

# DARMSTADT CONCRETE

*ANNUAL JOURNAL ON CONCRETE  
AND CONCRETE STRUCTURES*

*[www.darmstadt-concrete.de](http://www.darmstadt-concrete.de)*



*VOL. 36 2022*

*DEUTSCHE AUSGABE*

DARMSTADT CONCRETE ist die Jahresmitteilung des Instituts für Massivbau, Technische Universität Darmstadt,  
Franziska-Braun-Str. 3, D-64287 Darmstadt, Germany

Redaktion: Dr.-Ing. Tilo Proske, Lukas Bujotzek, M. Sc.  
ISSN 0931-1181

<b>1</b>	<b>JAHRESRÜCKBLICK DES INSTITUTS FÜR MASSIVBAU .....</b>	<b>1</b>
1.1	EDITORIAL UND JAHRESRÜCKBLICK.....	1
1.2	VORSTELLUNG FRAU PROF. WALDMANN.....	5
1.3	SEMINARE UND VERANSTALTUNGEN.....	8
1.3.1	WEITERBILDUNG FÜR TRAGWERKSPLANER.....	8
1.3.2	DARMSTÄDTER MASSIVBAUSEMINAR .....	10
1.3.3	DARMSTÄDTER BETONFERTIGTEILTAGE.....	11
1.4	PERSONALIA.....	12
1.5	PREISE .....	14
1.5.1	PREIS DES FREUNDE-VEREINS .....	14
1.5.2	FÖRDERPREIS DES HESSISCHEN BAUGEWERBES .....	14
1.5.3	DRESSLER-BAU-PREIS.....	15
1.6	DANKSAGUNGEN.....	16
1.7	VERÖFFENTLICHUNGEN .....	19
1.8	STUDENTISCHE ABSCHLUSSARBEITEN AM INSTITUT FÜR MASSIVBAU .....	21
<b>2</b>	<b>DARMSTADT CONCRETE 2021: FACHARTIKEL .....</b>	<b>24</b>
2.1	FORSCHUNGSGEBIETE AM INSTITUT FÜR MASSIVBAU .....	24
2.2	FORSCHUNGSFELD: KONSTRUKTION UND ENTWURF.....	25
	 <b>EINFLUSS DER UMGEBUNGSFEUCHTE AUF DIE FESTIGKEITS- UND VERFORMUNGSEIGENSCHAFTEN VON LEHMMAUERWERK .....</b>	 <b>26</b>
	Maximilian Brinkmann.....	26
	 <b>EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR ERMITTLUNG DER FESTIGKEITS- UND VERFORMUNGSEIGENSCHAFTEN VON FVK- BEWEHRUNG UNTER DRUCKBEANSPRUCHUNG.....</b>	 <b>28</b>
	Lukas Bujotzek.....	28
	 <b>VERFORMUNGSVERHALTEN VORGESPANNTER BETONBAU-TEILE MIT GFK-SPANNGLIEDERN .....</b>	 <b>30</b>
	Dominik Hiesch.....	30

<b>BEMESSUNGSVORSCHLAG ZUR BEGRENZUNG DER RISSBREITEN BFK-BEWEHRTER BETONBAUTEILE .....</b>	<b>32</b>
Dr.-Ing. Sebastian Hofmann.....	32
<b>TRAGVERHALTEN STATISCH UNBESTIMMTER ZWEIFELDTRÄGER MIT GFVK-BEWEHRUNG .....</b>	<b>34</b>
Jonas Klein.....	34
<b>MODIFIZIERTE TEILSICHERHEITSBEIWERTE FÜR BESTEHENDES VOLLZIEGELMAUERWERK.....</b>	<b>36</b>
Dominik Müller.....	36
<b>2.3 FORSCHUNGSFELD: MINERALISCHE UND ÖKOLOGISCHE BAUSTOFFE.....</b>	<b>38</b>
<b>KALKSTEINMEHL UND HÜTTENSAND ALS BETONZUSATZSTOFFE</b>	<b>39</b>
Christian Herget.....	39
<b>ABSENKUNG DES MINDESTZEMENTGEHALTES FÜR DIE HERSTELLUNG UMWELTFREUNDLICHER BETONE.....</b>	<b>41</b>
Anna Louisa Müller.....	41
<b>2.4 FORSCHUNGSFELD: ENERGIE UND NACHHALTIGKEIT .....</b>	<b>43</b>
<b>ABSCHÄTZUNG DES EIGENVERBRAUCHS VON STROM AUS GEBÄUDENAHEN PHOTOVOLTAIKANLAGEN .....</b>	<b>44</b>
André Müller.....	44
<b>BEWERTUNGSTOOL FÜR SANIERUNGSKONZEPTE VON TYPQUARTIEREN .....</b>	<b>46</b>
Johannes Koert .....	46

## **1 JAHRESRÜCKBLICK DES INSTITUTS FÜR MASSIVBAU**

### **1.1 EDITORIAL UND JAHRESRÜCKBLICK**

Liebe Mitglieder des Vereins der Freunde des Instituts für Massivbau,  
sehr geehrte Damen und Herren,

mit der nunmehr 36. Ausgabe von „*Darmstadt Concrete*“ möchten wir Sie wieder über die Aktivitäten unseres Instituts im zurückliegenden Jahr und die Entwicklungen beim Verein der Freunde des Instituts für Massivbau informieren.

Das Jahr 2021 war in vielerlei Hinsicht denkwürdig. Nach wie vor bestimmte die Corona-Pandemie das Arbeiten am Institut und betraf dabei insbesondere die Lehre. Obwohl im Laufe der Pandemie Randbedingungen geschaffen werden konnten, um die Lehre auch im Rahmen des Online-Formats auf dem gewohnt hohen Niveau sicherzustellen, hofft man mit Blick auf das Sommersemester 2022 auf eine Rückkehr zum Präsenz-Lehrformat. Eine sehr erfreuliche Nachricht ist, dass die Massivbau-Professur zu Beginn des Jahres 2022 wiederbesetzt werden konnte. Neue Lehrstuhlinhabern ist Frau Prof. Danièle Waldmann-Diederich. Frau Prof. Waldmann-Diederich war zuvor Professorin an der Universität Luxemburg. Eine ausführliche Vorstellung ihrer Person erfolgt in einem separaten Beitrag dieser Ausgabe.

Ein ganz besonderer Dank gilt unserem ehemaligen Uni-Präsidenten und ESA-Generaldirektor Herrn Prof. Johann-Dietrich Wörner, der in der Vakanz des Lehrstuhls im Wintersemester 2020/21 sowie im Sommersemester 2021 die Vorlesungen zu den Lehrveranstaltungen Stahlbetonbau I und II sowie Spannbetonbau hielt.

Insgesamt sind an unserem Institut derzeit 11 wissenschaftliche Mitarbeiter und 4 administrativ-technische Angestellte tätig. Als neue wissenschaftliche Mitarbeiterinnen konnten wir im vergangenen Jahr Frau Dipl.-Ing. Truong Diep Hasenbank-Kriegbaum und Frau Annika Becker, M.Sc. gewinnen, die Frau Prof. Waldmann-Diederich bei der Neugestaltung der Lehrveranstaltungen am Institut unterstützen und sich im Rahmen ihrer Forschung und Promotion mit baodynamischen bzw. mauerwerksspezifischen Fragen befassen werden. Besonders zu erwäh-

nen sei an dieser Stelle noch die vom Fachbereich vorgegebene Umstellung der Master-Pflichtmodule Spannbetonbau und Mauerwerksbau auf die englische Sprache ab WS 2021/22, um die internationale Ausrichtung der Universität zu unterstützen.

Trotz der erwähnten Herausforderungen im Jahr 2021 sind wir mit den erzielten Leistungen sowohl in Forschung als auch in der Lehre sehr zufrieden. In wirtschaftlicher Hinsicht ist es gelungen, die Drittmiteinnahmen auf hohem Niveau zu halten, insbesondere auch durch die vielen Industrieprojekte des Forschungs- und Prüflabors. Durch das große Engagement in der Lehre erhielten wir zudem weiterhin konstante Zuweisungen der Universität. Neben den erfolgreichen Dienstleistungs- und Forschungsaktivitäten zählen insbesondere die vielen erfolgreichen Abschlüsse unserer Studierenden zu den erzielten Erfolgen.

Im abgelaufenen Jahr konnten zudem zwei ehemalige Doktoranden ihre Promotion am Institut für Massivbau abschließen. Wir beglückwünschen hierzu:

Herrn Dr.-Ing. Sebastian Hofmann

*Rissentwicklung in Betonbauteilen mit Basaltfaserkunststoffbewehrung  
- Ein Modell zur Berechnung der Rissbreite bei wirklichkeitsnaher Betrachtung des Verbundverhaltens*

Herrn Dr.-Ing. Dominik Müller

*Probabilistic Assessment of Existing Masonry Structures – The Influence of Spatially Variable Material Properties and a Bayesian Method for Determining Structure-Specific Partial Factors*

Selbstverständlich ist es uns ein besonderes Anliegen allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Massivbau für ihre Arbeit im ablaufenden Jahr zu danken. Ohne die hohe Qualität und das unermüdliche Engagement, mit denen unsere Wissenschaftler wie auch unsere Mitarbeiter im Sekretariat und in den Laboren ihre Aufgaben und Projekte angehen, wären die Leistungen und Erfolge unseres Institutes in diesem herausfordernden Jahr 2021 nicht denkbar gewesen. Herzlichen Dank dafür!

Die nachfolgend abgedruckten Kurzberichte sowohl in deutscher als auch in englischer Sprache geben Ihnen einen kurzen Einblick in die wissenschaftlichen Aktivitäten unserer Mitarbeiter.

Bei weitergehendem Interesse kontaktieren Sie uns gerne. Eine Zusammenstellung der wissenschaftlichen Veröffentlichungen im Jahre 2021 sowie weitere Informationen finden Sie auf der Homepage des Instituts unter:

***<http://www.massivbau.tu-darmstadt.de/massivbau>***

Ausdrücklich bedanken möchten wir uns an dieser Stelle bei all unseren Lehrbeauftragten und externen Referenten, ohne deren tatkräftige und kompetente Unterstützung es nicht möglich gewesen wäre, unser Lehrangebot in digitaler Form aufrechtzuerhalten. Vielen Dank für ihr außergewöhnliches, ehrenamtliches Engagement gerade in dieser Zeit!

Nicht zuletzt möchten wir uns auch beim Verein „Freunde des Instituts für Massivbau der TU Darmstadt e.V.“ bedanken, der unsere Mitarbeitenden in vielfältiger Weise unterstützt und fördert. Neben allen Vereinsmitgliedern sei insbesondere dem Vorstand für das tolle Engagement gedankt.

Das 41. Darmstädter Massivbauseminar mit dem Titel „*Innovationen im Bauwesen durch Forschung und Entwicklung*“ fand am 03.09.2021 im Darmstädter „*Alten Schalthaus*“ statt. Namhafte Professoren des Massivbaus und Weggefährten von Prof. Graubner hielten spannende Vorträge zu Innovationen im Bauwesen mit dem Schwerpunkt auf dem Bauen mit Beton und Mauerwerk. Zudem wurde von den Vorständen des Freundevereins sowie auf der Abendveranstaltung beim begeisterten Festvortrag von Prof. Schnell auf das fast 25-jährige Wirken von Herrn Prof. Graubner am Institut für Massivbau der TU Darmstadt zurückgeblickt. Einen kurzen Bericht zum Rückblick auf diese Veranstaltung finden Sie in einem separaten Beitrag dieser Ausgabe.

Leider konnte in diesem Jahr infolge der Corona-Problematik das „Freunde Sommerfest“ erneut nicht in gewohnter Form durchgeführt werden. Im November fand jedoch, wenn auch in etwas kleinerer Form, ein Herbstfest statt, bei dem sich die Mitglieder des Freundevereins wieder einmal persönlich treffen und austauschen konnten.

Mit Optimismus blicken wir auf die anstehenden Aufgaben und Herausforderungen in 2022. Das Team des Instituts wünscht Ihnen auf diesem Wege alles Gute, vor allem natürlich Gesundheit.



---

Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann-Diederich



---

Dr.-Ing. Tilo Proske

### 1.2 VORSTELLUNG FRAU PROF. WALDMANN

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts für Massivbau der TU Darmstadt sind froh mit Beginn des Jahres 2022 Frau Prof. Danièle Waldmann-Diederich als neue Professorin am Institut für Massivbau willkommen heißen zu dürfen.

Der akademische Werdegang von Frau-Prof. Waldmann-Diederich beginnt mit dem Studium des Bauingenieurwesens, welches sie an der TU Kaiserslautern im Jahre 1996 erfolgreich abschließt. Dem Studium schließt sich die Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der TU Kaiserslautern an, welche im Jahre 2002 mit der erfolgreichen Dissertation zum Thema „*Shear load bearing behaviour of punctual supported slab bridges*“ beendet wurde. Ab 2000 war Prof. Waldmann-Diederich in der Industrie als Projektleiterin in der Firma Eurobeton S.A. tätig. Während dieser Zeit nahm Frau Prof. Waldmann-Diederich auch bereits am *Higher Institute of Technology (IST)* einen Lehrauftrag wahr. Im Jahre 2003 folgte schließlich der Ruf als Professorin für Massivbau an die Universität Luxemburg, wo sie zuletzt forschte und lehrte. Neben vielfältigen Tätigkeiten in Forschung und Lehre leitete Frau Prof. Waldmann-Diederich in den Jahren 2005 – 2022 die Forschungsgruppe „Solid Structures (LSS)“ und fungierte von 2011 bis 2016 als Direktorin des Studiengangs „*Professional Bachelor in Engineering*“ der Universität Luxemburg sowie von 2016 bis 2022 als Direktorin des Master-Studiengangs „*Civil Engineering – Megastructure Engineering with Sustainable Ressources*“. In den Jahren 2016 – 2022 leitete Frau Prof. Waldmann-Diederich zudem das „*Institute for Civil and Environmental Engineering INCEEN*“. Neben zahlreichen Engagements als Mitglied und Leiterin von Forschungsgruppen, koordinierte sie zuletzt die „*Thematic Task Force TTF3 Building as Material Banks*“ im Rahmen des Projektes „*CIRKLA European School on Materials and Metals in a Circular Economy*“ der „*University of the Greater Region*“. Neben zahlreichen anderen Nominierungen und Erfolgen bei internationalen Preisverleihungen konnte Frau Prof. Waldmann-Diederich bereits 2010 den „*Interregional Prize for Research*“ gewinnen. Zudem wurde ihr Paper zum Thema „*Behaviour of Circular FRP-Steel Confined Concrete Columns Subjected to Reversed Cyclic Loads: Experimental Studies and FE Analysis*“ als „*highly cited paper*“ des ELSEVIER Journals *Construction and Building Materials* gewählt.

Im Rahmen ihrer Forschungstätigkeiten befasst sich Frau Prof. Waldmann-Diederich neben den klassischen Themen des Massivbaus mit innovativen Forschungsansätzen. Dabei deckt sie Forschungsthemen ab, die den gesamten Lebenszyklus von Baustoffen und Bauteilen betreffen. Hier sind zu nennen:

- die Entwicklung von neuartigen Betonen auf der Grundlage erneuerbarer Ressourcen;
- die Entwicklung von funktionalen demontierbaren Bauteilen, welche einen späteren selektiven Rückbau im Kontext eines kreislaufwirtschaftlichen Ansatzes beim Neubau von Gebäuden ermöglichen wie z. B. ein demontierbares Holz-Beton-Decken-Verbundsystem oder modulare Mauersteine für den Trockenbau mit der Untersuchung der Kraftübertragung in der Mauerwerksfuge;
- weiterhin, dem Lebenszyklus von Baustoffen und Bauteilen folgend, die Überwachung von Bauteilen und Tragwerken zur potentiellen Lebensdauererlängerung wie z. B. die Zustandsbewertung von Brückentragwerken mit der eigens entwickelten DAD-Methode, welche auf der Basis von Verformungsmessungen mit Hilfe von Photogrammetrie eine Schadensdetektion und -lokalisierung ermöglicht; oder aber auch die Überwachung von Bauteilen zur Generierung der notwendigen Daten zur Vorbereitung eines selektiven Rückbaus und einer potentiellen Baustoffwiederverwertung;
- dann, das Recycling- und der selektive Rückbau durch Analyse der Rückgewinnung und Wiederverwertung von Baustoffen;
- und schlussendlich, Umwandlung von Sekundärrohstoffen in Produkte mit attraktiven Eigenschaften mit dem Ziel der Reintegration von Abfallprodukten in den Lebenszyklus wie z. B. die Substitution von Zementen durch kalzinierte Tone, welche als Abfallprodukt beim Wäschvorgang von Zuschlägen anfallen.

Neben diesen Forschungsprojekten, welche in der Bearbeitung häufig einen sehr anwendungsbezogenen Charakter hatten, konnte Prof. Waldmann-Diederich die Forschung im Bereich der Weiterentwicklung numerischer Methoden zur Modellierung des Rissverhaltens von Beton auf Mikro-Ebene vorantreiben. Weitere Forschungsvorhaben befassten sich mit Methoden im Bereich des *Building Information Modelling (BIM)* sowie bauphysikalischen Aspekten. Ein Zeichen für Frau Prof. Waldmann-Diederichs vielfältiges Forschungsinteresse, auch über die

Grenzen des Massivbaus und des Bauingenieurwesens hinaus, sind ihre weitreichenden Veröffentlichungen in medizinischen Journals bzgl. des Einsatzes spezieller Kunststoffe für orthopädische Anwendungen. Insgesamt konnte sie 63 Veröffentlichungen in angesehenen internationalen Fachzeitschriften veröffentlichen. Dazu kommen vier Patentschriften und Beiträge zu Fachbüchern sowie zahlreiche Konferenzbeiträge zu unterschiedlichen Themen.

Der Fokus von Frau Prof. Waldmann-Diederichs Forschung an der TU Darmstadt soll sich weiter an der Nachhaltigkeit im Bauwesen orientieren. Dabei sollen die oben genannten Schwerpunkte weiter ausgebaut werden. Damit wird das Institut für Massivbau sich weiterhin auf die Themenbereiche nachhaltige Baustoffe, kreislaforientierte Bauwerksbemessung, Monitoring von Tragwerken während der Nutzungsphase sowie Recycling und selektiver Rückbau von Bauteilen und die Schnittstellen dieser Themenkomplexe konzentrieren. Die Umsetzung dieser Forschungsziele soll mit der Entwicklung neuartiger Baustoffe auf Basis erneuerbarer Ressourcen einerseits und der Entwicklung neuer demontierbarer Verbundbauteile sowie Optimierung des Materialeinsatzes tragender Bauteile andererseits erfolgen. Dann strebt Frau Prof. Waldmann-Diederich an die Verfahren zum Monitoring von Bauwerken weiterzuentwickeln und Prozesse zum Recycling und Wiederverwertung von Baustoffen zu optimieren. Darüber hinaus ist ihr Ziel einen Beitrag zu liefern, damit rezyklierte Sekundärrohstoffe mit vorteilhaften Eigenschaften erneut dem Ressourcenkreislauf zugeführt werden.

Im Hinblick auf die bevorstehenden Lehraktivitäten bringt Frau Waldmann-Diederich mit nahezu 30 Jahren als referierende Dozentin auf Deutsch, Englisch, Französisch und Luxemburgisch eine Menge Erfahrung mit an den Lehrstuhl. In Ihrer Zeit als Leiterin des Studiengangs Bauingenieurwesen an der Universität Luxemburg konnte Frau Waldmann-Diederich darüber hinaus Erfahrungen bei der Neugestaltung von Studiengängen sammeln.

## 1.3 SEMINARE UND VERANSTALTUNGEN

### 1.3.1 WEITERBILDUNG FÜR TRAGWERKSPLANER

Wie in den letzten Jahren zuvor hat auch dieses Jahr das Institut für Massivbau zu der bekannten Fortbildungsreihe „Weiterbildung für Tragwerksplaner - aus der Praxis für die Praxis“ eingeladen. Jedoch wurde die Veranstaltungsreihe in diesem Jahr durch die vom Coronavirus geprägte Situation vor besondere Herausforderungen gestellt. So wurden über das Jahr verteilt die Seminare komplett als Online-Veranstaltungen durchgeführt, die von den interessierten Teilnehmern sehr gut angenommen wurden. Hierfür wurden die Termine der identischen Seminarreihe aus Darmstadt und Kaiserslautern zusammengelegt. Die insgesamt 24 Referenten konnten an den sechs Seminaren über 1800 Teilnehmern aus Darmstadt und Kaiserslautern spannende Berichte aus der Praxis aufzeigen und den aktuellen Stand der Forschung und Normung darstellen. Im Frühjahr wurden die aktuellen Themen und Neuigkeiten im Brandschutz, in der Befestigungstechnik sowie im Holzbau erläutert. Im Herbst konnte die Fortbildungsreihe neben Aspekten der digitalen Planung auch Einblicke in das nachhaltige Bauen in der Tragwerksplanung geben sowie den Fertigteile- und Modulbau näher beleuchten. Nachfolgend sind die sechs Einzelveranstaltungen aufgelistet:

- 17.02.2021: Brandschutz
- 03.03.2021: Befestigungstechnik
- 24.03.2021: Holzbau
- 15.09.2021: Digitale Planung
- 29.09.2021: Nachhaltiges Bauen in der Tragwerksplanung
- 06.10.2021: Fertigteile und Modulbau

Auch im nächsten Jahr wird die Seminarveranstaltung trotz der Umstände aufgrund der großen Teilnehmerzahl und positiven Resonanz fortgesetzt. Da auch das kommende Jahr 2022 durch das Coronavirus geprägt sein wird, wurde entschieden, die Frühjahrsveranstaltungen weiterhin im Online-Format durchzuführen. Für den Herbst wird mit Präsenz- oder Onlineformaten geplant, je nach Situation. Wieder einmal warten auf die Teilnehmer spannende Themen aus Forschung und Praxis. Wir versuchen erneut namhafte Referenten aus Wirtschaft und Wissenschaft gewinnen zu können, um viele Tragwerksplaner ansprechen zu können. Nachfolgend sind die geplanten Seminarinhalte dargestellt:

- 02.03.2022: Technische Gebäudeausrüstung und Bauphysik
- 16.03.2022: Brückenbau
- 30.03.2022: Bauen im Bestand
- 14.09.2022: Gründungen und Gründungsbauwerke
- 28.09.2022: Stahlbau
- 12.10.2022: Erdbeben und Dynamik

Die aktuellsten Informationen und das Anmeldeformular sind auf der Homepage des Instituts Massivbau ([www.massivbau.tu-darmstadt.de](http://www.massivbau.tu-darmstadt.de)) unter der Rubrik „Veranstaltungen“ zu finden. Als Ansprechpartner steht Ihnen Herr Christian Herget, M.Sc. gerne zur Verfügung.

### 1.3.2 DARMSTÄDTER MASSIVBAUSEMINAR

Am 03.09.2021 fand das 41. Darmstädter Massivbauseminar zum Thema „*Innovationen im Bauwesen durch Forschung und Entwicklung*“ im Alten Schalthaus in Darmstadt statt. Für die Seminarveranstaltung konnten zahlreiche, führende Vertreter der Forschungsszene im Massivbau gewonnen werden. Im Rahmen der Vorträge wurde eine Vielzahl von Forschungsschwerpunkten beleuchtet, die Professor Graubner in seiner Zeit am Institut für Massivbau der TU Darmstadt ebenfalls bearbeitete und die in der heutigen Zeit nach wie vor höchst relevant sind. Die Vielfalt der fachlichen Beiträge erstreckte sich über klassische Massivbauthemen der Bemessung & Konstruktion sowie der Erforschung neuartiger sowie recycelter Materialien im Mauerwerks- und Betonbau über neue Vorschriften im Bereich der Betontechnologie bis hin zu Forschung auf dem Themengebiet der Nachhaltigkeit und der Lebenszyklusbewertung.



*Abbildung 1-2: Prof. Graubner im Kreise der Referenten des 41. Darmstädter Massivbauseminars und dem Vorstand der Freunde des Instituts für Massivbau*

Professor Graubner wurde im Rahmen einer festlichen Abendveranstaltung, welche im Anschluss an das Seminar stattfand, im Kreise seiner Freunde, seiner ehemaligen Kollegen und Weggefährten aus Darmstadt verabschiedet.

### **1.3.3 DARMSTÄDTER BETONFERTIGTEILTAGE**

Im Jahr 2021 fanden die „Darmstädter Betonfertigteiltage“ in Kooperation mit der Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e. V. (FDB) und dem InformationsZentrum Beton bedingt durch die Corona-Pandemie im Rahmen eines Online-Formats statt. Dennoch war die Teilnehmerzahl mit 174 Teilnehmern aus der Ingenieurpraxis und rund 40 Studierenden so hoch wie in 14 Jahren noch nie.

An 7 Vormittagen wurden zahlreiche Vorträge rund um das Thema Fertigteilbau von Referenten aus Wissenschaft und Praxis vorgestellt. Neben aktuellen Trends, wie zum Beispiel innovativen Betonbauteilen mit Bewehrung aus carbonfaserbewehrten Kunststoffen oder der digitalen Planung mithilfe von BIM, lag der Fokus auf den Grundlagen und Besonderheiten der Fertigteilbauweise. Dazu gehören u. A. vorgespannte Bauteile, Brandschutz und Verbindungen. Durch das breite Themenspektrum konnte den Teilnehmenden sowohl ein Einstieg in die Fertigteilbauweise als auch die Möglichkeit zur Vertiefung ihres Wissens geboten werden. Dank der Chatfunktion konnten im Anschluss jedes Vortrages Fragen gestellt werden, sodass ein Dialog und Austausch nicht zu kurz kamen.

Die Veranstaltung richtet sich neben den Ingenieuren aus der Praxis an Studierende, welche an einem gesonderten „Studententag“ die Bemessung von Betonfertigteilen vertieft im Rahmen von Übungen behandeln. Zusätzlich zu den 7 Seminartagen wurde zudem ein weiterer Vormittag lediglich für Studierende angeboten, an dem der Planungsatlas Hochbau sowie das Thema Fertigung, Transport und Montage von Fertigteilen vorgestellt wurde. Somit kann die im Rahmen der Darmstädter Betonfertigteiltage stattfindende Vorlesung „Fertigteilkonstruktionen“ sinnvoll in ein konstruktives Studium eingebracht werden.

Im kommenden Jahr 2022 werden die „Darmstädter Betonfertigteile“ im Frühjahr aufgrund von Umstrukturierungen im Zusammenhang der Neubesetzung der Professur nicht stattfinden können. Jedoch sind alle Beteiligten bemüht, dass die Veranstaltung entweder im Herbst 2022 oder Frühjahr 2023 wieder stattfinden wird.

Aktuelle Informationen sind auf der Homepage des Instituts für Massivbau ([www.massivbau.tu-darmstadt.de](http://www.massivbau.tu-darmstadt.de)) unter der Rubrik „Veranstaltungen“ zu finden. Als Ansprechpartnerin steht Ihnen Frau Anna Müller, M.Sc. gerne zur Verfügung.

#### 1.4 PERSONALIA



Seit dem 01. September 2021 lehrt und forscht **Frau Dipl.-Ing. Truong Diep Hasenbank-Kriegbaum** am Institut für Massivbau an der TU Darmstadt und betreut aktuell die Lehrveranstaltungen Spannbetonbau und Angewandte Baudynamik. Sie studierte an der TU Darmstadt von 2003 bis 2010 Bauingenieurwesen mit den Schwerpunkten Massivbau, Geotechnik und Baubetrieb. Das Studium beendete Frau Hasenbank-Kriegbaum mit ihrer Diplomarbeit am Institut für Massivbau mit der Schwerpunktsetzung Baudynamik zum Thema „Untersuchung eines wassergefüllten Tanks unter Erdbebenbelastung“.

Nach Abschluss ihres Studiums war Frau Hasenbank-Kriegbaum als Ingenieurin im Ingenieurbüro Wölfel in Höchberg bei Würzburg in der Abteilung Anlagenbau tätig. Ihre Haupttätigkeit bestand in der Analyse von Bauwerken und Anlagenteilen, vorwiegend im Industrie- und Kraftwerksbau, unter Beanspruchung von Betriebslasten sowie dynamischen Lasten, insbesondere Erdbebenlasten, unter Anwendung unterschiedlicher statischer und dynamischer Berechnungsverfahren. So führte sie u. a. anhand der Finite-Elemente-Methode Untersuchungen zum Stabilitätsvermögen der strukturellen Anlagenteile durch. Nach 2 Jahren wechselte sie zu Hochtief Consult IKS als Baudynamikerin in die Fachabteilung Erdbeben, Baudynamik und Sonderprojekte. Zu ihren Aufgaben gehörten dynamische Berechnungen von Bauwerken, Rohrleitungssystemen, Behälterstapeln und Anlagenteilen für die Lastfälle Erdbeben, Explosion und Wind; die Ermittlung von Etagenantwortspektren unter detaillierter Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung; probabilistische und deterministische seismische Analysen bestehender Kernkraftwerke; nichtlineare Zeitverlaufsanalysen und Push-Over Berechnungen von Gebäuden und Kühltürmen unter Wind, Erbeben und Explosion; sowie die Ermittlung von unfallbedingten Absturzwahrscheinlichkeiten eines Flugzeugs für die Auslegung eines Kernkraftwerkes.



Seit dem 16. Oktober 2021 ist **Frau Annika Becker, M.Sc.** am Institut für Massivbau tätig. Sie studierte an der TU Darmstadt von 2014 bis 2019 Bauingenieurwesen mit den Schwerpunkten Massivbau, Stahlbau und Statik. Während des Masterstudiums arbeitete Frau Becker zwei Jahre als Werkstudentin im Technischen Büro bei Donges SteelTec in Darmstadt. Das Studium beendete Frau Becker mit ihrer Abschlussarbeit am Institut für Massivbau über das Trag- und Verformungsverhalten biegebeanspruchter Betonbauteile mit kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffbewehrung. Dabei wertete sie Biegeversuche mit Hilfe von digitaler Bildkorrelation und konventioneller Messtechnik aus und verglich die Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit den Berechnungsergebnissen aus den aktuell in der Literatur vorliegenden Bemessungsformeln. Nach Abschluss Ihres Studiums war Frau Becker als Tragwerksplanerin im Ingenieurbüro Krebs und Kiefer in Darmstadt in der Abteilung Hochbau tätig. Ihre Haupttätigkeit bestand in der Tragwerksplanung und in der baustatischen Prüfung von Hochbauten in Massivbauweise. Am Institut für Massivbau betreut Frau Becker die Lehrveranstaltung Stahlbetonbau II.

## 1.5 PREISE

### 1.5.1 PREIS DES FREUNDE-VEREINS

Der Förderpreis des Vereins der Freunde des Instituts für Massivbau konnte dieses Jahr leider nicht vergeben werden. Die Mitgliederversammlung des Vereins der Freunde des Instituts für Massivbau fand 2021 mit einem abschließenden Herbstfest statt. Dabei wurde die Veranstaltung aufgrund einige Unsicherheiten hinsichtlich der Corona-Pandemie sehr kurzfristig geplant. Der Vorstand einigte sich darauf, im Jahr 2022 einen Preis in doppelter Höhe auszuschreiben, sofern eine Mitgliederversammlung, in dessen Rahmen die Preisverleihung üblicherweise stattfindet, in Präsenz zulässig ist.



### 1.5.2 FÖRDERPREIS DES HESSISCHEN BAUGEWERBES

Der Verband Baugewerblicher Unternehmer Hessen e. V. verlieh im Oktober 2021 Preise an Studierende sowie Absolventen für deren Studien- und Abschlussarbeiten. Dabei wurden in vier verschiedenen Kategorien die drei jeweils besten Arbeiten ausgezeichnet. Im Bereich Bauingenieurwesen konnte das Institut für Massivbau den ersten und dritten Platz belegen. Frau Celine Willecke, M.Sc. gewann mit ihrer Masterthesis zum Thema „*Untersuchung des Tragverhaltens von Brückenbauwerken mit Faserverbundkunststoffbewehrung*“, betreut durch Herrn Dominik Hiesch, M.Sc., den 1. Platz. Der dritte Platz konnte von Frau Nicole Rösser, B.Sc. für deren Bachelorthesis mit dem Titel „*Klinkerarme Zemente mit Kalkstein und calciniertem Ton - Einfluss der Zementzusammensetzung und des Wasser-Zement-Wertes auf ausgewählte Mörtel Eigenschaften*“, betreut von Frau Anna Müller, M.Sc., gewonnen werden.



### 1.5.3 DRESSLER-BAU-PREIS

Der Dreßler-Bau Preis für herausragende Bachelorarbeiten auf den Gebieten Massivbau und Baubetrieb für das Jahr 2021 wird aufgrund von terminlichen Verschiebungen im Zusammenhang mit der Corona-Pandemie erst im Frühjahr des kommenden Jahres im Rahmen der Veranstaltung „*Ausgezeichnet*“ verliehen. Auch dieses Mal sind mit Nicole Rösser, B.Sc. und Sebastian Ruß, B.Sc. wieder 2 Studierende für den mit 1.500 € pro Preisträger\*in dotierten Preis nominiert, die ihre Bachelorarbeit am Institut für Massivbau absolvierten. Betreut wurden die Arbeiten jeweils von Frau Anna Müller, M.Sc. und Herrn Lukas Bujotzek, M.Sc.



Wir gratulieren an dieser Stelle schon einmal für die Nominierung und wünschen für die Verleihung des Preises Anfang dieses Jahres viel Erfolg!

## **1.6 DANKSAGUNGEN**

Ohne die Unterstützung der folgenden Organisationen wären wir im vergangenen Jahr nicht in der Lage gewesen, unsere Arbeit in der Forschung und in der Lehre in gewohntem Umfang sowie gewünschter Qualität durchzuführen:

Apleona HSG GmbH  
Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V.  
BASF AG  
bauart Konstruktions GmbH & Co. KG  
Beton Kemmler GmbH  
Birco GmbH  
BT3 Betontechnik GmbH  
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR)  
Bundesministerium für Bildung und Forschung  
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)  
Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat  
Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie  
Bundesverband der Kalksandsteinindustrie e.V.  
Bundesverband Porenbetonindustrie e.V.  
Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie e.V.  
Bundesverband Leichtbeton e.V.  
Deutsche Basalt Faser GmbH  
Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)  
Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)  
Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V. (DGfM)  
Deutsche Poroton GmbH  
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton  
Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.  
Deutsches Institut für Bautechnik  
Deutsche Wohnen  
Dreßler Bau GmbH  
Dyckerhoff GmbH  
Empa Dübendorf  
Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e. V.  
Fischerwerke  
Forschungsinstitut der Zementindustrie (FiZ)  
Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.  
Freunde des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt e.V.  
Freunde der Technischen Universität Darmstadt e. V.  
FTA Forschungsgesellschaft für Textiltechnik Albstadt mbH  
Goldbeck GmbH  
Güteschutzverband Betonschalungen e. V.  
H-BAU Technik GmbH / PohlCon GmbH  
Halfen GmbH & Co. KG / Leviat  
HeidelbergCement AG  
Hilti Deutschland AG

**Hochtief AG**  
**HSE Technik GmbH**  
**Implenia**  
**InformationsZentrum Beton GmbH**  
**Ingenieurbüro Krebs und Kiefer**  
**Inno-Test-Lab GmbH**  
**Institut Wohnen und Umwelt**  
**Klimaleichtblock GmbH**  
**König und Heunisch Planungsgesellschaft mbH & Co KG**  
**LCEE Life Cycle Engineering Experts GmbH**  
**Liapor GmbH & Co.**  
**LohrElement GmbH**  
**mako GmbH & Co. KG Schalungstechnik**  
**MAPEI Betontechnik GmbH**  
**Max Bögl Bauunternehmen GmbH**  
**MEVA Schalungssysteme GmbH**  
**OPTERRA Karsdorf GmbH**  
**pakon AG**  
**Peri GmbH**  
**Projektträger Jülich (PtJ)**  
**Ruffert & Partner**  
**Schlagmann Poroton GmbH & Co. KG**  
**Schöck Bauteile GmbH**  
**sh minerals GmbH**  
**solidian GmbH**  
**Spenner Zement GmbH & Co. KG**  
**Syspro-Gruppe Betonbauteile e. V.**  
**thyssenkrupp Carbon Components GmbH**  
**V.FRAAS GmbH**  
**Verein Deutscher Zementwerke e. V.**  
**VHT Versuchsanstalt für Holz- und Trockenbau GmbH**  
**Waibel KG**  
**Wienerberger AG**  
**Wombacher-Kempf-Hondl Beratende Ingenieure PartGmbB**  
**Würth-Gruppe**  
**Xella Technologie und Forschungsgesellschaft mbH**

Wir wollen uns für diese Unterstützung herzlich bedanken und hoffen auch für die Zukunft auf eine erfolgreiche Zusammenarbeit.

Im Bereich der Lehre ist eine Unterstützung durch Experten und in der Praxis stehende Fachleute aus Ingenieurbüros, Verwaltung, Verbänden und Industrie unerlässlich und sehr geschätzt. Für ihr persönliches Engagement als Lehrbeauftragte unseres Instituts möchten wir uns daher bei den folgenden Personen bedanken:

<b>Dr.-Ing. Markus Spengler</b>	Angewandte Baudynamik
<b>Dipl.-Ing. Thomas Heß</b>	Technische Gebäudeausrüstung I + II
<b>Dr.-Ing. Carmen Mielecke</b>	Strategisches Facility Management & Sustainable Design
<b>Dr.-Ing. Gert Riegel</b>	Strategisches Facility Management & Sustainable Design
<b>Prof. Dr.-Ing. Georg Geldmacher</b>	Massivbrückenbau und Traggerüste
<b>Dr.-Ing. Valentin Förster</b>	Mauerwerksbau und Sonderfragen aus dem Betonbau

Außerdem möchten wir uns auch bei allen bedanken, die im Rahmen der Lehre ehrenamtlich mitgewirkt und Vorträge gehalten haben.

### **Angewandte Baudynamik**

Dr.-Ing. Herbert Duda

### **Fertigteilkonstruktionen**

Dipl.-Ing. Mathias Tillmann  
Dipl.-Ing. Christian Goldbrunner  
Dipl.-Ing. Werner Hochrein  
Roland Klein-Holte  
Dr.-Ing. Larissa Krieger  
Dr.-Ing. Tanja Skottke  
Dr.-Ing. Johannes Furche  
Prof. Dipl.-Ing. Dominik Wirtgen  
Dipl.-Ing. Martin Hierl  
Dipl.-Ing. Elisabeth Hierlein  
Judith Pütz-Kurth  
Dipl.-Wirt.-Ing. Peter Schermuly  
Friedhard Ströhmann  
Dipl.-Ing. Jörg Burkhardt  
Dr.-Ing. Diethelm Bosold  
Dipl.-Ing. Erwin Scholz

### **Massivbrückenbau und Traggerüste**

Dr.-Ing. Gerhard Zehetmaier  
Dr.-Ing. Stefan Kempf  
Dr.-Ing. Jochen Zeier  
Dr.-Ing. Jaroslav Kohoutek

### **Spannbetonbau**

Dr.-Ing. Stefan Daus

### **Strategisches Facility Management & Sustainable Design**

Dr.-Ing. Torsten Mielecke  
Dr.-Ing. Sebastian Pohl  
Dr.-Ing. Martina Lohmeier

### **Technische Gebäudeausrüstung**

Dipl.-Ing. Patrick Bös  
Ing. Marcel Jansen  
Dr.-Ing. Leif Pallmer  
Dipl.-Ing. Olaf Pielke  
Verena Schön M.Sc.  
Prof. Dr.-Ing. Benjamin von Wolf-Zdekauer  
Dr.-Ing. Claudia Weißmann

### **Mauerwerksbau und Sonderfragen aus dem Betonbau**

Dipl.-Ing. Georg Flassenberg  
Dr. Dieter Figge  
Sebastian Warken

## 1.7 VERÖFFENTLICHUNGEN

### Ausgewählte Fachartikel und Buchbeiträge:

Brinkmann, M.; Armenat, J.: Vertikale Begrünung mit UNIKA-Pflanzsteinen - Hintergründe zur Anwendung, Bemessung und Konstruktion, In: Mauerwerk 26, Heft 1, 2022, Ernst & Sohn, Berlin, DOI: <https://doi.org/10.1002/dama.202100011>.

Proske, T.; Scheich, C.; Rezvani, M.: Pressure-Dependent Shear Behavior of Fresh Concrete, In: ACI MATERIALS JOURNAL, Issue 20-388, 2021, American Concrete Institute.

Herget, C.; Müller, A.; Proske, T.; Rezvani, M.; Graubner, C.-A.: Kalksteinmehl als Beton-zusatzstoff – Vorschlag für die Anrechenbarkeit auf den Zementgehalt und Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Reduktion im Betonbau, In: Beton- und Stahlbetonbau, Heft 116, 2022, Wiley, DOI: <https://doi.org/10.1002/best.202100073>.

Bujotzek, L.; Hiesch, D.; El Ghadioui, R.; Proske, T.: Material Properties of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement in Compression – A Review, In: Concrete Structures: New Trends for Eco-Efficiency and Performance, 14.-16. Juni 2021, Fédération Internationale du Béton (fib) – International Federation for Structural Concrete, Lissabon, S. 897-906, ISBN: 978-2-940643-08-0."

El Ghadioui, R.; Hiesch, D.; Bujotzek, L.; Proske, T.; Graubner, C.-A.: Structural behaviour of CFRP reinforced concrete members under monotonic and cyclic long-term loading, In: Materials and Structures, Vol. 54, 2021 (137), S. 1-18, DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01728-4>.

Graubner, C.-A.; Brinkmann, M.; Förster, V.: Effiziente Bemessung von Leichtbetonmauerwerk nach neuesten normativen Regelungen, In: BFT International, Ausgabe 02/2021, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh.

Sykora, M.; Diamantidis, D.; Müller, D.; Helder, S.: A practical guide on the quantification of value of information gained by structural health monitoring and application to historic masonry structures, In: Structure and Infrastructure Engineering, Taylor & Francis, DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1857793>.

Müller, D.; Proske, T.; Graubner, C.-A.: Stochastic Simulation of Clay Brick Masonry Walls with Spatially Variable Material Properties, In: 18th International Probabilistic Workshop, 12.-14. Mai 2021, Springer, Guimarães, S. 779-791, ISBN: 978-3-030-73615-6, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-73616-3\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73616-3_60).

Müller, D.; Graubner, C.-A.: Assessment of Masonry Compressive Strength in Existing Structures Using a Bayesian Method, In: ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, Vol. 7, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0001113>.

**Ausgewählte Fachvorträge:**

Graubner, C.-A.; Brinkmann, M.: Mauerwerk - Effiziente Bemessung nach DIN EN 1996-1-1 und DIN EN 1996-3, 41. Darmstädter Massivbauseminar, Darmstadt, 03.09.2021.

Bujotzek, L.; Hiesch, D.; El Ghadioui R.; Proske, T.: Material properties of fibre reinforced polymer (FRP) reinforcement in compression – A review, fib Symposium 2021, Lisbon, 14.-16.06.2021

Graubner, C.-A.; Brinkmann, M.; Förster, V.: Effiziente Bemessung von Leichtbeton-mauerwerk nach neuesten normativen Regelungen, 65. BetonTage, Neu-Ulm, 23.02.2021.

**1.8 STUDENTISCHE ABSCHLUSSARBEITEN AM INSTITUT FÜR MASSIVBAU**

<b>Titel der Arbeit</b>	<b>Betreuer/in</b>	<b>Art der Arbeit</b>
Rissbreitenbegrenzung massiger Bauteile aus Stahlbeton	Klein	Bachelorarbeit
Rotationskapazität von bewehrten Betonbauteilen – Mechanische Grundlagen, Rechenmodelle und Einflussfaktoren vor dem Hintergrund neuartiger Bewehrungsmaterialien	Klein	Bachelorarbeit
Lehm - Ein traditionsreicher Baustoff	Brinkmann	Bachelorarbeit
Klinkerreduzierter Betone mit Kalksteinmehl und calciniertem Ton – Einfluss der Zusammensetzung und des w/z-Wertes auf ausgewählte Eigenschaften	Müller, A. L.	Bachelorarbeit
Untersuchungen zur Feuchteabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmsteinen	Brinkmann	Bachelorarbeit
Anrechenbarkeit von Kalksteinmehl auf das Schwindverhalten von Zementstein	Herget	Bachelorarbeit
Verwendung von Klimadatensätzen für die Energiebedarfsermittlung von Gebäuden	Koert	Bachelorarbeit
Untersuchung des Verbundverhaltens von Faserverbundkunststoffbewehrungen in Beton	Hiesch	Bachelorarbeit
Untersuchungen zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit Bewehrung aus Faserverbundkunststoffen (FVK) unter Druckbeanspruchung	Bujotzek	Bachelorarbeit
Tragverhalten von Bewehrung aus Faserverbundkunststoffen (FVK) unter dauerhafter Druckbeanspruchung	Bujotzek	Bachelorarbeit
Untersuchung zum Mindestzementgehalt – Auswirkung der Absenkung des Zementgehaltes auf ausgewählte Betoneigenschaften	Müller, A. L.	Bachelorarbeit
Anwendung des Nennkrümmungsverfahrens auf Betonstützen mit FVK-Bewehrung	Bujotzek	Bachelorarbeit
Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Faserverbundkunststoffen (FVK) als Biegedruckbewehrung	Bujotzek	Bachelorarbeit
Untersuchungen zur Feuchteabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmmauermörtel	Brinkmann	Bachelorarbeit
Bemessung eines integralen Brückenbauwerks in Carbonbetonbauweise unter zyklischer Lastbeanspruchung	Bujotzek	Bachelorarbeit
Verfahren zur plastischen Schnittgrößenermittlung im konstruktiven Betonbau vor dem Hintergrund neuartiger Bewehrungsmaterialien	Klein	Bachelorarbeit
Entwicklung eines Modellierungsansatzes zur Vorhersage der reversiblen und irreversiblen Schwindverformungen von Zementstein	Herget	Bachelorarbeit

JAHRESRÜCKBLICK DES INSTITUTS FÜR MASSIVBAU

<b>Titel der Arbeit</b>	<b>Betreuer/in</b>	<b>Art der Arbeit</b>
Untersuchungen zum Einfluss des Zementgehaltes auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften von Betonmischungen mit optimierter Korngrößenverteilung	Müller, A. L	Bachelorarbeit
Plastische Berechnungsmethoden im konstruktiven Betonbau vor dem Hintergrund neuartiger Bewehrungsmaterialien	Klein	Bachelorarbeit
Analyse des Einflusses verschiedener Eingangsparameter auf die dynamische Energiebedarfsrechnung von Gebäuden	Koert	Masterarbeit
Verformungsverhalten von Betonbauteilen mit vorgespannter Faserverbundkunststoffbewehrung	Hiesch	Masterarbeit
Untersuchung des Materialverhaltens von Faserverbundkunststoffen unter zyklischer Beanspruchung	Bujotzek	Masterarbeit
Untersuchung der Dauerhaftigkeit und mechanischen Eigenschaften von Multikompositzementen mit calciniertem Ton und Kalksteinmehl	Müller, A.L.	Masterarbeit
Weiterentwicklung der Ökobilanzierung von Gebäuden unter Berücksichtigung unsicherer zukünftiger Rahmenbedingungen	Koert	Masterarbeit
Verformungsverhalten von Zementstein unter zyklischer Temperatur- und Feuchtebeanspruchung	Herget	Masterarbeit
Untersuchung des Tragverhaltens von Brückenbauwerken mit Faserverbundkunststoffbewehrung	Hiesch	Masterarbeit
Untersuchungen zum Lastumlagerungsvermögen druckbeanspruchter Mauerwerkswände	Müller, D.	Masterarbeit
Einfluss des Umgebungsklimas auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks	Brinkmann	Masterarbeit
Hygrothermische Analyse von Lehm-mauerwerkswänden mittels numerischer Simulation	Brinkmann	Masterarbeit
Untersuchung der notwendigen technischen Rahmenbedingungen für den effizienten Einsatz von Wärmepumpen in modernisierten Mehrfamilienhäusern	Müller, A.	Masterarbeit
Nichtmetallische Bewehrung für druckbeanspruchte Betonbauteile – experimentelle und theoretische Untersuchungen	Bujotzek	Masterarbeit
Experimentelle Untersuchung zur Rotationskapazität von FVK-bewehrten Bauteilen	Klein	Masterarbeit
Entwicklung einer Methodik zur Generierung von Erzeugungslastprofilen von Solarthermieanlagen und deren Einbindung in bestehende Anlagen und Gebäudemodelle	Koert	Masterarbeit
Untersuchungen zur Zuverlässigkeit FVK-bewehrter Betonkonstruktionen unter zentrischer und exzentrischer Druckbeanspruchung	Bujotzek	Masterarbeit

JAHRESRÜCKBLICK DES INSTITUTS FÜR MASSIVBAU

---

<b>Titel der Arbeit</b>	<b>Betreuer/in</b>	<b>Art der Arbeit</b>
Betonbauteile mit vorgespannter Faserverbundkunststoffbewehrung im sofortigen Verbund unter dauerhafter Lastbeanspruchung	Hiesch	Masterarbeit
Entwicklung einer Planungshilfe zur Auslegung der elektrischen Betriebsmittel in Gebäuden	Koert	Masterarbeit
Bemessung schwingungsanfälliger Stahlbeton-Tragstrukturen mithilfe dreidimensionaler Finite-Elemente-Gebäudemodelle	Klein	Masterarbeit
Untersuchung des Verformungsverhalten von Betonbauteilen mit vorgespannter Faserverbundkunststoffbewehrung	Hiesch	Masterarbeit
Untersuchungen zum Feuchtegehalt tragender Lehmmauerwerkskonstruktionen im Wohnungsbau	Brinkmann	Masterarbeit
Numerische Untersuchung des Tragverhaltens von Betonbauteilen mit vorgespannter Faserverbundkunststoffbewehrung	Hiesch	Masterarbeit
Numerische Modellierung von im Grundriss gekrümmten Spannbetonbrücken	Hiesch	Masterarbeit
Betonbauteile mit vorgespannter Bewehrung aus Faserverbundkunststoffen im sofortigen Verbund - Theoretische und experimentelle Untersuchungen	Hiesch	Masterarbeit
Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Ausfachungswänden aus unbewehrtem Mauerwerk	Brinkmann	Masterarbeit
Untersuchung des Einflusses ausgewählter Parameter auf die Materialeigenschaften nichtmetallischer Bewehrung unter Druckbeanspruchung	Bujotzek	Masterarbeit
Tragverhalten statisch unbestimmt gelagerter Betonbalken mit Stahl- und FVK-Bewehrung	Klein	Masterarbeit

## 2 DARMSTADT CONCRETE 2021: FACHARTIKEL

### 2.1 FORSCHUNGSGBIETE AM INSTITUT FÜR MASSIVBAU

Die Arbeitsziele in der Forschung waren im Jahr 2021 von dem gemeinsamen Gedanken geprägt unsere Bauwerke sicherer, dauerhafter, wirtschaftlicher und umweltverträglicher zu errichten. Daher wurden am Institut für Massivbau innerhalb von sechs Forschungsgebieten unterschiedlichste Themenstellungen bearbeitet.



Abbildung 2-1: Forschungsgebiete am Institut für Massivbau der TU Darmstadt im Jahr 2021

Die nachfolgenden wissenschaftlichen Fachartikel werden in die folgenden Kategorien eingeteilt:

- Konstruktion und Entwurf  
Bemessung und Konstruktion, Mauerwerksbau, Risiko und Sicherheit
- Mineralische und ökologische Baustoffe
- Energie und Nachhaltigkeit  
Energieforschung, Nachhaltigkeit im Bauwesen

## 2.2 FORSCHUNGSFELD: KONSTRUKTION UND ENTWURF

### Forschungsgebiet: Bemessung und Konstruktion

Das Forschungsgebiet „Bemessung und Konstruktion von Betontragwerken“ nimmt am Institut für Massivbau eine zentrale Rolle ein. Es beinhaltet sämtliche Fragestellungen, welche sich mit dem Planen und Entwerfen von Bauwerken des allgemeinen Hochbaus sowie des konstruktiven Ingenieurbaus beschäftigen. Im Mittelpunkt stehen dabei Innovationen hinsichtlich neuartiger Materialien sowie der Bemessung und konstruktiven Durchbildung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen, welche die hohen Anforderungen moderner Bauwerke erfüllen.

### Forschungsgebiet: Mauerwerksbau

Erhöhte Ansprüche an moderne Gebäude hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Komfort sowie die große wirtschaftliche Bedeutung des Traditionsbaustoffes Mauerwerk erfordern für diese Bauweise nachhaltige Innovationen. Gesteigerte Anforderungen bezüglich des Wärme-, Schall- und Brandschutzes, der Zwang zur Rationalisierung und verbesserte Materialeigenschaften führen zu optimierten Mauerwerkskonstruktionen, die an die praxisorientierte Forschung am Fachgebiet verschiedenste Aufgaben stellen. In diesem Zusammenhang werden neue Produkte wissenschaftlich begleitet, um in der Mauerwerksnormung Berücksichtigung zu finden. Zusätzlich werden verbesserte Bemessungsverfahren entwickelt, die das Potential des Mauerwerks optimal ausnutzen und somit seine Wirtschaftlichkeit erhöhen.

### Forschungsgebiet: Risiko und Sicherheit

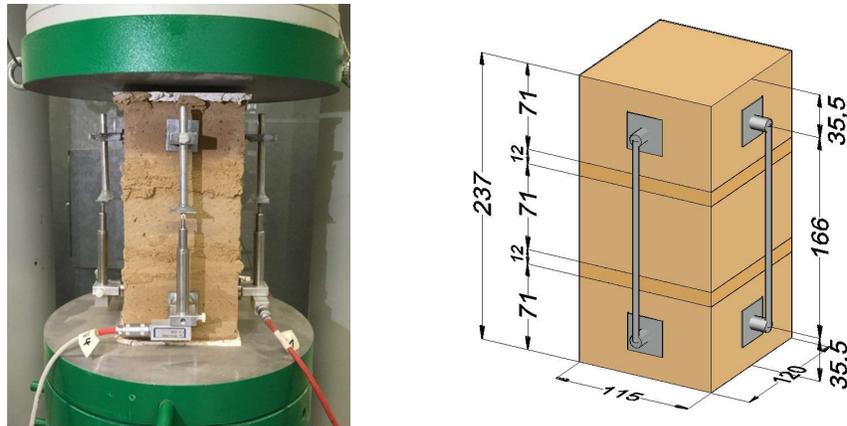
Sicherheit und Zuverlässigkeit gehören zu den wichtigsten Eigenschaften von baulichen Anlagen und technischen Systemen. Der Begriff der Sicherheit fordert in diesem Zusammenhang die Abwesenheit von Gefährdungen für Leib und Leben von Menschen, die im direkten Umfeld der baulichen Anlagen oder technischen Systeme stehen.

Das Fachgebiet Massivbau betreibt seit mehreren Jahren intensive Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Sicherheit und Zuverlässigkeit baulicher Anlagen. Die durchzuführenden Forschungsprojekte behandeln dabei die Modellierung von Einwirkungen und Widerständen, die Kalibrierung von Sicherheits- und Kombinationsbeiwerten sowie die Berücksichtigung außergewöhnlicher Einwirkungen im konstruktiven Ingenieurbau.

## EINFLUSS DER UMGEBUNGSFEUCHE AUF DIE FESTIGKEITS- UND VERFORMUNGSEIGENSCHAFTEN VON LEHMMAUERWERK

Maximilian Brinkmann

Für die Bemessung vorwiegend druckbeanspruchten Mauerwerks ist die Kenntnis der Festigkeits- und Verformungseigenschaften der verwendeten Stein-Mörtel-Kombination essentiell. Im Gegensatz zu herkömmlichen Mauerwerksbaustoffen werden die Druckfestigkeit und der Elastizitätsmodul von Lehmmauerwerk stark von der vorherrschenden Umgebungsfeuchte beeinflusst. Um diesen Einfluss quantifizieren und zukünftig in der Traglastberechnung von Lehmmauerwerkswänden berücksichtigen zu können, wurden am Institut für Massivbau im Rahmen eines vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) geförderten Forschungsprojekts experimentelle Untersuchungen an Dreisteinkörpern aus Lehmmauerwerk (vgl. Abbildung 2-2) nach Konditionierung bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen durchgeführt.



*Abbildung 2-2: Dreisteinkörper aus Lehmsteinen und Lehmörtel inklusive Messtechnik  
(Maße in mm)*

Die Versuchsreihe umfasste die Ermittlung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften nach Konditionierung der Probekörper bis zur Massekonstanz bei sieben verschiedenen relativen Luftfeuchten  $\varphi$  in Kombination mit der normativen Referenztemperatur von  $\theta = 23 \text{ °C}$ . Weiterhin wurden Tastversuche bei konstanter relativer Luftfeuchte und verschiedenen Umgebungstemperaturen durchgeführt.

Die Auswertung der Versuchsreihe ergab, dass Änderungen der Umgebungstemperatur innerhalb des baupraktisch relevanten Bereichs ( $10\text{ °C} \leq \theta \leq 40\text{ °C}$ ) die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmmauerwerk nicht maßgeblich beeinflussen. Wie in Abbildung 2-3 dargestellt, wirken sich Änderungen der relativen Luftfeuchte dagegen erheblich auf die bemessungsrelevanten Materialeigenschaften biegedruckbeanspruchten Lehmmauerwerks aus.

Bei Betrachtung der Versuchsergebnisse lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der relativen Luftfeuchte über den gesamten hygroskopischen Feuchtebereich ableiten. Diese Abhängigkeit ist für erhöhte relative Luftfeuchten von  $\varphi > 40\%$  ebenfalls auf den Elastizitätsmodul übertragbar. Da niedrigere relative Luftfeuchten hierzulande in der Regel nicht über einen längeren Zeitraum auftreten, sind geringfügige Abweichungen von der linearen Korrelation in diesem Feuchtebereich vernachlässigbar. Die aus der Testreihe gewonnenen Erkenntnisse fließen zukünftig in die Erarbeitung einer nationalen Bemessungsnorm für tragende Lehmmauerwerkswände ein.

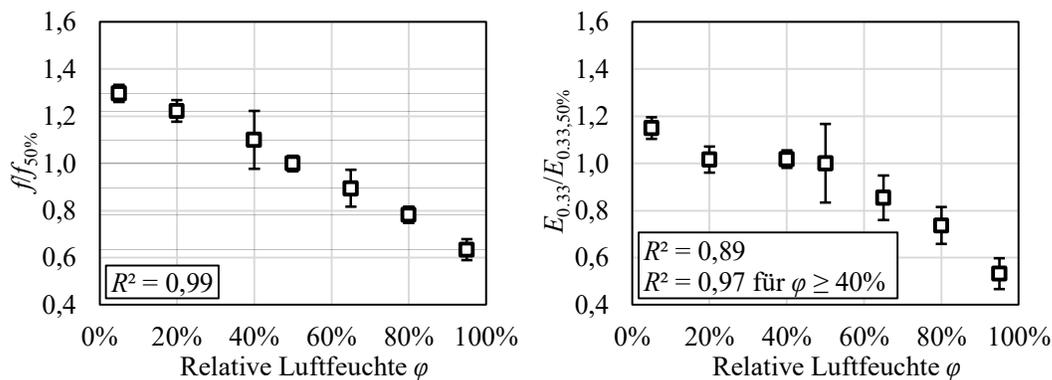


Abbildung 2-3: Normierte Mittelwerte der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls des untersuchten Lehmmauerwerks bei variierender relativer Luftfeuchte  $\varphi$

## EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR ERMITTLUNG DER FESTIGKEITS- UND VERFORMUNGSEIGENSCHAFTEN VON FVK-BEWEHRUNG UNTER DRUCKBEANSPRUCHUNG

Lukas Bujotzek

Die Forschung und Entwicklung zu Bewehrung aus Faserverbundkunststoffen (FVK) für den Betonbau beschäftigt sich überwiegend mit der Anwendung unter Zugbeanspruchung. Ein Beitrag derartiger Bewehrung auf Druck wird derzeit von führenden internationalen Normen ausgeschlossen.

Aktuelle Forschungsvorhaben zeigen jedoch, dass die Vernachlässigung des Traganteils bei der Bemessung druckbeanspruchter Betonbauteile zu unwirtschaftlichen Ergebnissen führen kann. Infolge der hohen Bandbreite an Ergebnissen zu Materialeigenschaften von FVK-Bewehrung, die im Rahmen einer umfangreichen Literaturstudie festgestellt werden konnte, ist es im Sinne der weiteren Erforschung dieses Themenfeldes erforderlich die Versuchsgrundlage auf Basis eines geeigneten Versuchsprogramms und –aufbaus zu erweitern. Dazu wurden am Institut für Massivbau der TU Darmstadt im vergangenen Jahr über 100 Versuche zur experimentellen Ermittlung von Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul unter Druckbeanspruchung durchgeführt. Die freie Länge der Proben wurde nach reichlicher Abwägung zum sechsfachen Stabdurchmesser ( $6 \cdot \varnothing$ ) gewählt. Die Einleitung der Lasten in das transversal anisotrope Material geschieht mithilfe ausbetonierter Stahlhülsen, vgl. Abbildung 2-4. Dehnungen werden bei der Durchführung der Versuche mithilfe eines Extensometers an zwei Stellen aufgezeichnet.



Abbildung 2-4: verwendete Materialien, Prüfkörper, Messtechnik und Versuchsaufbau

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurde Bewehrung aus drei verschiedenen Fasermaterialien (Glas (GFK), Basalt (BFK), Carbon(CFK)), drei verschiedener Hersteller sowie unterschiedlicher Stabdurchmesser geprüft. Dabei wurde für jede dieser Ausprägungen eine Stichprobe von  $n = 10$  Versuchen geprüft. Die Ergebnisse der Versuche sind in folgender Abbildung zusammenfassend dargestellt.

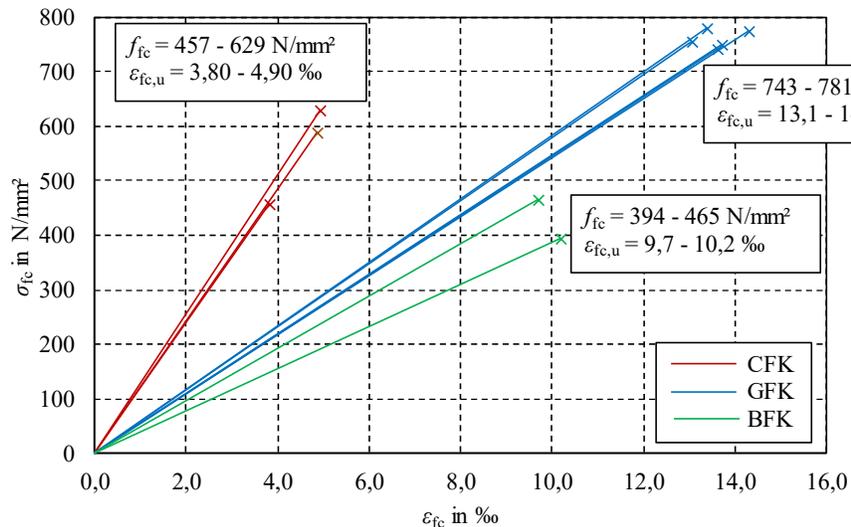


Abbildung 2-5: Bruchfestigkeiten und -dehnungen der untersuchten Bewehrungsarten

Dabei wird direkt ersichtlich, dass das Materialverhalten unter Druckbeanspruchung das für FVK typische linear-elastische Verhalten aufweist. Eine Auswertung der Daten zeigt, dass der Elastizitätsmodul aller geprüfter Materialien unter Druckbeanspruchung jenem unter Zug entspricht. Anders als beim E-Modul sind bei Betrachtung der Ergebnisse aus Abbildung 2-5 hinsichtlich der Bruchdehnung und -festigkeit deutliche Unterschiede zwischen den Materialien festzustellen. So ergeben sich für CFK aufgrund der hohen Steifigkeit bei kleiner Festigkeit geringe Bruchdehnungen, welche zudem eine hohe Streuung vorweisen. Es ist daher davon auszugehen, dass für dieses Material nicht mit ausreichender Sicherheit gesagt werden kann, dass der Bemessungswert der Bruchdehnung größer als die Bruchstauchung des Betons ist. Die Ergebnisse zu GFK zeigen im Gegensatz dazu die höchsten Festigkeiten. Der Grund hierfür wird in dem für Glasfasern hohen Durchmesser der Einzelfasern gesehen, welches zu einer höheren Knicklast der Fasern auf mikroskopischer Ebene führt. Darüber hinaus ist der Streubereich bei dieser Faserart unabhängig von Stabdurchmesser und Hersteller gering, was für die Zuverlässigkeit der Ergebnisse spricht. Die Ergebnisse bzgl. der BFK – Bewehrung sind für weitere Untersuchungen von untergeordnetem Interesse, da weder eine vorteilhafte Steifigkeit, noch hohe Festigkeiten erreicht werden und die Streuung darüber hinaus groß ist.

## VERFORMUNGSVERHALTEN VORGESPANNTER BETONBAUTEILE MIT GFK-SPANNGLIEDERN

Dominik Hiesch

Die Verwendung von Bewehrung aus Faserverbundkunststoffen (FVK) ermöglicht durch deren hohe Zugfestigkeit sowie gute Korrosionsresistenz den Bau schlanker und dauerhafter Betonbauteile. Die üblicherweise geringen Elastizitätsmoduln gängiger FVK-Bewehrungsstäbe aus Glas- oder auch Carbonfasern führen jedoch bei schlaff bewehrten Bauteilen im gerissenen Zustand II zu deutlich größeren Verformungen aufgrund der im Vergleich zu Stahlbetonbauteilen stark reduzierten Biegesteifigkeit. Um diesem Problem entgegenzuwirken und gleichzeitig die Zugfestigkeit der Bewehrung besser ausnutzen zu können, kann die Bewehrung vorgespannt werden. Neben dem Nachweis der Verformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, wobei in Anlehnung an Stahlbetonbauteile gemäß Eurocode 2 [1] die Verformung auf  $1/250$  der Spannweite zu begrenzen ist, muss jedoch bei der Verwendung vorgespannter FVK-Spannglieder auch die Verformung im Grenzzustand der Tragfähigkeit untersucht werden. Aufgrund des linear-elastischen Materialverhaltens der FVK-Bewehrung ohne Fließvermögen können die üblichen Duktilitätskriterien im Hinblick auf eine hinreichende Versagensvorankündigung nicht materialeseitig erfüllt werden. Stattdessen kann dies jedoch auf Bauteilebene, in Form einer ausreichenden Verformbarkeit des Bauteils, Berücksichtigung finden. Infolgedessen ist für den Bemessungslastfall ein Mindestwert der Bauteilverformungen zu definieren. Hierzu schlagen Osman-Letelier et al. [2] einen Wert von  $1/100$  der Spannweite vor, bei dem eine optische Versagensankündigung bereits erkennbar ist.



Abbildung 2-6: Herstellung und Prüfung eines Bauteils mit vorgespannten GFK-Spanngliedern

Zur Quantifizierung des Verformungsverhaltens vorgespannter Betonbauteile mit FVK-Spanngliedern wurden im Rahmen einer experimentellen Untersuchung, wie in Abbildung 2-6 für Bauteil V-1 dargestellt, Betonbauteile mit GFK-Spanngliedern im sofortigen Verbund hergestellt und in einem Vierpunktbiegeversuch geprüft. Im Zuge der Nachrechnung der Versuchsergebnisse wird ein Berechnungsmodell verwendet, welches die Steifigkeitsentwicklung des vorgespannten Bauteils detailliert erfasst und somit die auftretenden Verformungen in ihrer Form und Größe bestmöglich approximiert. Abbildung 2-7 zeigt in diesem Zusammenhang die gute Übereinstimmung von Versuch und Berechnung exemplarisch für das Bauteil V-1. Bei den Abschnittsgrenzen handelt es sich in Anlehnung an die oben genannte Literatur um  $1/250$  der Spannweite für den Gebrauchslastfall und  $1/100$  der Spannweite für den Bemessungslastfall.

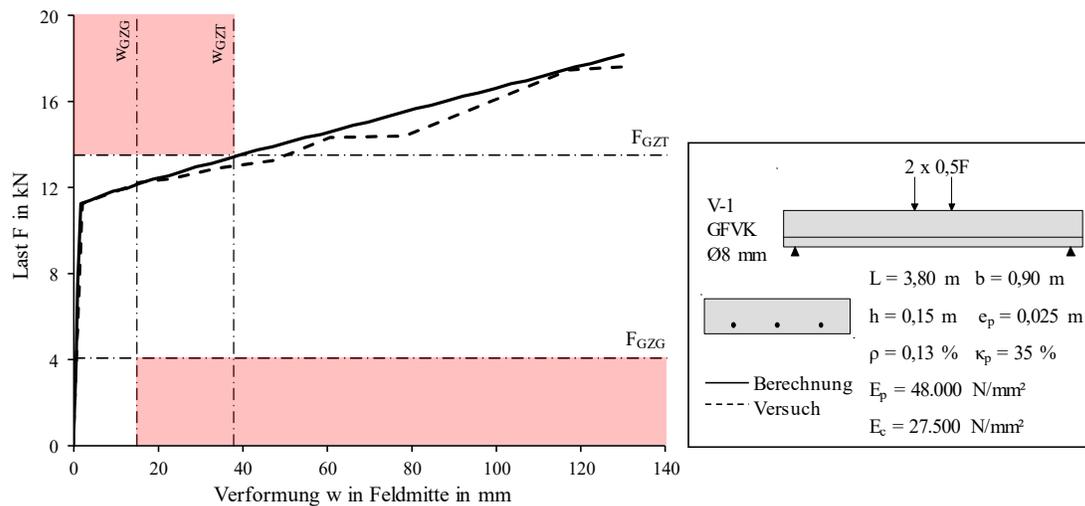


Abbildung 2-7: Last-Verformungskurve und Randbedingungen des Bauteilversuchs V-1

Auf Grundlage dieses Berechnungsmodells sowie einer erweiterten experimentellen Studie unter Variation des Bewehrungsgrades  $\rho$ , des Vorspanngrades  $\kappa_p$  sowie der Spanngliedausmitte  $e_p$  sind schließlich die vorgeschlagenen Verformungsgrenzen für ein breites Anwendungsspektrum zu überprüfen und eine wirtschaftlich sowie technisch optimierte Bauteilkonzeption für vorgespannte Betonbauteile mit FVK-Spanngliedern abzuleiten.

[1] DIN EN 1992-1-1/NA. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

[2] Osman-Letelier, J. P.; Hückler, A.; Schlaich, M. (2021) Dünnwandige Fertigteile aus vorgespanntem Carbonbeton. Beton- und Stahlbetonbau. <https://doi.org/10.1002/best.202100019>

## BEMESSUNGSVORSCHLAG ZUR BEGRENZUNG DER RISSBREITEN BFK-BEWEHRTER BETONBAUTEILE

Dr.-Ing. Sebastian Hofmann

Die Verwendung alternativer Bewehrungsmaterialien, wie z. B. faserverstärkten Kunststoffe (FVK) ist Bestandteil aktueller Forschungsvorhaben. Die hier untersuchte Bewehrung besteht aus basaltfaserverstärktem Kunststoff (BFK) und hat eine straffumwickelte und besandete Oberflächenbeschaffenheit. Die mechanischen Eigenschaften unterscheiden sich grundlegend gegenüber denen von konventionellem Bewehrungsstahl. Des Weiteren ist die Oberfläche aufgrund der Werkstoffeigenschaften viel weicher und glatter als Betonrippenstahl. Aus diesem Grund liegen im Beton andere Verbundeigenschaften vor.

Die Berechnung der Rissbreite in bewehrten Betonbauteilen ist von der mittleren Verbundspannung zwischen Beton und Bewehrung abhängig, welche infolge der Bewehrungszugspannungen in das Bauteil eingeleitet werden. In dem Bemessungsmodell nach DIN EN 1992-1-1 wird für Betonstahl ein konstantes Verhältnis der mittleren Verbundspannung in Abhängigkeit von der Betonzugfestigkeit von  $\tau_{bm} = 2,25 \cdot f_{ctm}$  zugrunde gelegt. Für BFK-Bewehrung liegt jedoch kein konstantes Verhältnis der Verbundspannung und der Betonzugfestigkeit vor [1].

Zur Bemessung der Rissbreite wird der maximale Rissabstand  $s_{cr,max,d}$  herangezogen, welcher für die straff umwickelte und besandete BFK-Bewehrung wie folgt berechnet werden kann:

$$s_{cr,max,d} = 2 \cdot k \left[ l_{t,max} \leq l_t \right] \\ = 0,604 \cdot k \left[ \sqrt{\frac{f_{ctm}}{\rho_{f,eff}}} \cdot \left( \frac{E_f}{(1 + \alpha_f \cdot \rho_{f,eff})} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left( \frac{\sigma_f}{\sqrt{f_{cm}}} \right)^{\frac{3}{4}} \leq \sqrt{\sigma_{t2}} \cdot E_f^{\frac{1}{4}} \cdot \left( \frac{\sigma_f}{\sqrt{f_{cm}} \cdot (1 + \alpha_f \cdot \rho_{f,eff})} \right)^{\frac{3}{4}} \right] \quad (1)$$

$$k = \sqrt{\frac{48}{f_{cm}}} \quad (2)$$

Ist der maximale Rissabstand bekannt, kann über die Differenz der Dehnungen die maximale Rissbreite nach Gl. (3) analog zum Stahlbetonbau berechnet werden. Dabei muss jedoch eine Überprüfung der Bewehrungsdehnung im Riss erfolgen. Diese Bedingung kann aus DIN EN 1992-1-1/NA übernommen werden und ist im zweiten Term der Gl. (4) berücksichtigt. Somit

kann unter Heranziehung des maximalen Rissabstandes aus Gl. (1) multipliziert mit der Differenz der Dehnungen zwischen Beton und Bewehrung  $\Delta\varepsilon$ , die maximale Rissbreite  $w_{cr,max,d}$  abschließend bestimmt werden.

$$w_{cr,max,d} = s_{cr,max,d} \cdot \Delta\varepsilon \quad (3)$$

$$\Delta\varepsilon = (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{1}{E_f} \left( \sigma_{f2} - \beta_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{f,eff}} \cdot (1 + \alpha_f \cdot \rho_{f,eff}) \right) \geq (1 - \beta_t) \cdot \frac{\sigma_{f2}}{E_f} \quad (4)$$

Dabei ist:

$E_f$  E-Modul der Zugbewehrung;  $\sigma_{f2}$  Bewehrungsspannung im Zustand II  
 $\rho_{f,eff}$  effektiver Bewehrungsgrad;  $\alpha_f$   $E_f / E_c$   
 $\beta_t$  Verteilungsbeiwert der mittleren Spannungen der BFK-Bewehrung ( $\beta_t = 0,57$  für kurzzeitige Einwirkung und  $\beta_{t,\infty} = 0,38$  für dauerhafte Einwirkungen)

Mit dem Ansatz der Materialparameter der Bewehrung und einer maximal zulässigen Rissbreite von  $w_{cr,max} = 0,4$  mm wurde mit Hilfe von Gl. (3) ein indirektes Bemessungsdiagramm in Abhängigkeit der wirkenden Bewehrungsspannung und des verwendeten Stabdurchmessers erstellt (vgl. Abbildung 2-8), womit eine einfache und effiziente Bemessung für die Begrenzung der Rissbreite möglich ist.

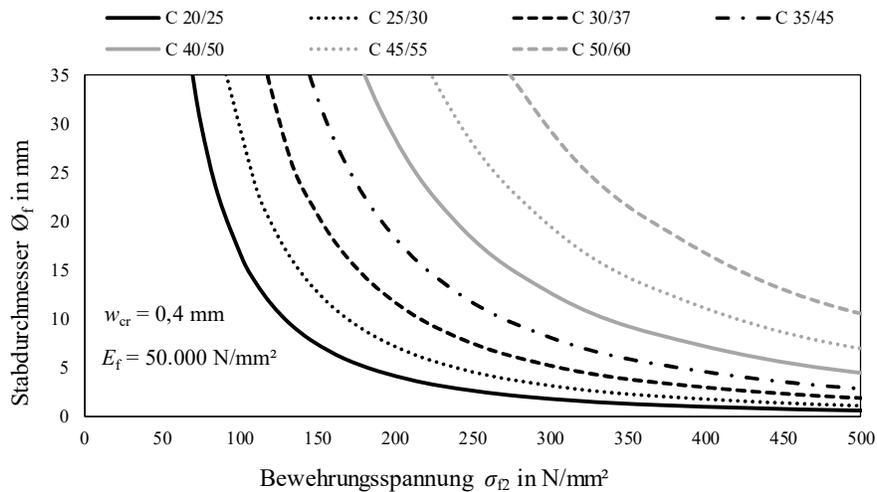


Abbildung 2-8: Indirekte Bemessung der Rissbreite aus[2]

[1] Hofmann, S.; Tran, N.; Proske, T.; Graubner, C.-A. (2020): Cracking behaviour of BFRP reinforced concrete. An approach for the determination of crack spacing and crack width, In: Structural Concrete 2020. S. 2178–2190. Wiley

[2] Hofmann, Sebastian (2021): Rissentwicklung in Betonbauteilen mit Basaltfaserkunststoffbewehrung. Ein Modell zur Berechnung der Rissbreite bei wirklichkeitsnaher Betrachtung des Verbundverhaltens. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2021

## TRAGVERHALTEN STATISCH UNBESTIMMTER ZWEIFELDTRÄGER MIT GFVK-BEWEHRUNG

Jonas Klein

Das Tragverhalten von Betonbauteilen mit einer Bewehrung aus faserverstärktem Kunststoff (FVK) war in den letzten Jahren Gegenstand einer Vielzahl von experimentellen Untersuchungen. Während die überwiegende Mehrheit dieser Untersuchungen an statisch bestimmten Einfeldsystemen durchgeführt wurden, sind nur wenige Untersuchungsergebnisse zu statisch unbestimmten Bauteilen vorhanden. Aus diesem Grund wurden am Institut für Massivbau Untersuchungen an Zweifeldträgern durchgeführt. Die Bauteile waren mit Bewehrungsstäben aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFVK) der Marke Schöck Com-BAR [1] bewehrt. Neben der Schlankheit der Träger (Feldlänge 2,25 m bzw. 3,00 m) wurde zudem der Bewehrungsgrad sowie das Verhältnis von Feld- zu Stützbewehrung variiert. Die Balken wurden durch jeweils eine Einzellast in Feldmitte bis zum Versagen belastet. In Abbildung 2-9 ist exemplarisch der Versuchskörper 2.25m\_02 dargestellt.

Auf die Anordnung einer Schubbewehrung aus Betonstahl oder GFVK wurde aus Gründen der Praxisnähe sowie der sehr limitierten Verfügbarkeit von GFVK-Bügeln verzichtet. Erwartungsgemäß versagten die meisten Bauteile infolge Biegeschub- bzw. Schubversagen im Bereich des Mittelauflegers, wo die Schubschlankheit mit  $a/d = 6,2$  (Feldlänge 3,00 m) bzw.  $a/d = 4,7$  (Feldlänge 2,25 m) am geringsten war. Auffällig war hierbei, dass die rechnerische Schubtragfähigkeit – ermittelt nach Muttoni [2] – in jedem Versuch weit überschritten wurde. Bis zum Versagen der Bauteile stellten sich abhängig vom Bewehrungsgrad ein für GFVK-Bauteile typisches Rissbild ein.



Abbildung 2-9: Versuchskörper 2.25m\_02

Über die Messung der Auflagerkraft unter dem mittleren Auflager konnten – unter Annahme einer in beiden Feldern gleichen Lasteinleitung – die im Bauteil vorherrschenden Schnittgrößen ermittelt werden. Es zeigt sich, dass sich diese nach Erreichen des Rissmoments deutlich zu den höher bewerten Querschnittsbereichen umlagerten.

Abschließend sind in Abbildung 2-10 und Abbildung 2-11 exemplarisch die Kraft-Durchbiegungs-Verläufe zweier Versuchskörper dargestellt. Die Verformungen wurden zudem mit zwei analytischen Ansätzen berechnet. Hierzu wurde der in [1] vorgeschlagene Ansatz nach DAfStb-Heft 533 sowie die Berechnungsmethode nach ACI 440.1R-15 [3] verwendet. Es zeigt sich eine größtenteils gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen, wobei der Ansatz nach [1] die Verformungen teilweise leicht über- und der Ansatz nach [3] teilweise unterschätzt. Dennoch lässt sich sagen, dass sich die Durchbiegungen von GVFK-bewehrter Zweifeldsystemen mit beiden Berechnungsmethoden sinnvoll voraussagen lassen.

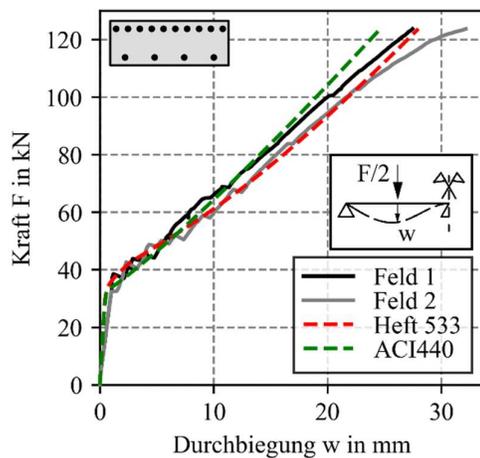


Abbildung 2-10: -Durchbiegungs-Diagramm Balken 2.25m\_01

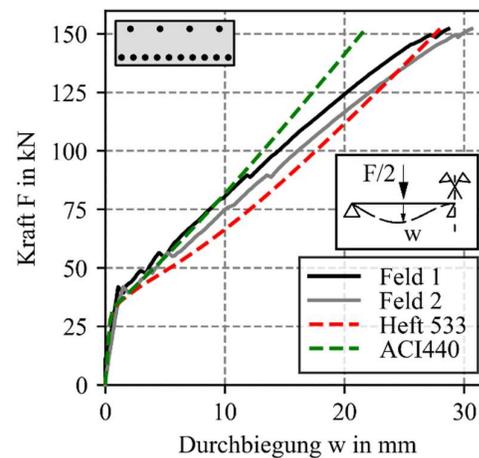


Abbildung 2-11: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm Balken 2.25m\_03

[1] Z-1.6-238 (2019): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung - Bewehrungsstab Schöck ComBAR aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt).

[2] Muttoni, A.; Ruiz, M. F.; Cavignis, F. (2018): Shear in members without transverse reinforcement: from detailed test observations to a mechanical model and simple expressions for codes of practice. In: fib Bulletin 85: Towards a rational understanding of shear in beams and slabs, S. 17–32. Fédération Internationale du Béton.

[3] ACI 440.1R-15 (2015): Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. Farmington Hills, Michigan, USA. American Concrete Institute.

## MODIFIZIERTE TEILSICHERHEITSBEIWERTE FÜR BESTEHENDES VOLLZIEGELMAUERWERK

Dominik Müller

Um im Zuge von Umbaumaßnahmen die Tragfähigkeit bestehenden Mauerwerks in geeigneter Weise bewerten zu können, sind Teilsicherheitsbeiwerte erforderlich, welche die Besonderheiten von Bestandsmauerwerk explizit berücksichtigen. Zu diesen Besonderheiten gehört unter anderem die verglichen mit heutigem Mauerwerk oftmals stark erhöhte Materialstreuung älteren Bestandsmauerwerks, die aufgrund eines geringen Stichprobenumfangs bei der Materialprüfung zumeist sehr begrenzte Kenntnis der tatsächlich vorhandenen Festigkeiten sowie ein im Vergleich zur Neubauplanung gegebenenfalls reduzierter Ziel-Zuverlässigkeitsindex.

Im Rahmen eines am Institut für Massivbau durchgeführten „Zukunft Bau“-Forschungsvorhabens [1] sowie einer darauf aufbauenden Dissertation [2] wurde daher eine entsprechende Methode zur Bestimmung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  für die Druckfestigkeit von Bestandsmauerwerk entwickelt. Grundgedanke dieser Methode ist, dass es nicht einen einzelnen geeigneten Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  für Bestandsmauerwerk gibt. Aufgrund der großen Vielfalt bestehenden Mauerwerks und unterschiedlicher jeweiliger Randbedingungen sind vielmehr bauwerksspezifische Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  zu ermitteln. Diese hängen von der Anzahl durchgeführter Prüfungen der Stein- und Mörteldruckfestigkeit (alternativ Verbundkörperprüfungen), der dabei festgestellten Materialstreuungen sowie dem für das betrachtete Bauteil festgelegten Ziel-Zuverlässigkeitsindex ab. Die Methode ist in [1] und [2] einschließlich ihrer Entwicklung ausführlich dargestellt und für die praktische Anwendung aufbereitet.

Die entwickelte Methode wurde auf reale Prüfdaten bestehender Mauerwerksgebäude angewandt, um zu sehen, welche Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  üblicherweise daraus resultieren. Betrachtet wurde dabei ausschließlich Vollziegelmauerwerk. Der überwiegende Anteil der herangezogenen Gebäude stammt aus den Jahren 1850 bis 1950. Insgesamt wurden 78 Grundgesamtheiten bestehenden Mauerwerks von 67 Gebäuden untersucht, für die mindestens jeweils drei Stein- und Mörtelproben von mindestens zwei Entnahmestellen geprüft wurden. Eine Grundgesamtheit umfasste dabei jegliches Mauerwerk eines Gebäudes, das der gleichen Mauerwerksart (d. h. der gleichen Stein-Mörtel-Kombination) zuzuordnen ist.

Die Auswertung erfolgte zum einen für einen Ziel-Zuverlässigkeitsindex von  $\beta_{t,50a} = 3,8$  (Bezugszeitraum 50 Jahre), was dem in EN 1990:2002 für Neubauten mittlerer Schadensfolge-

klasse definierten Zuverlässigkeitsniveau entspricht. Zum anderen wurden Teilsicherheitsbeiwerte für einen Ziel-Zuverlässigkeitsindex von  $\beta_{t,1a} = 3,3$  (Bezugszeitraum 1 Jahr) ermittelt. Dieses Zuverlässigkeitsniveau wird in ISO 2394:2015 bei mittleren Schadensfolgen sowie hohen relativen Kosten zur Erreichung eines bestimmten Zuverlässigkeitsniveaus empfohlen. Letztere Annahme ist bei Bestandsbauten auf Grund der hohen Kosten nachträglicher Verstärkungsmaßnahmen in der Regel zutreffend. Die relativen Häufigkeiten der resultierenden Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  sind in Abbildung 2-12 dargestellt.

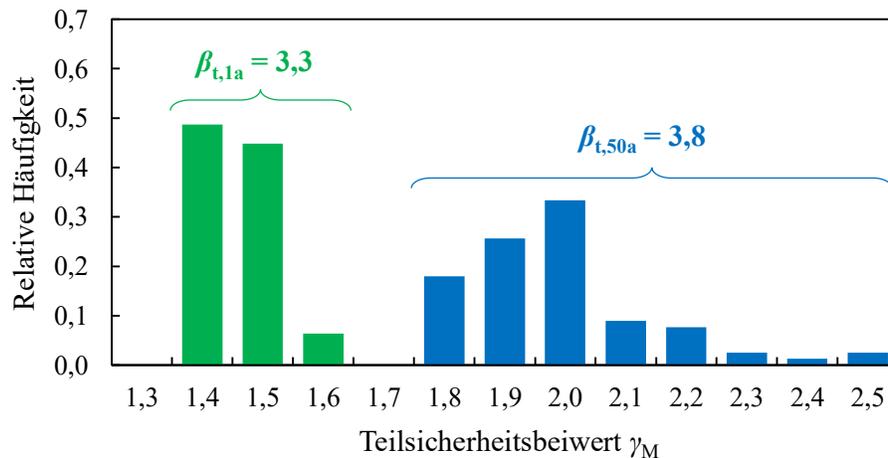


Abbildung 2-12: Resultierende Teilsicherheitsbeiwerte bei Anwendung der entwickelten Methode auf 78 Grundgesamtheiten bestehenden Vollziegelmauerwerk

Es ist ersichtlich, dass der resultierende Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  wesentlich vom gewählten Ziel-Zuverlässigkeitsindex abhängt. Für die betrachteten Gebäude ergibt sich bei Ansatz des für Neubauten gängigen Zuverlässigkeitsindex im Durchschnitt ein Teilsicherheitsbeiwert von etwa  $\gamma_M = 2,0$ . Die deutliche Erhöhung gegenüber dem in DIN EN 1996-1-1/NA:2019 für Neubauten festgelegten Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_M = 1,5$  ergibt sich aus den üblicherweise wesentlich höheren Materialstreuungen sowie der statistischen Unsicherheit aus dem begrenzten Stichprobenumfang. Wird  $\beta_{t,1a} = 3,3$  angesetzt, so ergibt sich im Durchschnitt ein Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_M = 1,45$ . Die erhöhten Unsicherheiten werden demnach durch den reduzierten Ziel-Zuverlässigkeitsindex mehr als kompensiert. Es sei abschließend angemerkt, dass der reduzierte Ziel-Zuverlässigkeitsindex zusätzlich eine Absenkung der Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungsseite rechtfertigt, siehe hierzu auch [2].

[1] Müller, Dominik; Proske, Tilo; Graubner, Carl-Alexander (2021): Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Mauerwerkswände im Bestand. Bonn: BBSR-Online-Publikation 24/2021.

[2] Müller, Dominik (eingereicht): Probabilistic Assessment of Existing Masonry Structures – The Influence of Spatially Variable Material Properties and a Bayesian Method for Structure-Specific Partial Factors. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.

### **2.3 FORSCHUNGSFELD: MINERALISCHE UND ÖKOLOGISCHE BAUSTOFFE**

Die Schwerpunkte im Forschungsgebiet „Mineralische und ökologische Baustoffe“ liegen in den Bereichen ökologisch optimierter Konstruktionsbetone, ökologisch optimierter Bindemittel, selbstverdichtender Betone und Frischbetondruck auf Schalungen.

Ziel im Forschungsschwerpunkt „Ökologisch optimierte Konstruktionsbetone“ ist die Entwicklung von sogenannten „Green Concretes“ oder „Ökobetonen“. Diese Betone sind derart zusammengesetzt, dass die aus der Herstellung der Ausgangsstoffe und der Betonherstellung resultierende Umweltbelastung möglichst gering ist. In mehreren Forschungsprojekten werden unter Beteiligung der Betonfertigteilindustrie und Transportbetonhersteller derzeit Ökobetone entwickelt, mit denen in naher Zukunft tragende Betonbauteile hergestellt werden können.

Durch die Reduzierung des Wassergehaltes, die Umstellung auf ein Hochleistungsfließmittel und eine deutliche Erhöhung des Kalksteinmehlgehaltes wurde eine signifikante Reduzierung des Klinkeranteils bei Beibehaltung der Betondruckfestigkeit erreicht. Insgesamt weisen die zementreduzierten „Ökobetone“ gegenüber der herkömmlich eingesetzten Betone ein um ca. 30 % bis 60 % verringertes Treibhauspotential auf.

**KALKSTEINMEHL UND HÜTTENSAND ALS BETONZUSATZSTOFFE**

Christian Herget

Um die weltweiten Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren, muss auch die Betonindustrie mit neuen Verfahren und Betonrezepturen einen großen Beitrag leisten. Um die schädigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen des Portlandzementklinkers mit 0,82 t CO<sub>2</sub>/t Klinker zu reduzieren, kann der Portlandzementklinker durch andere Klinkerersatzstoffe oder Betonzusatzstoffe ersetzt oder ergänzt werden. Darunter fallen reaktive Stoffe, wie Hüttensandmehl, Flugasche oder calcinierte Tone, als auch inerte Füller aus Gesteinsmehlen. Gesteinsmehle, wie Kalksteinmehl, das in der Norm bereits als Zementhauptbestandteil erlaubt ist, sind weltweit in sehr großen Mengen verfügbar. Durch die einfache Mahlbarkeit von Kalkstein und die vergleichsweise hohe Druckfestigkeit des Gesteins eignet sich dieser sehr gut, um Portlandzementklinker zu ersetzen. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass das Kalksteinmehl aufgrund seiner inerten Eigenschaften nur eine physikalische Mitwirkung auf die Festigkeit und Dauerhaftigkeit besitzt. Dadurch muss der Wassergehalt abgesenkt werden. Durch die physikalischen, die Packungsdichte verbessernden Eigenschaften des Kalksteinmehls wurde jedoch gezeigt, dass diese eine geringe Mitwirkung auf die Druckfestigkeit erzielen und somit theoretisch als Betonzusatzstoff auf den w/z-Wert angerechnet werden können, um einen äquivalenten w/z<sub>eq.</sub>-Wert zu erreichen [1].

Mit solchen Anrechenbarkeitsfaktoren für Kalksteinmehl und Hüttensandmehl, auch k-Wert genannt, ist es möglich, die Gehalte von Portlandzementklinker in umweltfreundlicheren Ökobetonen deutlich zu reduzieren. Es wird gezeigt, dass bei einem konstanten äquivalenten w/z-Wert, unter Anrechnung von Kalksteinmehl mit  $k_{KSM} = 0,15$ , eine Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons mit Basiszement erreicht wird. Durch die Anrechnung von Hüttensand ( $k_{HÜS} = 0,6$ , EN 206-1) werden jedoch höhere Festigkeiten und auch Karbonatisierungstiefen, innerhalb der normativen Grenzen, erzielt, wie in Abbildung 2-13 dargestellt ist. Hierbei sind CEM I a und b jeweils die beiden Basiszemente der Untersuchungen. Dadurch lassen sich bei einer Anrechnung von bis zu 50 M.-% Kalksteinmehl etwa 30 % der zementbasierten Emis-

onen im Beton einsparen. Dabei werden Kalksteinmehl und Hüttensand zu 100 % auf den Zementgehalt angerechnet, wodurch der Leimgehalt, der für die Dauerhaftigkeit und Verarbeitbarkeit des Betons ist, konstant gehalten wird.

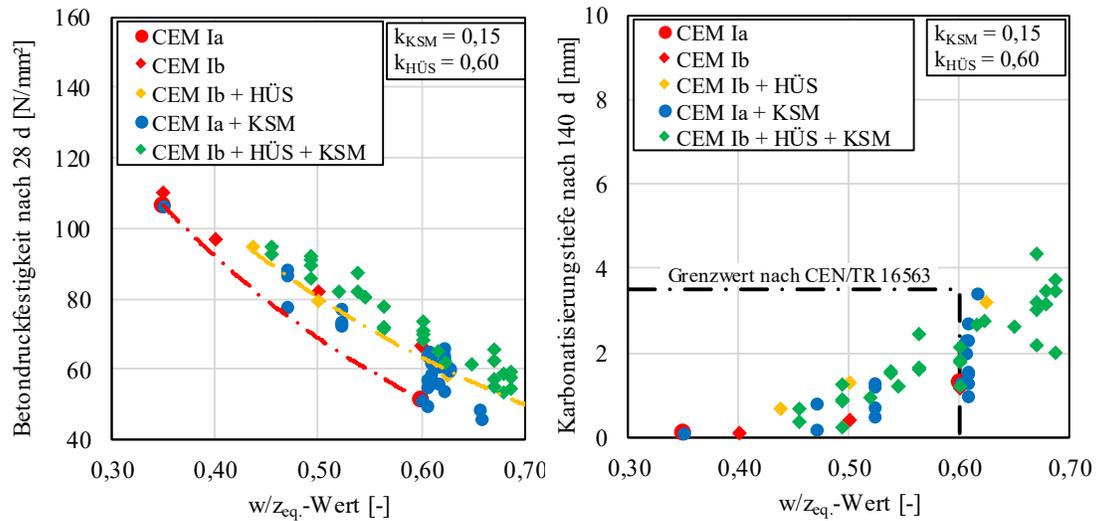


Abbildung 2-13: Vergleich zwischen dem äquivalenten w/z-Wert und der Betondruckfestigkeit (links) sowie Karbonatisierungstiefe (rechts) bei Kombinationen von CEM I, Hüttensand (HÜS) und Kalksteinmehl (KSM) [1]

Durch die Verwendung von Hüttensand und Kalksteinmehl als Betonzusatzstoffe kann die Zusammensetzung der Betone feiner abgestuft werden, sodass gewünschte Festigkeiten und Dauerhaftigkeiten genau erreicht werden. So ist es theoretisch logistisch möglich mit 3 Silos innerhalb eines Betonwerks 11 Zemente nach DIN EN 197-1/-5 intern herzustellen, je nachdem welche Zusammensetzung erforderlich ist. Dadurch ist ein effizienter Einsatz von Portlandzementklinker und Betonzusatzstoffen möglich.

[1] Herget, C., Müller, A., Proske, T., Rezvani, M., Graubner, C.-A.: Kalksteinmehl als Betonzusatzstoff – Vorschlag für die Anrechenbarkeit auf den Zementgehalt und Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Reduktion im Betonbau. Beton- und Stahlbetonbau 109 (2021), S. 202.

## **ABSENKUNG DES MINDESZEMENTGEHALTES FÜR DIE HERSTELLUNG UMWELTFREUNDLICHER BETONE**

Anna Louisa Müller

Mit einer jährlichen Produktionsmenge von ca. 4 Mrd. t Zement, ist die Zement- und Betonindustrie für 8 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Ein möglicher Ansatz zur Verbesserung der Ökobilanz von Beton ist neben der Substitution des Portlandzementklinkers im Zement eine Absenkung des Zementgehaltes im Beton auf das notwendige Minimum. Um eine ausreichende Dauerhaftigkeit von Beton sicherstellen zu können, enthält DIN 1045-2:2008 Grenzwerte für den Mindestzementgehalt und den maximalen Wasser-Zement-Wert (w/z-Wert) in Abhängigkeit der Expositionsklasse. In Deutschland ist der Mindestzementgehalt schon seit über 100 Jahren normativ verankert und hat sich seither nur geringfügig verändert. Da sich Zemente und Betonzusatzmittel, vor allem im Bereich von Hochleistungsfließmitteln, jedoch stark weiterentwickelt haben, sind diese Werte kritisch zu hinterfragen.

Studien, wie z.B. [1; 2], haben bereits gezeigt, dass die Druckfestigkeit im Beton nicht nur vom vorhandenen w/z-Wert, sondern auch vom Leimgehalt im Beton abhängig ist. Je geringer dabei die Leimschichtdicke zwischen den Gesteinskörnern bzw. je geringer der Abstand zwischen den Zementpartikeln untereinander ist, desto höhere Druckfestigkeiten werden erreicht. Um die Eignung ökologischer Betone mit Zementgehalten unterhalb der Grenzen der Norm weiter zu untersuchen, wurden Betonmischungen mit Zementgehalten zwischen 320 und 200 kg/m<sup>3</sup> Beton hergestellt. Der w/z-Wert betrug dabei für alle Mischungen 0,6. Dies hat bei reduzierten Zementgehalten eine deutliche Abnahme des Leimvolumens zur Folge. Um die Verarbeitbarkeit und die Verdichtbarkeit des Betons dennoch zu gewährleisten, wurde die Sieblinie der Gesteinskörnung einer U8 bzw. der U16 Sieblinie angenähert, da diese einen sehr geringen Wasseranspruch aufweisen. Neben Sand und Kies wurde den Betonmischungen zusätzlich 7 M.-% Quarzfeinsand mit einem Mehlkornanteil von 68 % zugegeben. Dadurch konnte mit einer moderaten Fließmittelzugabe bei allen Mischungen eine weiche Konsistenz (Ausbreitmaße von ca. 43 cm) und eine gute Verdichtbarkeit erreicht werden.

Abbildung 2-14 zeigt die Druckfestigkeiten von Betonen mit unterschiedlichen Zement- bzw. Leimgehalten nach 2 und 28 Tagen. Dabei wurden die Betone mit einem Größtkorn von 8 und 16 mm hergestellt. Die Abbildung verdeutlicht, dass sich die Druckfestigkeiten mit sinkendem Zementgehalt nicht verschlechtern. Insgesamt sind die Druckfestigkeiten mit kleinerem Größtkorn etwas höher. Dafür ließen sich die Mischungen mit größerem Größtkorn besser verarbeiten, sodass der Zementgehalt bis auf  $200 \text{ kg/m}^3$  abgesenkt werden konnte. Erste Ergebnisse der Prüfungen der Karbonatisierungstiefe, dem Chlorideindringwiderstand und dem Frost-Tau-Widerstand zeigen ebenfalls, dass die Dauerhaftigkeitseigenschaften bei reduzierten Zementgehalten und konstantem w/z-Wert konstant bleiben bzw. besser werden.

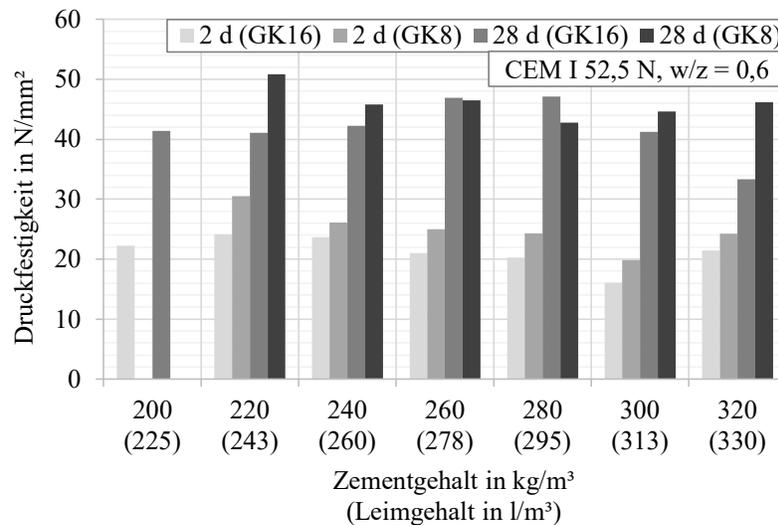


Abbildung 2-14: Betondruckfestigkeit nach 2 und 28 Tagen in Abhängigkeit des Zementgehaltes

[1] Haist, M., Moffatt, J. S., Breiner, R., Müller, H. S.: Entwicklungsprinzipien und technische Grenzen der Herstellung zementarmer Betone. Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), S. 202–215.

[2] Chu, S. H.: Effect of paste volume on fresh and hardened properties of concrete. Construction and Building Materials 218 (2019), S. 284–294.

## 2.4 FORSCHUNGSFELD: ENERGIE UND NACHHALTIGKEIT

### Forschungsgebiet: Energieforschung

Die Bundesregierung hat sich bis zum Jahr 2050 ambitionierte Klimaschutzziele gesetzt: Mindestens 80 % des deutschen Bruttostromverbrauchs und 60 % des Bruttoendenergieverbrauchs sollen durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Gebäude nehmen bei diesem Vorhaben eine Schlüsselrolle ein, denn der Gebäudebestand steht nicht nur für ein Viertel des jährlichen Endenergieverbrauchs, sondern bildet ebenso eine zentrale Schnittstelle zwischen dem Strom-, Wärme- und Mobilitätssektor. Vor allem im Quartiersverbund können innovative Energietechnologien effizient, umweltverträglich sowie wirtschaftlich eingesetzt werden und zu einer verstärkten Kopplung der drei Sektoren führen.

Das Institut für Massivbau leistet einen essentiellen Beitrag für das Energiesystem von morgen, bspw. durch die zeitlich hoch aufgelöste Abbildung von Energiebedarfen, dynamische Simulation von Energiekonzepten oder Entwicklung von Strategien zur sinnvollen Verwertung von Energieüberschüssen.

### Forschungsgebiet: Nachhaltigkeit im Bauwesen

Vor dem Hintergrund der fortschreitenden Zerstörung unserer Umwelt gewinnen Aspekte einer nachhaltigen und dauerhaft umweltgerechten Entwicklung zunehmend an Bedeutung. Das Gebiet des Bauwesens stellt in diesem Zusammenhang ein großes Entwicklungspotential. Faktoren, wie eine hohe Ressourcenbindung, komplexe Emissionen und in der Praxis noch oft vorherrschende eingeschränkte Anwendung der integralen Planung sind nur einzelne Elemente eines weiten Handlungsfelds, das gleichermaßen von ökonomischer, ökologischer und sozialer Bedeutung ist.

Die Forschung auf dem Gebiet der nachhaltigen Entwicklung gehört seit 1997 zu den zentralen Arbeitsfeldern des Instituts für Massivbau. Zur Durchführung einer ganzheitlichen Analyse und Beurteilung von Bauwerken über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg wurden in den vergangenen Jahren eine Reihe an Softwaretools entwickelt. Von der Planungs-, über die Erstellungszur Betriebs- und Entsorgungsphase können somit alle relevanten ökonomischen und ökologischen Merkmale eines Bauwerks über den Gebäudelebenszyklus erfasst und bewertet werden.

## **ABSCHÄTZUNG DES EIGENVERBRAUCHS VON STROM AUS GEBÄUDENAHEN PHOTOVOLTAIKANLAGEN**

André Müller

Bei der Planung von gebäudenahen Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) sind Planer und Planerinnen sowie Bauherren und Buherinnen im Rahmen der Entscheidungsfindung häufig mit dem Problem konfrontiert, den Eigenverbrauchsanteil des über die PV-Anlage erzeugten Stroms verlässlich abzuschätzen. Diese Größe ist für die betriebswirtschaftliche Optimierung der Anlagengröße unter heutigen Marktbedingungen entscheidend. Während die Verfahren zur energetischen Bilanzierung im Rahmen des öffentlich-rechtlichen Nachweises der Gebäudeenergieeffizienz den Eigenverbrauchsanteil überschätzen und nur Strombedarfe zur thermischen Gebäudekonditionierung berücksichtigen, erfordern am Markt verfügbare Simulationsprogramme einen hohen Planungsaufwand. [1] Vor diesem Hintergrund wurde eine Formel zur Abschätzung des PV-Eigenverbrauchsanteils aus einer Parameterstudie abgeleitet, welche die Bestimmung des Eigenverbrauchsanteils in Abhängigkeit vom Verhältnis des Jahresertrages der PV-Anlage zum Gesamtstromverbrauchs eines Haushalts erlaubt.

Die Grundlage der Parameterstudie ist das Modell zur Simulation von Nutzerverhalten in Wohngebäuden nach Wörner [2]. Die damit ermittelten 400 Nutzerprofile für Anwesenheit sowie Strom- und Warmwasserbedarf werden in einer Parameterstudie mit dem dynamischen Simulationsprogramm IDA ICE für ein Einfamilienhaus mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe als Erzeuger für Raumwärme und Warmwasser verwendet um PV-Eigenverbrauchsanteile zu berechnen. Insgesamt ergeben sich aus der Parameterstudie 56.000 Datenpunkte für die in Tabelle 1 dargestellten Varianten des Simulationsmodells und PV-Jahreserträge zwischen 2 MWh und 20 MWh (für Schrittweiten von 2 MWh berechnet, vgl. [1]; siehe Abbildung 2-15).

Der PV-Eigenverbrauchsanteil wurde im Rahmen der Parameterstudie mit einer Bilanzzeitschrittweite von 5 Minuten errechnet. Im Zuge der optischen Überprüfung von Regressionsgleichungen konnte ein logarithmischer Ansatz identifiziert werden, der eine gute Übereinstimmung mit dem Verlauf der Punktwolke ergab ( $R^2 = 0,9712$ ). Die daraus resultierende Schätzfunktion ist in Gleichung (1) formuliert. Eine Absicherung der Formel über statische Auswertungen ist aktuell allerdings noch offen und ein Inhalt zukünftiger Untersuchungen.

$$c_{\text{Eigenverbrauch}} = -0,147 \ln(v) + 0,5958 \quad (1)$$

Tabelle 1: Variierte Parameter der Studie und deren Werte

Parameter	Beschreibung	Werte
Gebäudeeffizienzniveau	Wärmeschutzniveau der Gebäudehülle des Simulationsmodells (vgl. Tabelle2 in [1])	Modernisiert; GEG; KfW40 <sub>2020</sub>
Solltemperatur der Innenräume	Konstantes Solltemperaturprofil mit einer Nachtabsenkung zwischen 23:00 Uhr und 6:00 Uhr	20 °C - 3 K; 21 °C - 3 K; 22 °C - 3 K
Standort bzw. Klimadatensatz	Testreferenzjahr (TRY) 2015; Standorte definiert nach VDI 4655 (2019)	Potsdam; Mannheim; Garmisch-Partenkirchen
Ausrichtung des Dachfirsts	0° ist Nord-Süd-Ausrichtung; Zählrichtung gegen den Uhrzeigersinn	0°; 45°; 90°; 135°

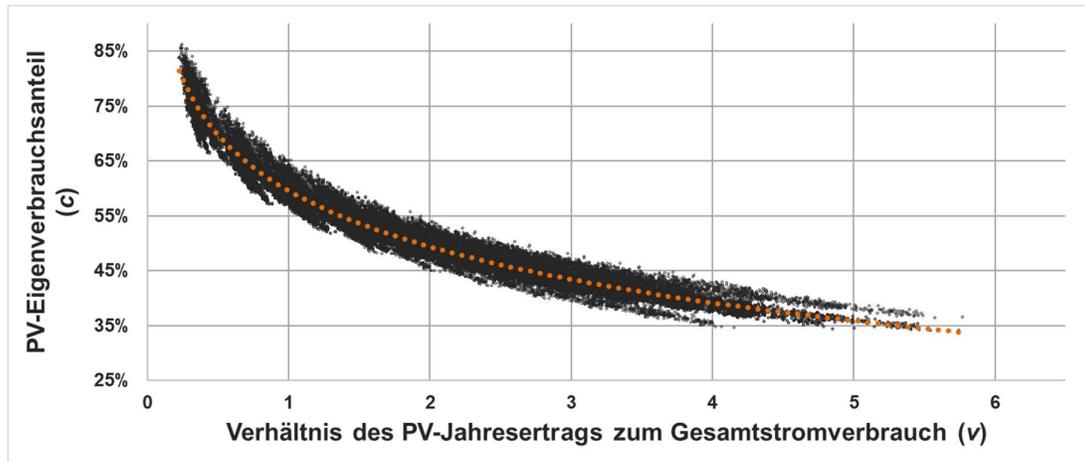


Abbildung 2-15: Eigenverbrauchsanteile für die 56.000 Datenpunkte der Parameterstudie mit PV-Jahreserträgen von je 2 MWh bis 20 MWh

### Danksagung

Die hier präsentierten Untersuchungen erfolgten im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsvorhabens EG2050:E4Q – Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Energieversorgung vernetzter Quartiere, welches durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wird (FKZ 03EGB0014A/B).

[1] Müller, André; Koert, Johannes; Wörner, Patrick (2021): Household specific self-consumption of photovoltaic-based power generation – a comprehensive parametric study to increase the reliability of energy consulting. In: Proceedings of the 17th IBPSA International Conference and Exhibition, Building Simulation 2021, 1.-3. September 2021, Brügge, Belgien.

[2] Wörner, Patrick (2020): Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Stromverbrauch in Wohngebäuden – Entwicklung eines komplexen Simulationsmodells für energetische Analysen. Dissertation. Darmstadt: Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt.

## BEWERTUNGSTOOL FÜR SANIERUNGSKONZEPTE VON TYP-QUARTIEREN

Johannes Koert

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft geförderten Forschungsprojekt „Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Energieversorgung vernetzter Quartiere (E4Q)“ wurde am Institut für Massivbau ein Tool entwickelt, welches für den Variantenvergleich von Sanierungs- und Energieversorgungskonzepten von Typquartieren verwendet werden kann.

Dem Tool zugrunde liegen die Ergebnisse umfangreicher Simulationen der Energiebedarfsprofile der Typquartiere in verschiedener Ausführung bzgl. der Bauteilqualitäten, Klima- und Nutzungsrandbedingungen sowie der Anlagentechnik zur Wärmeerzeugung, -speicherung und -übergabe auf Gebäude- und Quartiersebene. Zudem sind im Tool Datensätze zu Kosten und Umweltwirkungen von Bauteilen und Komponenten der Anlagentechnik hinterlegt. Nutzende des Tools haben die Möglichkeit sich den Status Quo des betrachteten Quartiers sowie die zu untersuchenden Sanierungsvarianten mittels einer implementierten graphischen Benutzeroberfläche zu definieren. Daraufhin lassen sich automatisiert die Ökobilanz und Lebenszykluskosten der Varianten berechnen. Die verwendeten Berechnungsmethoden stellen hierbei eine Weiterentwicklung des Vorgehens von Weißmann [1] dar.

Als Bewertungsergebnisse werden die Indikatoren Treibhausgaspotenzial (GWP), nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf ( $PE_{ne}$ ), Kapitalwert ( $C_0$ ), Investitionskosten ( $I_0$ ), Endenergiebedarf ( $Q_f$ ) sowie der erneuerbare Deckungsanteil ( $Q_{g,reg}/Q_f$ ) und der Eigennutzungsgrad des erneuerbar erzeugten Stroms ( $\eta_{self}$ ) ausgegeben. Damit lassen sich die ökonomischen, ökologischen und energetischen Dimensionen des Entscheidungsproblems beschreiben.

Beispielhaft sind in Abbildung 2-16 die Ergebnisse einer Bewertung dargestellt. Ein Blockrandquartier aus den 1960ern wird im unsanierten Ausgangszustand mit dezentraler erdgasbetriebener Wärmeversorgung angenommen. Als Sanierungsvarianten werden eine Vernetzung der Wärmeversorgung unter Einsatz eines zentralen mit Erdgas betriebenen Blockheizkraftwerks (BHKW) mit zwei unterschiedlichen Dämmniveaus der Gebäudehüllen betrachtet. Es lässt sich erkennen, dass die zweite (höher gedämmte) Variante in den energetischen und ökologischen Indikatoren besser bewertet wird. Sowohl die Investitionskosten als auch der Kapitalwert der Lebenszykluskosten sind jedoch bei dieser Variante höher, da die höhere Investition

der Dämmung nicht durch die Energieeinsparungen amortisiert werden kann. Für welche Variante die Anwendenden sich entscheiden, liegt an der individuellen Präferenz der Gewichtung der Bewertungsindikatoren.

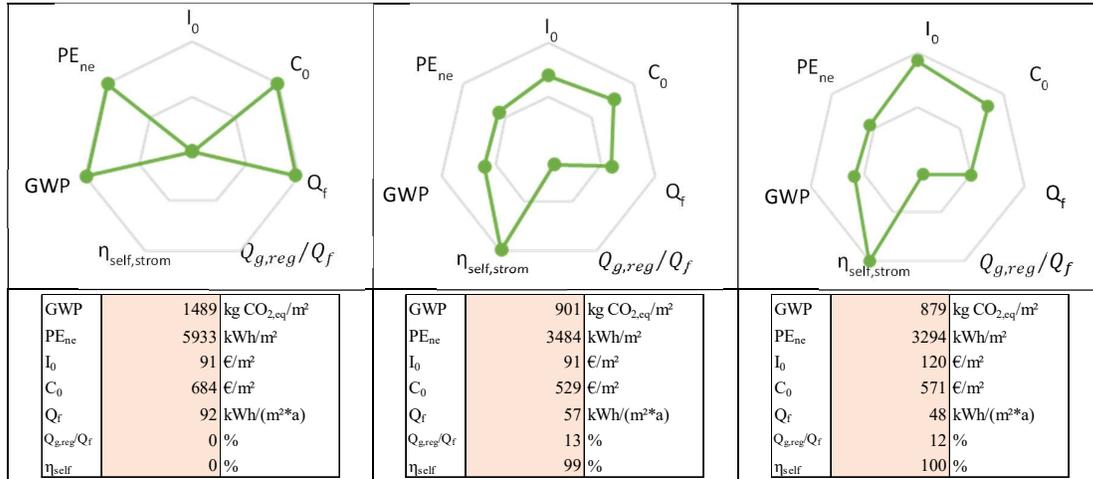


Abbildung 2-16: Bewertungsindikatoren einer beispielhaften Untersuchung des Blockrandquartiers im Status Quo unsaniert mit dezentralen Gaskesseln(links), zentrales BHKW mit  $H_T$  85% zu GEG-Niveau (Mitte) und zentralem BHKW mit  $H_T$  55 % zu GEG-Niveau (rechts).

- [1] Weißmann, Claudia (2017): Effizienter Einsatz erneuerbarer Energieträger in vernetzten Wohnquartieren: Entwicklung eines simulationsbasierten Verfahrens zur energetischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.