewünschte Genauigkeit approximiert wird. Insbesondere ist hierbei die Anzahl der notwendigen Iterationsschritte bis zum Finden der Lösung eines Gleichungssystems unabhängig von der Anzahl der Unbekannten und



# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## HIGH PERFORMANCE COMPUTING - KONTINUUMSMECHANIK

lässt sich damit bei Problemstellungen beliebiger Größe anwenden.

Jun.-Prof. Andreas Vogel, Leiter der Arbeitsgruppe HPC, hat ein Finite-Elemente-Programm entwickelt, welches Mehrgitterverfahren als Löser zur Verfügung stellt und zusätzlich sowohl die Zeit als auch den Ort adaptiv auflösen kann, um eine weitere Ersparnis an Rechenzeit gewinnen zu können (Schrittweitenkontrolle sowie Netzverfeinerung und -vergrößerung). Daher bietet sich dieses Programm in besonderer Weise zur Lösung von Problemen aus dem Ingenieurwesen an, die eine hohe zeit- als auch räumliche Lokalisation der physikalischen Phänomene aufweisen. Die Simulation von Schädigungsprozessen ist eine solche Problemstellung und zur effizienten Simulation dieser Prozesse hat sich innerhalb der letzten Monate eine intensive Kooperation von Jun.-Prof. Vogel mit PD Dr.-Ing. Philipp Junker aus dem Lehrstuhl für Kontinuumsmechanik entwickelt.

Schädigungsmodelle benötigen eine spezielle Behandlung, um Ergebnisse erzielen zu können, die unabhängig vom konkret gewählten Finite-Elemente-Netz sind. Hier können sogenannte Gradientenerweiterungen das Problem regularisie-

ren, sodass die Netzweite kein unphysikalischer Modellparameter wird. Basierend auf den Modellen von Dr. Junker wurden in dieser Kooperation verbesserte numerische Algorithmen entwickelt und in das Finite-Elemente-Programm von Jun.-Prof. Vogel implementiert.

Für die Modellierung der Schädigung können nun erstmals extreme Entfestigungen, wie sie bei spröden Materialien auftreten, stetig und robust abgebildet und simuliert werden (s. Bild 1). Hierdurch kann der Einfluss des Regularisierungsparameters  $\beta$  studiert werden, der den Gradiententerm bestraft und Einfluss auf die minimal darstellbaren Strukturen hat. Die Kurven konvergieren dabei für unterschiedlich starke adaptive Netzverfeinerungen, angegeben durch den Parameter  $L_{max}$ , und die adaptive numerische Behandlung erlaubt es, den Kraftabfall im Kraft-Verformungs-Diagramm sehr scharf abbilden zu können. Bild 2 zeigt zu ausgewählten Zeitpunkten die korrespondierende Verteilung der Schädigung auf dem zerreißenden Bauteil. Die große numerische Robustheit des Modells von Jun.-Prof. Vogel und Dr. Junker zeigt sich auch durch die symmetrischen Ergebnisse für symmetrische Randwertprobleme.

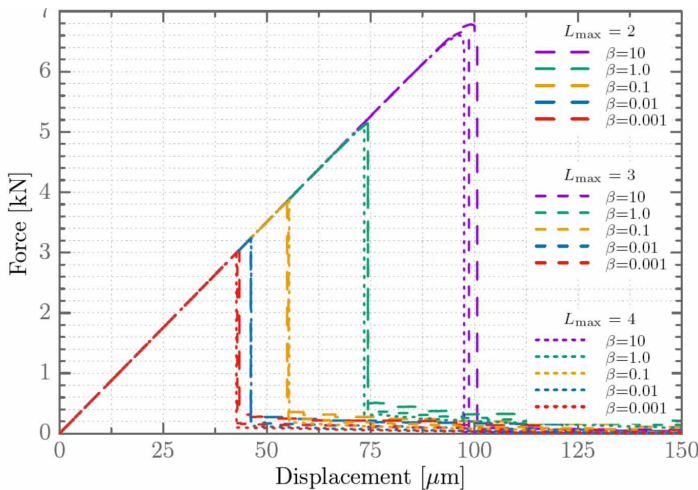


Bild 1: Kraft-Verformungs-Kurve für unterschiedliche Regularisierungsparameter  $\beta$  sowie unterschiedliche adaptive Netzverfeinerungen  $L_{max}$

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## HIGH PERFORMANCE COMPUTING - KONTINUUMSMECHANIK

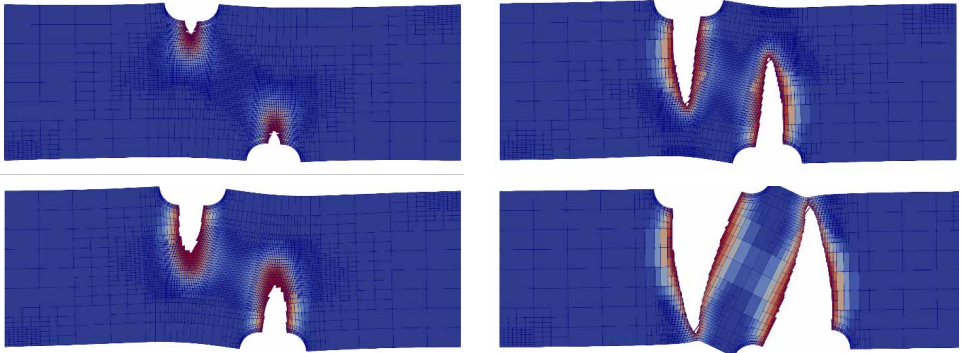


Bild 2: Verteilung der Schädigung auf dem reißenen Bauteil – Das Finite-Elemente-Netz wird adaptiv verfeinert und vergrößert, um den Schädigungsprozess lokal in hoher Genauigkeit berechnen zu können

Die Forschungsergebnisse von Jun.-Prof. Vogel und Dr. Junker werden aktuell in hochrangigen Fachzeitschriften begutachtet.

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## MECHANIK ADAPTIVER SYSTEME

### WELLENFORMINVERSIONSVERFAHREN ZUR DETEKTION VON STRUKTURANOMALIEN

Im Rahmen des SFB 837 „Interaktionsmodelle im maschinellen Tunnelbau“ werden im Teilprojekt A2 (Entwicklung effektiver Konzepte der Vorauserkundung im Tunnelbau mittels akustischer Verfahren) Wellenforminversionsmethoden erforscht, um Strukturanomalien mithilfe von seismischen Signalen vollständig abzubilden. Für die Validierung der Verfahren wurde ein Laborexperiment aufgebaut, welches Ultraschalluntersuchungen in einem Frequenzbereich von ca. 50 kHz bis 2 MHz ermöglicht (s. Bild 1).

Die Anregung elastischer Wellen erfolgt mit Ultraschallprüfköpfen. Die erzeugten Verschiebungen können kontaktlos mit einem Laserinterferometer, angeschlossen an ein Positionierungssystem, aufgenommen werden. Zur Untersuchung wird eine Betonplatte gegossen, welche aus zwei Materialien mit einer linearen

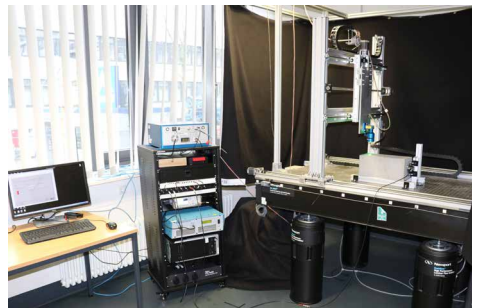


Bild 1: Versuchsaufbau

Trennlinie (s. Bild 2) besteht. Beide Materialien bestehen aus unterschiedlichen Betonmischungen mit daraus resultierenden unterschiedlichen Materialparametern. Es werden Ultraschallmessungen durchgeführt, aus denen Form und Materialparameter invertiert werden sollen.

Grundlage für die Inversion bildet der entwickelte nicht-deterministische Algorithmus „Unscen-

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## MECHANIK ADAPTIVER SYSTEME



Bild 2: Foto der Betonplatte

ted hybrid simulated annealing“, welcher die Diskrepanz zwischen den gemessenen Wellenformen und simulierten Wellenformen durch eine Untersuchung verschiedener Parameterkonfigurationen minimiert. Der Algorithmus kombiniert das „Unscented Kalman Filter“ mit dem Algorithmus der „simulierten Abkühlung“. In diesem Beispiel werden die Position  $z_{loc}$ , der Winkel  $\phi$  und die Kompressionswellengeschwindigkeit  $v_p$  der Anomalie invertiert (s. Bild 3). Bild 4 zeigt den Verlauf des Misfits (Diskrepanz zwischen Messung und Simulation) über 200 eingestellte Berechnungszyklen sowie die Inversionsparameter mit den geschätzten wahren Werten dargestellt durch die jeweilige gestrichelte Linie. Es wird deutlich, dass der Algorithmus in der Lage ist, die Parameter in einem frühen Stadium mit einer hohen Präzision abzuschätzen. Die rekon-

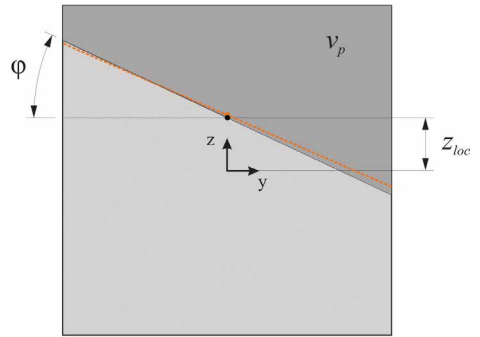


Bild 3: reales Modell in grau mit Inversionsparametern, invertiertes Modell in orange gestrichelt

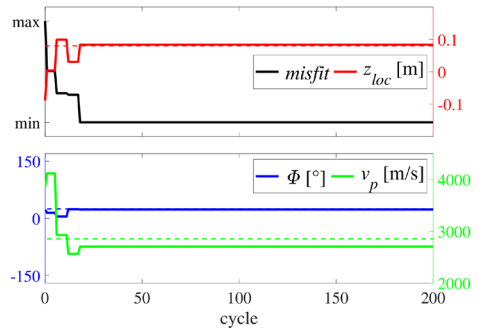


Bild 4: Werte des Misfits und der Inversionsparameter über 200 Zyklen, wahre Werte durch gestrichelte Linien dargestellt

struierte Geometrie ist in Bild 3 mithilfe der orange gestrichelten Linie abgebildet.

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## STATIK UND DYNAMIK

### PARTICLE FINITE ELEMENT SIMULATION OF EXTRUSION PROCESSES OF FRESH CONCRETE DURING 3D-CONCRETE-PRINTING

Additive manufacturing techniques so far have found application predominantly in industrial

production processes due to high costs of the materials used and the specialized technology associated with the technique. Recently, there is growing interest in the development of automated fabrication techniques for concrete

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## STATIK UND DYNAMIK

structures in the construction industry. Most of these novel additive manufacturing processes are based on extrusion techniques, see Fig. 1 above. Due to the time dependent rheological properties of fresh concrete, 3D-concrete-printing processes require a variable and dynamically adjusted control of the manufacturing process. Therefore, properties of 3D-printed concrete structures are much more dependent on the fabrication process as compared to conventionally casted structures.

To this end, numerical models can assist to understand the complex interactions between the printing process and the evolution of structural parameters throughout the manufacturing process. Hence, a numerical model based on the Particle Finite Element Method (PFEM) is developed at the institute for structural mechanics for the analysis of extrusion processes in 3D-concrete-printing.

The printed material is in a flowable and extrudable state and is thus modelled with a non-Newtonian Bingham fluid. In 3D analyses interactions between structural response, process parameters and material properties are discussed.

### 3D-Concrete-Printing: 3D Analysis – Three-Layer Test

The structural response and shape stability properties of the material during the 3D-concrete-printing process are assessed in this analysis. Therefore, a numerical study of three printed layers is performed, see Fig. 1 above. In Fig. 1 below the time instance, when the third layer is printed is given along with the yielded (red) and unyielded (blue) regions. The results are given for three different static yield stresses (or waiting times between each layer). As can be seen, for the lowest static yield stress (or youngest material age) lower layers are plastically deformed from the pressure of the inlet flow and unwanted deformations of lower layers oc-

cur. If the waiting time is long enough, lower layers gained enough strength to bear the impact load from the inlet flow (see Fig. 1 below).

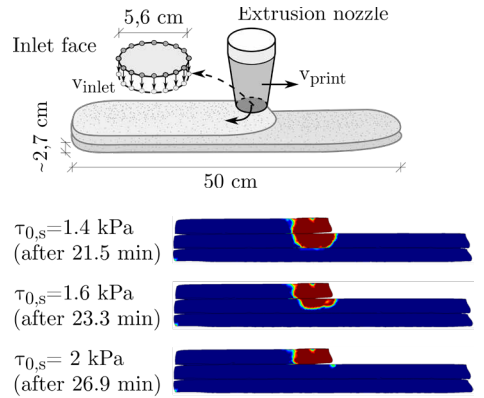


Figure 1: 3D-concrete-printing – three-layer analysis in 3D: 3D-Concrete-Printing geometry and simulation framework (above), yielded (red) and unyielded regions (blue) for different static yield stresses (below)

It can be observed that the vertical loads from the inlet flow on lower layers are very sensitive to the material parameters (or the age or state of structuration) of the extruded material. In Fig. 2 the results of the time averaged vertical reaction forces under the extrusion nozzle are given for two materials with different dynamic yield stresses. For both materials the peak value of the vertical load is reached directly under the extrusion nozzle.

The actual shape and cross-section of the printed layers are given in Fig. 3 for different materials. As can be seen, better shape stability properties are gained for materials with larger dynamic yield stresses. Nevertheless, even though the shape varies for different material parameters, the final height of the printed filaments is the same, when lower layers have a static yield stress large enough to carry all relevant loads.

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN STATIK UND DYNAMIK

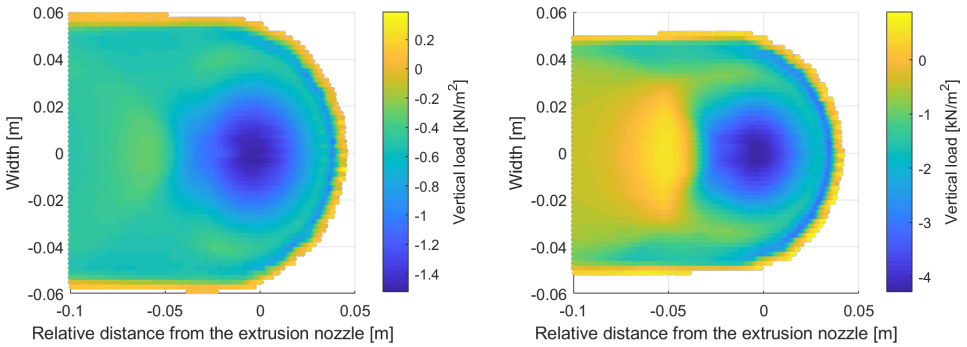


Figure 2: 3D-concrete-printing – three-layer analysis: Time averaged vertical reaction forces over the relative distance to the extrusion nozzle: dynamic yield stress 0.306 kPa (left), dynamic yield stress = 1.240 kPa (right)

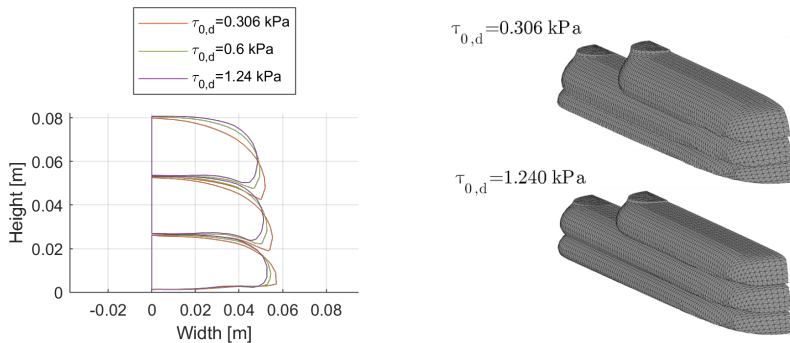


Figure 3: 3D-concrete-printing – three-layer analysis: Shape of the cross section for different dynamic yield stresses (left), numerically printed concrete layers for different dynamic yield stresses at a certain time instance (right)

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN STATIK UND DYNAMIK – BAUSTOFFTECHNIK

## COMPRESSIBLE CEMENTITIOUS COMPOSITES: MATERIAL DESIGN AND COMPUTATIONAL MODELLING

Tunnel construction in difficult geological conditions may cause the degradation of the lining elements. Segment lining integrity can be enhanced by incorporating layers of compressible cementitious materials in combination with a compressible gap grout (Fig.1).

This allows the lining to accommodate unexpected large deformations without any structural damage. To this end, the Institute for building materials and the Institute for structural mechanics are collaborating within the framework of the SFB 837 (subprojects B1, B2 and B3) to develop multi-layer compressible cementitious lining designs.

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## STATIK UND DYNAMIK – BAUSTOFFTECHNIK

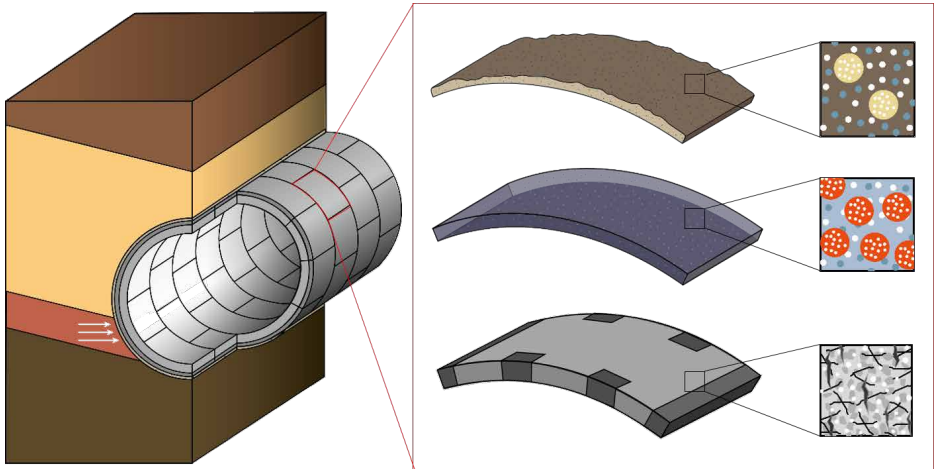


Figure 1: Development of a multi-layer lining segment

The properties of compressible cementitious materials are characterized by the interplay between the amount and type of the deformable additives and the strength of the binder matrix i.e. the material composition. To this end cementitious material composite specimens containing polystyrene beads with and without air voids were prepared (Fig. 2, left). In order to

characterize the behaviour of the designed composites, the specimens were subject to uniaxial confined compression loads. A sodium silicate activator was included within the mix design to ensure a rapid strength development, in particular the shear strength development for providing sufficient support conditions for the tunnel (Fig. 2, right).

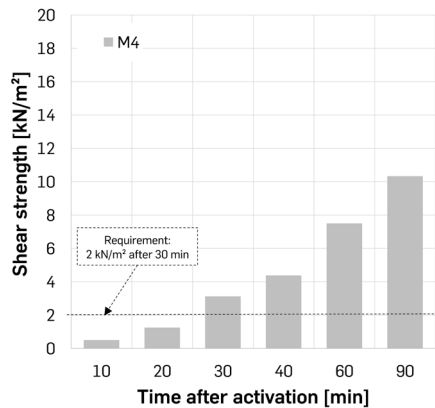
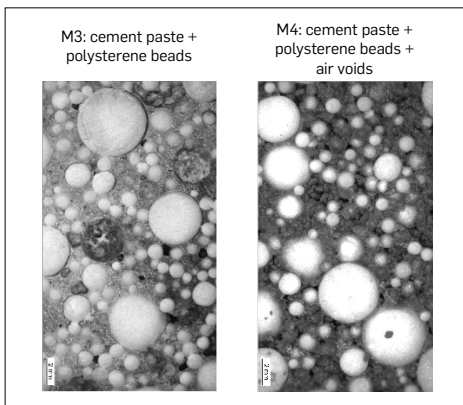


Figure 2: Two different material designs of the compressible cementitious grout (left), evolution of shear strength in time (right)

# NEUES AUS DEN LEHRSTÜHLEN UND ARBEITSGRUPPEN

## STATIK UND DYNAMIK – BAUSTOFFTECHNIK

During the uniaxial confined compression test, complex phenomena in the cementitious composite have been observed: pore collapse, fracture and large deformation with a highly non-linear response. The deformation of the compressible cementitious composite material is simulated using the Discrete Element method (DEM). DEM is an explicit numerical scheme that can describe the mechanical behaviour of assemblies of particles whose displacement is governed by Newton's laws of dynamic equilibrium. For the simulation of the behavior of a compressible cylindrical specimen, samples with high void volume fraction were generated and subjected to confined compression (Fig. 3, left).

It has been found that the interplay between void volume fraction and the distance factor (between Discrete Elements) can replicate the desired behavior of the compressible material, indicated by the

elastic deformation, plateau and densification stages (Fig. 3, right). Figure 3, right shows comparison of experimental and simulation results where the DEM parameters have been calibrated using uniaxial compression experiments. Figure 3, left reveals that damage initiates at an arbitrary weak point in the medium and propagates to form a compression band. A similar mechanism of formation of a compression band is observed at other locations in the material. At the plateau stage, the material experiences both softening and hardening due to fractures and contact of crack faces, respectively. As all the voids collapse, the densification stage begins, characterized by the regain in the apparent stiffness of the material. Using the current discretization, the sample can be compressed up to 45%. With further mesh refinement i.e. accounting for voids at lower scales, it is possible to obtain higher levels of compaction. This aspect is currently being investigated.

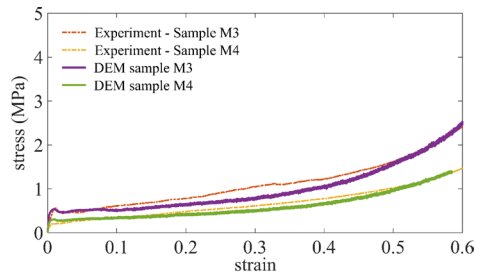
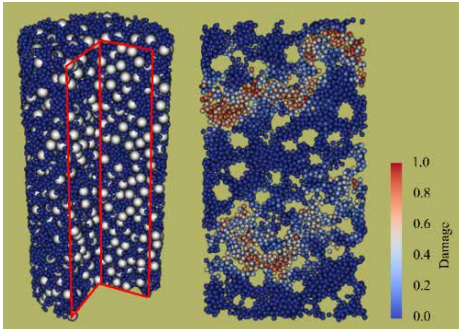


Figure 3: Discrete Element Modelling of compressible cementitious grout – Initial discretization of the cylindrical specimen with spherical pores (in white colour) and pore collapse and damage propagation resulting from confined compression (left), behaviour of compressible cementitious specimens in uniaxial confined compression test: comparison of experimental measurements and numerical simulations (right)

## PROFESSUREN DER FAKULTÄT

- Baustofftechnik  
Prof. Dr.-Ing. R. Breitenbücher
- Bodenmechanik, Grundbau und Umweltgeotechnik  
Prof. Dr.-Ing. T. Wichtmann
- Massivbau  
Prof. Dr.-Ing. P. Mark
- Stahl-, Leicht- und Verbundbau  
Prof. Dr. sc. techn. M. Knobloch
- Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb  
Prof. Dr.-Ing. M. Thewes
- Windingenieurwesen und Strömungsmechanik  
Prof. Dr.-Ing. R. Höffer
- Informatik im Bauwesen  
Prof. Dr.-Ing. M. König
- Mechanik adaptiver Systeme  
Prof. Dr.-Ing. T. Nestorović
- Mechanik - Kontinuumsmechanik  
Prof. Dr.-Ing. D. Balzani
- Mechanik - Materialtheorie  
Prof. Dr. rer. nat. K. Hackl
- Statik und Dynamik  
Prof. Dr. techn. G. Meschke
- High Performance Computing  
in the Engineering Sciences  
Prof. Dr. phil. nat. A. Vogel
- Ingenieurhydrologie und Wasserwirtschaft  
Prof. Dr.-Ing. M. Flörke
- Ressourceneffizientes Bauen  
Prof. Dr.-Ing. A. Hafner
- Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik  
Prof. Dr.-Ing. M. Wichern
- Umwelttechnik und Ökologie im Bauwesen  
Prof. Dr. rer. nat. H. Stolpe
- Verkehrswegebau  
Prof. Dr.-Ing. M. Radenberg
- Verkehrswesen - Planung und Management  
Prof. Dr.-Ing. J. Geistefeldt



## KONTAKTE UND NÄHERE INFORMATIONEN

Nähere Informationen zu Forschung und Lehre sind auf der Fakultätshomepage [www.fbi.rub.de](http://www.fbi.rub.de) zu finden.

Die Leiterinnen und Leiter der Lehrstühle und Arbeitsgruppen stehen gerne für weitere Auskünfte zur Verfügung.

## IMPRESSUM – FÜR DEN INHALT VERANTWORTLICH

Prof. Dr.-Ing. R. Höffer, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften,  
Ruhr Universität Bochum, 44801 Bochum



FAKULTÄT FÜR  
BAU- UND UMWELT-  
INGENIEURWISSENSCHAFTEN