



DAS
BAYERISCHE
BAUGEWERBE

HOCHSCHULPREIS
des Bayerischen Baugewerbes

2024

WETTBEWERBSBEITRÄGE

IMPRESSUM

Herausgeber

Stiftung Berufsförderung Bayerisches Baugewerbe
Bavariaring 31 | 80336 München
Telefon +49 89 76 79 - 0 Telefax +49 89 76 79 - 154

info@lbb-bayern.de | www.lbb-bayern.de

Mit Beiträgen von

Enes Aksoy • Franziska Albrecht • Franziska Amberger • Wolfgang Dempert • Nicolas Gabriel • Dac Ho • Bruna Lourenco • Erika Matjuch • Max Peetz • Raphael Pichlmayr • Cornelius Puth • Anthea Putz • Jakob Tantz • Lara Alexandra Zapfe • Johanna Zentner

Redaktion

RA Andreas Demharter (verantwortlich)

Gestaltungskonzept, Layout und Realisation

Landesverband Bayerischer Bauinnungen
Bavariaring 31 | 80336 München
Telefon +49 89 76 79 - 0 Telefax +49 89 76 79 - 154

info@lbb-bayern.de | www.lbb-bayern.de

Bildquellen

Autoren, falls nicht abweichende Angabe am jeweiligen Bild

Druck

Druck + Verlag Ernst Vögel GmbH Kalvarienbergstraße 22 | 93491 Stamsried www.voegel.com

München, im April 2024

VORWORT

Die Stiftung Berufsförderung Bayerisches Baugewerbe schreibt jährlich den Hochschulpreis des Bayerischen Baugewerbes aus. Herausragende Bachelor- und Masterarbeiten der Fachrichtung Bauingenieurwesen mit hohem Praxisbezug für die Anwendung in Unternehmen der klein- und mittelständisch geprägten Bauwirtschaft und nachvollziehbarer, verständlicher Darstellung werden ausgezeichnet. Der Preis wird 2024 zum 16. Mal vergeben.

In der vorliegenden Veröffentlichung werden die Arbeiten in der von den Verfassern gelieferten Zusammenfassung in alphabetischer Reihenfolge herausgegeben. Zu jeder Arbeit gibt es ergänzende Informationen zu Verfasser, Betreuer und Auszeichnung.

In diesem Jahr wurden insgesamt sechsundzwanzig Bachelor- und Masterarbeiten von

- der Technischen Universität München,
- der Hochschule für angewandte Wissenschaften München,
- der Technischen Hochschule Nürnberg Georg-Simon-Ohm und der
- Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg.

eingereicht. Aus den sechsundzwanzig Arbeiten hat der Wettbewerbsausschuss entschieden, vier Arbeiten mit einem Geldpreis und elf Arbeiten mit einer Teilnahmeurkunde auszuzeichnen. In diesem Jahr gab es eine außergewöhnliche Vielfalt an Themen und Technologien, die geeignet sind, zukünftig neue Akzente im Baugewerbe zu setzen. Erstmals haben mehrere Teilnehmer KI-Technologien zur Lösung sehr unterschiedlicher Probleme im Baugewerbe eingesetzt.

Mit dem **1. Preis** und einem Geldbetrag von 3.000,- Euro wird Frau Franziska Amberger für ihre Masterarbeit „Experimentelle Untersuchungen von Schubwänden aus Mauerwerk unter Erdbebenbeanspruchung“ ausgezeichnet.

Den **2. Preis** und einen Geldbetrag von 2.000,- Euro erhält Herr Max Peetz für seine Bachelorarbeit „Bemessung eines WU-Kellers aus Stahlfaserbeton mithilfe einer material-spezifischen Implementierung in einem FEM System“.

Der **3. Preis** wird dieses Jahr unter zwei Teilnehmern aufgeteilt:

500,- Euro erhält Herr Enes Aksoy für seine Bachelorarbeit „Effiziente Zeitdatenerfassung im Bauwesen: Eine KI-basierte Analyse und Regelsetzung zur Steigerung der Datenqualität und Granularität“

sowie 500,- Euro Frau Erika Matjuch für ihre Bachelorarbeit „Potenziale zur nachhaltigen Umgestaltung und Optimierung von Betonkonstruktionen“.

Der Wettbewerbsausschuss:

Benedikt Baumann
 Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann
 Georg Gerhäuser
 Brigitte Nagy
 Prof. Dr.-Ing. Thomas Neidhart
 Axel Neißer-Deiters
 Klara Maria Santer
 Thomas Schneider
 Olaf Techmer
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel

Inhaltsverzeichnis

Enes Aksoy , Bachelorarbeit Effiziente Zeitdatenerfassung im Bauwesen: Eine KI-basierte Analyse und Regelsetzung zur Steigerung der Datenqualität und Granularität	Seite 3
Franziska Albrecht , Bachelorarbeit Softwareentwicklung zur Bemessung und zum Wirtschaftlichkeitsvergleich von Fundamenten im Fertigteilbau	Seite 8
Franziska Amberger , Masterarbeit Experimentelle Untersuchungen von Schubwänden aus Mauerwerk unter Erdbeben beanspruchung	Seite 13
Wolfgang Dempert , Masterarbeit Untersuchungen zur Modellbildung und dem Langzeitverhalten von Holz-Beton-Verbund- Konstruktionen anhand numerischer Berechnungen	Seite 18
Nicolas Gabriel , Masterarbeit Der Einfluss von Energieeffizienz auf den Immobilienpreis	Seite 23
Dac Ho , Masterarbeit Potentiale von BIM-basierten Bauwerksmodellen – Konzeption eines holistischen Prozessmodells	Seite 28
Bruna Lourenco , Master's Thesis Verbesserung der Nachhaltigkeitsbewertung: Ein multikriterieller Ansatz zur Entscheidungs- findung für die Bewertung von Baukonstruktionen	Seite 33
Erika Matjuch , Bachelorarbeit Potenziale zur nachhaltigen Umgestaltung und Optimierung von Betonkonstruktionen	Seite 38
Max Peetz , Bachelorarbeit Bemessung eines WU-Kellers aus Stahlfaserbeton mithilfe einer materialspezifischen Implementierung in einem FEM System	Seite 43
Raphael Pichlmayr , Masterarbeit Experimentelle Untersuchungen zum Kurz- und Langzeitverbundverhalten sowie zur Tragwirkung von Basaltfaserverbundkunststoffbewehrung (BFVK) in Recyclingbeton	Seite 48
Cornelius Puth , Masterarbeit Experimentelle Untersuchungen an vorgeschädigten großformatigen UHFSB-Normalbeton Verbundbauteilen Planung, Durchführung und Auswertung von 4-Punkt-Biegeversuchen	Seite 53
Anthea Putz , Masterarbeit Auswirkungen von Brandereignissen auf die Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Fahrbeton	Seite 58
Jakob Tantz , Bachelorarbeit Hanfkalk als Dämmstoff Untersuchungen zum praxisgerechten Einsatz und Bewertung der Treibhausgasemissionen des Baustoffs über den gesamten Lebenszyklus	Seite 63
Lara Alexandra Zapfe , Bachelorarbeit Erstellung einer Mischung aus selbstverdichtendem Beton zum Einsatz in Holz-Beton- Verbundbauteilen	Seite 68
Johanna Zentner , Masterarbeit Untersuchung zur Verbesserung der Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 mittels Biozementierung	Seite 73

EFFIZIENTE ZEITDATENERFASSUNG IM BAUWESEN: EINE KI-BASIERTE ANALYSE UND REGELSETZUNG ZUR STEIGERUNG DER DATENQUALITÄT UND GRANULARITÄT

Bachelorarbeit

Enes, Aksoy

Die Entwicklung digitaler Werkzeuge in der Bauindustrie bietet im Baumanagement neue Möglichkeiten der Erfassung von Leistungsdaten und der Effizienzsteigerung von Produktionsprozessen. Im Bauwesen ist die Implementierung von datengenerierenden Systemen komplex, da der Baubetrieb nicht ortsgebunden ist. Eine mögliche Lösung bietet der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) in Kombination mit kamerabasierter Bauzustandserfassung. Dabei wird die Erhebung einer hohen Anzahl von Daten mit einer bestimmten Detailtiefe angestrebt. Man spricht in der Informatik von der Granularität der Daten. Für die KI-basierte Datenerhebung ist es entscheidend, branchenspezifische Regeln zu beachten, um Qualität und Vergleichbarkeit von Daten zu garantieren. Eine hohe Datenqualität setzt die Aufbereitung der mittels KI gewonnenen Daten in der Form voraus, dass diese nach den branchenspezifischen Regeln verarbeitet werden. Zur Anwendung kommen die Regeln des Reichsausschusses für Arbeitszeitermittlung (REFA), dessen Methoden standardmäßig zur Analyse und Zeiterfassung im Bauwesen verwendet werden. In dieser Bachelorarbeit wird ein Verfahren angestrebt, bei dem mittels „Machine Learning“ die REFA-Vorgaben zur Erfassung von Zeitdaten in einen KI-Prozess integriert werden.

Keywords: Digitalisierung, KI-Baumanagement, Erfassung von Leistungsdaten, Effizienzsteigerung von Produktionsprozessen, REFA-Zeiterfassung, REFA-Methode der Multimomentaufnahme (MMA), kamerabasierte Zeitdaten, zeitnahe Leistungserfassung, Machine Learning

Leistungsdaten im Controlling

Für die Ausführung eines Bauprojektes ist es essenziell, stets den aktuellen Arbeitsfortschritt zu kennen, um Störungen oder Abweichungen des geplanten Bauablaufs rechtzeitig zu identifizieren und gegebenenfalls gegenwirken zu können.

Dabei übernehmen kurze Informationswege eine Schlüsselrolle [1].

Die während der Bauausführung gewonnene Zeit- und Leistungsdaten erlauben notwendige Soll-Ist-Vergleiche, um den Baufortschritt hinsichtlich der Sollvorgaben zu überwachen und bei Abweichungen korrigierend einzugreifen [2].

Relevanz von zeitnahen Daten

Effektives Controlling im Bauwesen erfordert regelmäßige und zeitnahe Informationsbeschaffung. Dies kann entweder durch die Bauleitung oder durch den Einsatz zusätzlichen Fachpersonals bzw. den Einsatz eines Dienstleisters erfolgen.

Die sog. Aufwandswerte sind dabei ein zentrales Instrument: Sie ermöglichen, zusammen mit vorhandenen Mengenangaben, die Prognose und Simulation des weiteren Bauverlaufs.

Auch für die Kalkulation und Arbeitsvorbereitung sind zuverlässige Aufwandswerte von großer Bedeutung. Diese erlauben eine genaue Preisgestaltung insbesondere bei Angeboten und bei der Entwicklung von Bauablaufplänen mit hoher Terminalsicherheit.

Bildinformationssysteme

Für die Bauablaufsteuerung ist es wichtig, effiziente Datenerfassungsmethoden zu entwickeln. Die TU Darmstadt hat in die Überwachung von Baustellen mittels Bildverarbeitung investiert. Dabei wurden photogrammetrische Soll-Ist-Vergleiche eines Bauablaufes durchgeführt, ohne jedoch Bauprozesse zu erkennen und zuzuordnen. Obwohl HEIM und PFLUG [3], [4] wichtige Beiträge zu einer zeitnahen Erfassung des Bauzustandes geleistet haben, sind bisherig untersuchte Ansätze aufgrund ihres hohen technischen Aufwands nur bedingt praxistauglich. Eine einfachere und schnellere Lösung könnte in einer kamerabasierten Baustellenüberwachung, mit automatisierter Ermittlung von Leistungsdaten durch den Einsatz von KI liegen. Dies wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit untersucht, wobei der Fokus auf der Einhaltung von branchenspezifischen Regeln zur Erfassung von Leistungsdaten liegt, damit Qualität und Vergleichbarkeit von generierten Daten sichergestellt werden.

Zeitdatenerfassung mittels KI

Bei dem in der Bachelorarbeit untersuchten Vorgehen werden mittels Kameras erfasste Bilder durch KI-Modelle begutachtet, welche die laufenden Bauprozesse erkennen, mit Start- und Endzeitpunkt versehen sowie die Anzahl der am Prozess beteiligten Arbeiter automatisch dokumentieren und einem Bauabschnitt bzw. Bauteil zuordnen (s. Abb. 1). Diese Methodik wird in der Informatik als sog. „Pipeline“ bezeichnet.

Durch eine automatisierte Ist-Erfassung kann der aktuelle Baufortschritt in Echtzeit eingesehen werden.



Abbildung 1: Automatisierte Prozesserfassung.
Quelle: oculai GmbH

Problemstellung und Zielsetzung

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Verbesserung der Erfassung von Zeit- und Personaldaten von Bauabläufen durch den Einsatz von KI: Einerseits soll die Anzahl und Detailtiefe von gewonnenen Daten verbessert werden. Andererseits ist es bei einer KI-basierten Datenerhebung entscheidend, dass branchenspezifische Regeln zur Ermittlung von Zeit- und Personaldaten beachtet werden.

Mittels KI-Modellen können aus Kameraaufnahmen Arbeitsprozesse automatisch erkannt und deren Gesamtdauer dem jeweiligen Prozess zugeordnet werden. Jedoch zeigen sich bei der Auswertung Schwächen im Hinblick der Beachtung der anerkannten Regeln zur Zeiterfassung im Bauwesen gemäß den Vorgaben des REFA-Verbandes. Daraus

resultiert die Notwendigkeit, Bauabläufe in Haupt- und Nebentätigkeiten zu unterscheiden.

Zielführend muss es sein, die Regeln der REFA-Arbeitszeitermittlung bei der KI gestützten Erfassung von Aufwandswerten zu integrieren.

Ermittlung von KI-Aufwandswerten

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden, die mittels Kamerabildern und KI-Analyse automatisch gewonnenen Zeitdaten einer Baustelle untersucht und ausgewertet.

Durch den Einsatz der KI ist es möglich, Arbeitszeiten zu erkennen und zu protokollieren. Auf diese Weise können Start- und Endzeitpunkt eines zu analysierenden Arbeitsprozesses erfasst werden. Dies ergibt die sogenannte Bruttobetriebszeit.

Der Fokus lag bei dem vorliegenden Untersuchungsobjekt auf der Analyse der Deckenschalungsarbeiten der Untergeschosse sowie der Ermittlung eines Aufwandswertes für vorgenannte Arbeiten.

Im ersten Schritt erfolgte die Ermittlung des Aufwandswertes automatisch durch die KI auf Grundlage der sichtbaren Arbeitszeit, also der Bruttoarbeitszeit (1), (s. Abb. 2).

Gemäß den Vorgaben der REFA-Arbeitszeiterfassung müssen jedoch Haupt-, Neben- und Pausenzeiten getrennt beurteilt werden. Dies wird in der vorgenannten automatischen Vorgehensweise nicht umgesetzt. Zur Bewertung und Korrektur des Mangels wurde je Prozess stichprobenartig eine manuelle Auswertung der Bilddaten durchgeführt. Dabei wurden Arbeitsprozesse aus Kamerabildern in zufällig gewählten Zeitintervallen erfasst und mittels eines Excel Tools in eine REFA-Multimomentaufnahme (MMA) überführt. Gleichzeitig wurden die Abweichungen der durch die KI automatisch ermittelten Aufwandswerte den Werten gemäß REFA-Methodik gegenübergestellt und korrigierende Zeitfaktoren zur Kompensierung des Fehlers berechnet. Die ermittelten Korrekturfaktoren wurden als

zusätzliche Berechnungsschleife, dem sog. MMA-LOOP, in die automatisierte Errechnung von Aufwandswerten implementiert. Dadurch wurden berechnete Aufwandswerte korrigiert und die Vorgaben der MMA-Methodik berücksichtigt (2).

Die Validierung der neu generierten Ergebnisse erfolgte auf der Grundlage von drei bisher im Bauwesen eingesetzten Methoden zur Gewinnung von Aufwandswerten. Es wurden die Nachkalkulation (NK) des ausführenden Bauunternehmens (3), eine gleichzeitig durchgeführte REFA-Zeitmessung und Aufwandswertermittlung des Instituts für Zeitwirtschaft und Betriebsberatung Bau (izb) (4) sowie die bereits existierenden Richtwerte aus den bekannten ARH-Tabellen (5) [5] herangezogen.

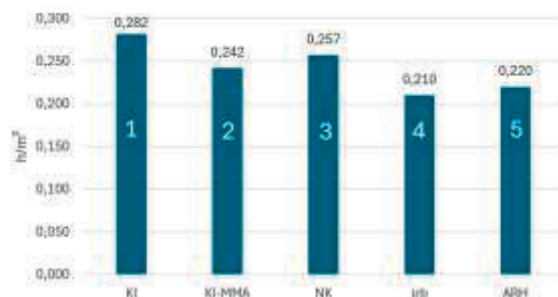


Abbildung 2: Vergleich der Aufwandswerte

Gegenüber den ermittelten Vergleichswerten des izb (4) und der ARH-Tabellen (5) ist zu erkennen, dass automatisch durch die KI generierte Aufwandswerte (1) zu hoch berechnet werden, da keine unproduktiven Zeiten berücksichtigt werden. Werden jedoch die automatisch durch die KI gewonnenen Aufwandswerte einem zusätzlichen Rechenschritt, dem bereits genanntem MMA-LOOP unterzogen, so ist erkennbar, dass sich die korrigierten Werte gut den Werten gemäß den REFA-Methoden annähern und somit vergleichbar werden. Die Vergleichswerte der Nachkalkulation des Unternehmens (3) fallen tendenziell höher aus, wobei die zuverlässige Einhaltung der REFA-Vorgaben nicht gesichert vorausgesetzt werden kann.

Ausblick zur Zeiterfassung mittels KI

Die automatisierte Errechnung der Aufwandswerte durch die KI mit implementierter Korrektur durch den MMA-LOOP ermöglicht eine genaue Analyse einzelner Arbeitsprozesse und führt zu arbeitstauglichen Ergebnissen.

Die KI erfasst gut sichtbare Prozesse, stößt aber bei der Zuordnung von Haupt-, Neben- und Pausenzeiten an Ihre Grenzen.

Zukünftiges Ziel muss die automatische Klassifizierung der Ablaufarten durch die KI in drei Kategorien, den Haupt-, Neben- und Pausenzeiten, sein (s. Abb. 3).

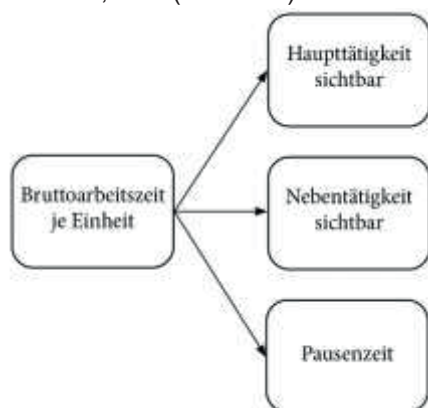


Abbildung 3: Kategorien der KI-MMA

Bisher kann die KI menschliche Abläufe nicht in Ihrer Produktivität differenzieren. Zur Verbesserung wurde im Rahmen dieser Bachelorarbeit ein MMA-LOOP (s. Abb. 4) entwickelt, der auf der Basis von manuell berechneten Korrekturfaktoren die KI bei der automatischen Ermittlung der Aufwandswerte respektiv korrigiert.

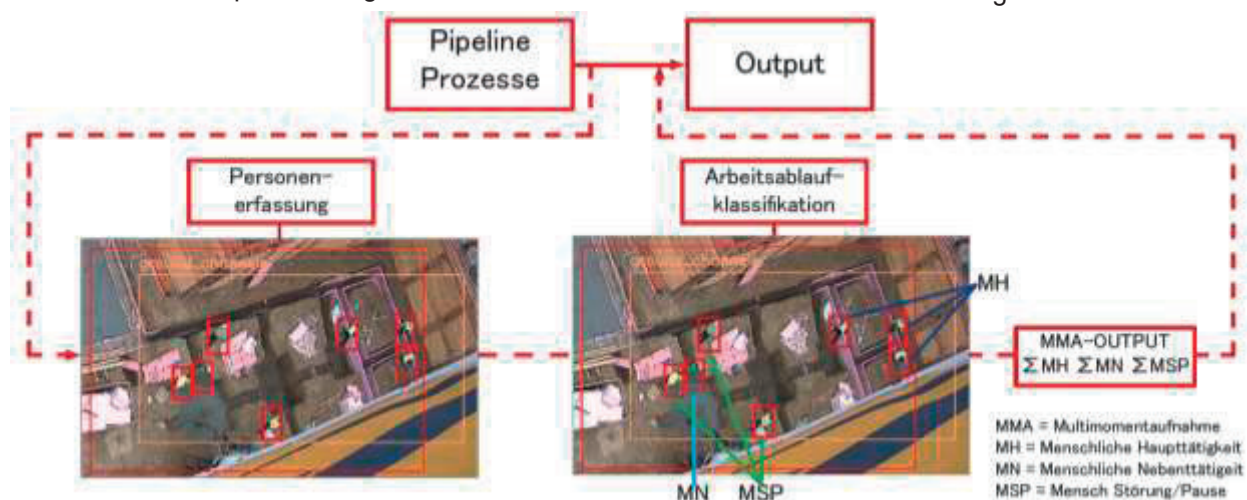


Abbildung 4: MMA-LOOP (MMA-Schleife)

Zukünftig müssen systematisch über die Prozessdauer hinweg in einem festen Rhythmus Überprüfungen durch die KI automatisch durchgeführt werden. Hierbei werden Arbeitskräfte mittels verschiedener KI-Modelle lokalisiert, spezifischen Tätigkeiten zugeordnet und hinsichtlich ihrer Produktivität klassifiziert.

Während des zukünftigen MMA-LOOPS müssen menschliche Ablaufabschnitte automatisch gezählt und summiert werden. Dies ermöglicht die Bildung von Zeitfaktoren zur Differenzierung in Haupt- und Nebentätigkeiten, um diese nachfolgend in den KI-Output zu integrieren.

Konklusion

Für ein effektives Baustellencontrolling sind aktuelle Leistungsdaten unerlässlich. Traditionelle Methoden wie die REFA-Arbeitszeitstudien erweisen sich als zu zeitintensiv und liefern nur zeitlich verzögerte Informationen.

Die Erfassung von Zeitdaten mittels KI ermöglicht zwar Echtzeit-Updates, leidet jedoch unter Präzisionsproblemen. Eine Lösung bietet die Integration des neu entwickelten MMA-LOOP-Ansatzes, der KI-Prozesse mit REFA-Methoden kombiniert, was einen bedeutenden Fortschritt darstellt.

In der Weiterentwicklung dieser Technologie sind zusätzliche Forschungen einer automatischen Erkennung oder Bewertung von Haupt-, Neben- und Pausenzeiten notwendig.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] G. Berg, *REFA in der Baupraxis - Teil 1 Grundlagen*. in REFA in der Baupraxis, no. 1. Frankfurt am Main: ztv-Verlag.
- [2] G. Girmscheid und C. Motzko, *Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft: Produktionsprozessorientierte Kostenberechnung und Kostensteuerung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-36637-6.
- [3] M. Heim, *Die zeitnahe Leistungsfeststellung von Baustellen - unter besonderer Berücksichtigung von Bildinformationssystemen -*, 1. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2002.
- [4] C. Pflug, „Ein Bildinformationssystem zur Unterstützung der Bauprozesssteuerung“, TU Darmstadt, 2008.
- [5] *ARH-Tabelle Systemschalung Decken und Handbuch Arbeitsorganisation Bau Richtzeiten Deckenschalung*, 6. Aufl. ztv-Verlag.

Für die Arbeit vornehmlich verwendete Quellen:

- 1. G. Berg, *REFA in der Baupraxis - Teil 1 Grundlagen*. in REFA in der Baupraxis, no. 1. Frankfurt am Main: ztv-Verlag.
- 2. G. Künstler, *REFA in der Baupraxis - Teil 2 Datenermittlung*, 2. Aufl. in REFA in der Baupraxis, no. 2. Frankfurt am Main: ztv-Verlag, 1986.
- 3. M. Heim, *Die zeitnahe Leistungsfeststellung von Baustellen - unter besonderer Berücksichtigung von Bildinformationssystemen -*, 1. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2002.
- 4. G. Girmscheid und C. Motzko, *Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft: Produktionsprozessorientierte Kostenberechnung und Kostensteuerung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-36637-6.

Autor

Enes Aksoy (B. Eng.)

Werkstudent MAUSS BAU GmbH (Erlangen). 2021.10 - 2023.01

Werkstudent oculai GmbH (München). 2023.02 - 2024.02

Bauleiter MAUSS BAU GmbH (Erlangen) seit 2024.03

Bachelor of Engineering. Fakultät Bauingenieurwesen. *Technische Hochschule Nürnberg*. 2020–2024.

◊ Vertiefung Baubetrieb.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm an der Fakultät Bauingenieurwesen unter der Betreuung von **Prof. Dipl.-Ing. Roland Kraus**.

Die Arbeit wurde mit dem 3. Preis ausgezeichnet.

SOFTWAREENTWICKLUNG ZUR BEMESSUNG UND ZUM WIRTSCHAFTLICHKEITSVERGLEICH VON FUNDAMENTEN IM FERTIGTEILBAU

Bachelorarbeit

Franziska, Albrecht

Im Fertigteilbau ist es in der Kalkulationsphase gängige Praxis, das Bauwerk hinsichtlich der Tragstruktur zu optimieren, um den Materialverbrauch zu reduzieren und Herstellungskosten zu sparen. Im Hinblick auf Fertigteilstützen kann die Gründung mithilfe von vier verschiedenen Fundamentarten erfolgen, die sich beispielsweise in ihrem Fundamentvolumen, der Einbindetiefe in den Baugrund oder dem Ort der Herstellung unterscheiden. Im Zuge dieser Arbeit wurde eine automatische Vorbemessung für die vier im Fertigteilbau gebräuchlichen Fundamentarten inklusive eines Kostenvergleichs programmiert, um der Baufirma eine Entscheidungsgrundlage für die Optimierung der Gründungsart von Fertigteilstützen zu liefern. Innerhalb der Software werden die Fundament-abmessungen im Rahmen einer Volumenoptimierung solange iterativ vergrößert, bis alle geotechnischen und stahlbetontechnischen Nachweise erfüllt sind, die auch in der späteren Endbemessung erforderlich werden. Die Kostenberechnung erfolgt anhand der vom Anwender vorgegebenen tagesaktuellen Baupreise. Trotz manchen vereinfachten Nachweisverfahren bei der Vorbemessung der Fundamente, liefert die erstellte Software gut brauchbare Ergebnisse für die Kalkulation. Es ist geplant, manche in der Software implementierten Nachweise weiterzuentwickeln, um die Anwendungsbandbreite zu vergrößern.

Keywords: Fertigteilbau, Fundamente, Ressourceneinsparung, Wirtschaftlichkeit, Digitalisierung, Rationalisierung, Vorplanung

Fundamentarten für Fertigteilstützen

Im Fertigteilbau sind vier Fundamentarten für Fertigteilstützen gebräuchlich: das Block- und Köcherfundament, das Fundament mit Schraub-

anschluss sowie das an die Fertigteilstütze angeformte Fundament. Abbildung 1 zeigt das angeformte Fundament, bei dem das Fundament und die Stütze im Fertigteilwerk biegesteif miteinander verbunden werden. Mit dieser Fundamentart kann eine geringe Gründungstiefe sowie eine kurze

Bauzeit durch den hohen Vorfertigungsgrad erzielt werden. Im Gegensatz dazu wird sowohl beim Block- als auch beim Köcherfundament die Stütze auf der Baustelle in das Fundament eingestellt und mithilfe des Zentrierkegels justiert. Infolge der erforderlichen Köcherhöhe ergibt sich bei diesen beiden Fundamentarten eine größere Gründungstiefe als beim angeformten Fundament (Abb. 2 und 3). Bei der vierten Fundamentvariante, dem Fundament mit Schraubanschluss, werden Stahleinbauteile in die Stütze und das Fundament einbetoniert. Anschließend werden beide Bauteile auf der Baustelle miteinander kraftschlüssig verschraubt und vergossen. Durch die geeignete Wahl an Stahleinbauteilen kann auch mit dieser Fundamentvariante eine geringe Gründungstiefe erzielt werden (Abb. 4) [1].

Problemstellung und Zielsetzung

Da im Bauwesen jede Baustelle einzigartig ist, hängt die Wahl der jeweiligen Fundamentart von den auf der Baustelle vorherrschenden Rahmenbedingungen ab. Es gibt bereits verschiedene wissenschaftliche Ansätze dazu, eine Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Fundamentarten durchzuführen. Beispielsweise wurde im Rahmen des Peikko Symposiums im Jahr 2018 die Bachelorarbeit von Herrn Gabriel Senft vorgestellt, der mithilfe der Daten von 14 Bauunternehmungen durch die Bildung von repräsentativen Mittelwerten eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt hat [2]. Bei einer datenbasierten Analyse ergeben sich jedoch die Nachteile, dass sich die Aussagekräftigkeit dieser Daten angesichts der heutigen Baupreisentwicklung schnell verschlechtern kann und dass möglicherweise nicht alle Rahmenbedingungen einer neuen Baustelle mit dem vorhandenen Datensatz abgebildet werden können. Aus diesem Grund wurde innerhalb dieser Bachelorarbeit eine Software erstellt, welche die vier im Fertigteilbau gebräuchlichen Fundamentarten in Abhängigkeit der tatsächlich vorherrschenden Baustellenbedingungen bemisst und anschließend einen analytischen Kostenvergleich mit den aktuellen Baupreisen durchführt.

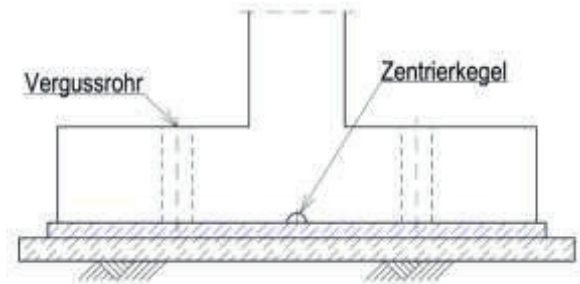


Abb. 1: Angeformtes Fundament (nach dem Regeldetail der Firma Glass)

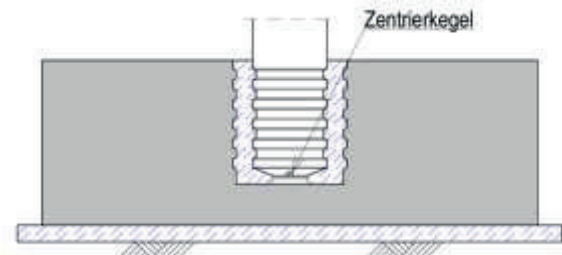


Abb. 2: Blockfundament (nach dem Regeldetail der Firma Glass)

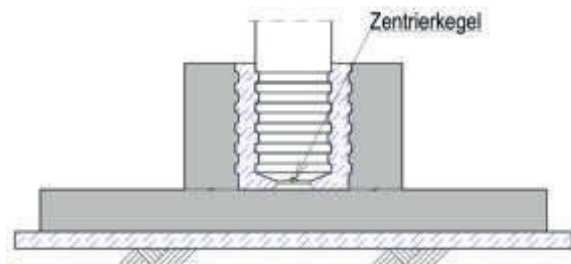


Abb. 3: Köcherfundament (nach dem Regeldetail der Firma Glass)

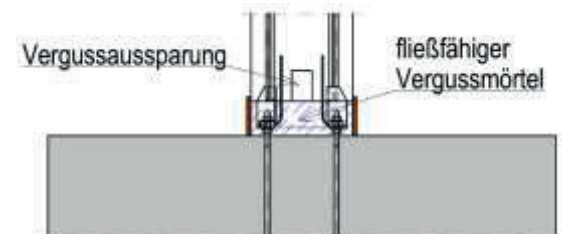


Abb. 4: Fundament mit Schraubanschluss (nach dem Regeldetail der Firma Glass)

Vorgehensweise

Bei der Entwicklung der Software bestand der erste Schritt darin, sich mit den normativen Nachweiskonzepten für die Fundamentbemessung auseinanderzusetzen. Im Bereich der Geotechnik wurden dabei die Nachweise der Sohldruckbeanspruchung, der Gleitsicherheit, der Grundbruchsicherheit, der Lagesicherheit sowie der Fundamentverdrehung und der klaffenden Fuge berücksichtigt. Des Weiteren wurden im Bereich des

Stahlbetons die Biegebemessung, der Durchstanznachweis, der Querkraftnachweis und die Anschlussbemessung der Stütze an das Fundament ausgearbeitet.

Nach der theoretischen Ausarbeitung der geotechnischen und stahlbetontechnischen Nachweise wurden diese anschließend innerhalb der Software Microsoft Visual Studio mit der Programmiersprache C# in eine Windows Desktop Anwendung implementiert. Bei C# handelt es sich um eine objektorientierte Programmiersprache, die eine unkomplizierte Programmierung von Anwendungen für das Betriebssystem Windows ermöglicht [3].

Zusätzlich zur Vorbemessung der Fundamente wurden auch die unternehmensinternen Kalkulationsansätze der Firma Glass GmbH Bauunternehmung in die Software eingearbeitet, damit eine aussagekräftige Kostenberechnung für die vier Fundamentarten durchgeführt werden kann.

Im letzten Schritt mussten die Berechnungsabläufe in der erstellten Software auf ihre Richtigkeit überprüft werden. Dazu wurden Vergleichsrechnungen händisch und mit kommerziellen

Bemessungsprogrammen für mehrere Praxisfälle durchgeführt. Die Ergebnisse der erstellten Software konnten anschließend mit den Ergebnissen aus den Vergleichsrechnungen validiert werden.

Programmiertechnische Umsetzung und Anwendung der Software

Bei der Anwendung der erstellten Software müssen zunächst Eingaben für die Vorbemessung und die Kostenberechnung vorgenommen werden. Für die Vorbemessung müssen beispielsweise die Bemessungslasten, die Stützengeometrie, Startwerte für die Fundamentgeometrie und die Baugrundeigenschaften vorgegeben werden. Für die Kostenberechnung werden dem Anwender innerhalb der erstellten Software bereits Einheitspreise vorgeschlagen, die jederzeit individuell an die aktuelle Preissituation angepasst werden können.

Das Flussdiagramm in Abbildung 5 zeigt, dass anhand dieser Vorgaben anschließend softwareintern eine Vorbemessung erfolgt, bei der die Abmessungen der vier Fundamentarten jeweils solange vergrößert werden, bis der Nachweis der

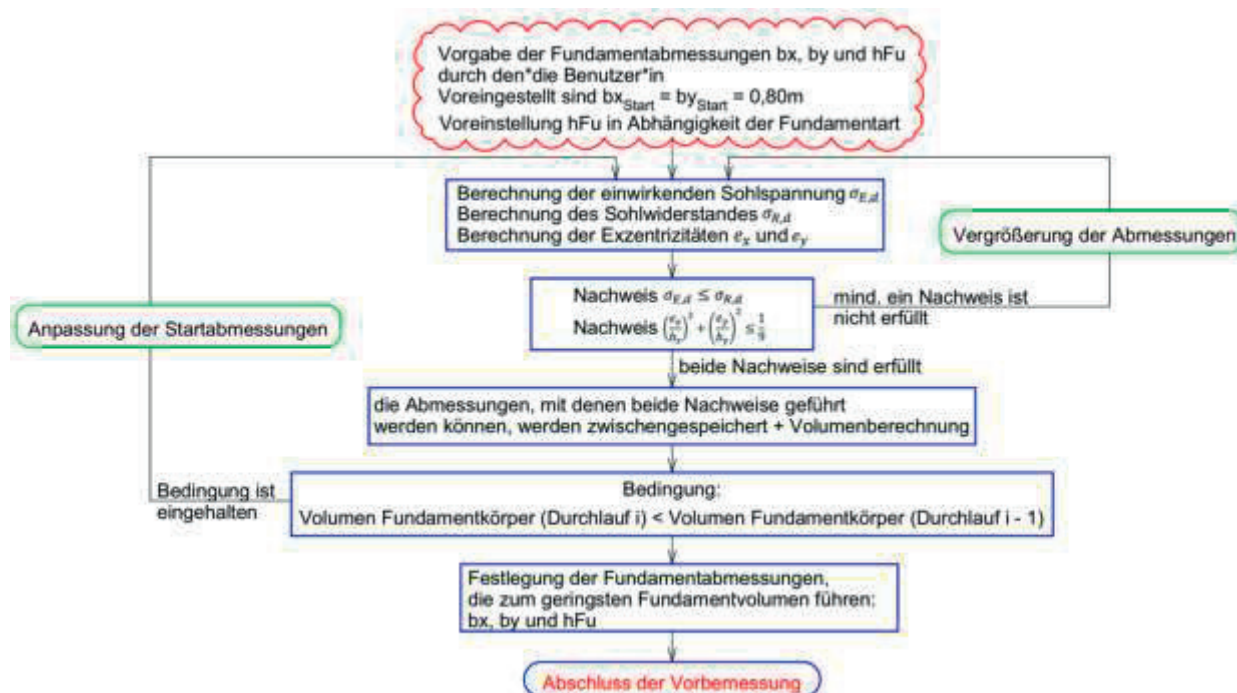


Abb. 5: Programmierablauf der Vorbemessung innerhalb der erstellten Software

Sohldruckbeanspruchung erfüllt ist. Die Vorbemessung wird dabei mehrmals mit modifizierten Startabmessungen durchlaufen und erst abgebrochen, wenn die Fundamentgeometrie gefunden wurde, die zum geringsten Fundamentvolumen führt. Nach der Vorbemessung werden alle geotechnischen Nachweise geführt, wobei die Fundamentabmessungen weiter vergrößert werden, wenn ein Nachweis nicht erfüllt ist.

Nachdem alle geotechnischen Nachweise geführt worden sind, stehen die Fundamentabmessungen von allen Fundamentarten fest. Jetzt werden die stahlbetontechnischen Nachweise geführt, um die erforderlichen Bewehrungsmengen für die abschließend durchgeführte Kostenberechnung zu erhalten. Bei der Implementierung der stahlbetontechnischen Nachweise wurde für die Biegebemessung das Spannungstrapezverfahren zur Schnittgrößenermittlung gewählt. Dort hat sich gezeigt, dass das Spannungstrapezverfahren im Falle einer klaffenden Fuge an seine Grenzen stößt, weil die Ergebnisse für die Bemessungsmomente hierbei zu gering ausfallen. Da die Umsetzung der Schnittgrößenermittlung nach der Plattentheorie im Rahmen dieser Arbeit jedoch deutlich zu umfangreich gewesen wäre, wurde eine kleine empirische Studie durchgeführt, um eine Lösung für das Problem bei der Schnittgrößenermittlung zu finden. In dieser empirischen Studie wurden unterschiedliche Varianten untersucht, mit denen die Ergebnisse aus dem Spannungstrapezverfahren erhöht werden können, um diese den Ergebnissen aus der Plattentheorie anzunähern. Die Studie führte zu der Erkenntnis, dass im Rahmen der Vorbemessung hinreichend genaue Ergebnisse für die Biegebemessung erzielt werden können, wenn im Fall einer klaffenden Fuge das Fundamenteigengewicht und die Fundamentaflast bei der Biegebemessung mit angesetzt werden.

Die Anwendung der Software soll nun nochmal mithilfe eines Beispiels erklärt werden. Es soll eine Innenstütze einer Industriehalle untersucht

werden, welche durch eine hohe Normalkraft sowie durch Anprall belastet wird. Es liegt nichtbindiger Baugrund vor und die Baustelle ist 50 km vom Fertigteilwerk entfernt. Nach der Berechnung erhält der Anwender neben der detaillierten Ausgabe von allen geführten Nachweisen die Herstellungskosten für die vier Fundamentarten für jeden Arbeitsvorgang aufgeschlüsselt in Material-, Lohn- und Gerätekosten. Im konkreten Fall einer Innenstütze stellt das angeformte Fundament die günstigste Variante dar. Der Preisunterschied zwischen dem angeformten Fundament und dem Köcherfundament kann dabei rund 800 € betragen. Je nach Hallengröße und der entsprechenden Fundamentanzahl kann sich die Differenz der Herstellungskosten signifikant aufsummieren.

Ergebnis

Vergleichsrechnungen mit kommerziellen Bemessungssoftwares für Fundamente haben gezeigt, dass die erstellte Software trotz mancher Vereinfachungen vernünftige Ergebnisse liefert. Im Zuge der derzeit laufenden Testanwendungsphase innerhalb der Firma Glass GmbH Bauunternehmung wird sich zeigen, wie groß das Einsparpotential von Ressourcen infolge der Vorbemessung und des Wirtschaftlichkeitsvergleichs mithilfe der erstellten Software sein wird.

Ausblick

Es bietet sich an, manche in der Software implementierten Nachweise weiterzuentwickeln, um die Anwendungsbandbreite zu vergrößern. Beispielsweise werden derzeit beim Nachweis der Sohldruckbeanspruchung für die Bemessungswerte des Sohlwiderstands die Erfahrungswerte aus DIN 1054 [4] herangezogen. Es wird beabsichtigt, den Programmiercode so anzupassen, dass der Anwender der Software entweder die Erfahrungswerte aus DIN 1054 [4] heranziehen oder den Bemessungswert des Sohlwiderstands aus dem Baugrundgutachten vorgeben kann.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Bachmann, H.; Tillmann, M.; Urban, S.: Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau. Betonkalender 2021, Berlin: Ernst & Sohn, 2021, S. 59-303.
- [2]: Peikko Group: Lösungen im Betonfertigteiltbau schnell und sicher umsetzen. Tagungsband zum Symposium. Stuttgart, 2018.
- [3]: Kotz, J.; Wenz, Ch.: C# und .NET 6: Grundlagen, Profiwissen und Rezepte. München: Carl Hanser Verlag, 2022.
- [4]: DIN 1054:2021-04: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
2. DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln für den Hochbau.
3. DIN EN 1997-1:2014-03: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009 + A1:2013
4. DIN 1054:2021-04: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.
5. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Heft 631: Hilfsmittel zur Schnittgrößenermittlung und zu besonderen Detailnachweisen bei Stahlbetontragwerken. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019.
6. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: Beispiele zur Bemessung nach Eurocode 2, Bd. 1: Hochbau. Berlin: Ernst & Sohn, 2011.

Autor

Franziska Albrecht, B.Eng.

Studium:

04/2023 – heute	Masterstudiengang Bauingenieurwesen an der TU München
10/2019 – 02/2023	Bachelorstudiengang Bauingenieurwesen an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München

Praxiserfahrung:

03/2023 – heute	Werkstudentin bei der Firma Glass GmbH Bauunternehmung
09/2018 – 02/2023	Verbundstudium bei der Firma Glass GmbH Bauunternehmung (schließt die Ausbildung zur Bauzeichnerin ein)

Betreuer

Die Arbeit wurde im Fachbereich Massivbau an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München in Zusammenarbeit mit der Firma Glass GmbH Bauunternehmung angefertigt. Betreut wurde die Arbeit durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Gebhard sowie durch Herrn Dipl.-Ing. Philipp Obert seitens der Firma Glass.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON SCHUBWÄNDEN AUS MAUERWERK UNTER ERDBEBENBEANSPRUCHUNG

Masterarbeit

Franziska Amberger

Für den Einsatz von Mauerwerk in deutschen Erdbebengebieten sind neben der Druckfestigkeit weitere Festigkeits- und Verformungseigenschaften gegen die durch das Erdbeben induzierten horizontalen Beanspruchungen relevant. Durch den Übergang zur europäischen Normung und einer modernen Architektur resultiert die Problemstellung, den rechnerisch-seismischen Nachweis für gewöhnliche Mauerwerksbauten erfolgreich zu führen. Im Rahmen dieser Arbeit werden anhand von zwei Schubwandversuchen die Duktilität und die Tragfähigkeit der Aussteifungswände unter kombinierter Momenten-Normalkraft-Querkraft Interaktion beurteilt. Die Masterarbeit zeigt, dass unter Verwendung der experimentell ermittelten höheren Verhaltensbeiwerte im Gegensatz zu den normativen Mindestbeiwerten der seismische Nachweis für ein typisches Reihenhaus geführt werden kann. Die Erkenntnisse der experimentellen Untersuchungen zu höheren Traglastreserven und Verformungskapazitäten von Mauerwerk erleichtern Ingenieuren somit die erfolgreiche Bemessung von Mauerwerksbauten in deutschen Erdbebengebieten im Hinblick auf die Einführung des europäischen Normenkonzepts.

Keywords: Erdbeben, Mauerwerk, Schubwandversuch, Duktilität, Versagen, Bemessungsbeispiel

Problemstellung

Moderne Mauerwerksbauten müssen den architektonischen Anforderungen an Transparenz gerecht werden, was im Geschosswohnungsbau oft in wenigen und kurzen Aussteifungswänden resultiert. Dadurch wird es bei modernen Mauerwerksbauten häufig schwierig, die

horizontalen Beanspruchungen von den Schubwänden aufzunehmen, zu verteilen und abzutragen. Neben Veränderungen in der Gebäudestruktur und Architektur werden durch den Übergang zum europäischen Normenkonzept, dem Eurocode 8 [4], die Erdbebenzonenkarten in Deutschland grundlegend dem Stand des Wissens angepasst. Die

daraus resultierende neue Zonierung ist von weitreichender Bedeutung, da sich aufgrund der neuen Normung höhere Werte der Bodenbeschleunigung und eine Vergrößerung der Flächen in den vorhandenen Erdbebenzonen ergeben. Dies führt bei der Bemessung eines Bauwerks zu höheren Erdbebenkräften. Eine weitere Herausforderung aus normativer Sicht besteht in der Einstufung von Mauerwerk als beschränkt duktil. Dies führt bei unbewehrten Mauerwerksbauten im Vergleich zu duktilen Baustoffen wie Stahl oder Stahlbeton zu einem relativ niedrigen Verhaltensbeiwert q , mit dem im Zuge des linearen Nachweiskonzepts die Gesamterdbebenkraft abgemindert wird. Durch diese Gesichtspunkte ist es heutzutage trotz üblicher Bauweisen und Grundrisse schwierig, den rechnerischen seismischen Nachweis von unbewehrten Mauerwerksbauten zu führen.

Versuchsstand und Messtechnik

Um die Bemessungsgrundlage hinsichtlich dieser Problemstellung zu verbessern, werden im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau an der OTH Regensburg Schubwandversuche an geschosshohen Wänden durchgeführt.

Der Versuchsstand ist an einer Widerlagerwand montiert. Neben dieser Reaktionswand verfügt das Labor über einen Spannboden, über welchen

die entsprechenden Vertikalkräfte rückverankert werden können (vgl. Abbildung 1).

Um die Belastungssituation im Erdbebenfall realistisch zu simulieren, ermöglicht die Anordnung eines horizontalen Hydraulikzylinders und zweier vertikaler Hydraulikzylinder unterhalb des Spannbodens die gezielte Belastung des Wandprüfkörpers am Wandkopf mit Normalkräften, Schubkräften und einem Biegemoment. Vier Spannstrangen übertragen die Vertikalkraft von den Hydraulikzylindern auf die Querriegel am Wandkopf des Prüfkörpers.

Die Einleitung der zyklischen Horizontalkraft erfolgt ausgehend von dem Hydraulikzylinder an der Reaktionswand über einen Stahlbalken in zwei Riegel auf dem Wandkopf. Die Horizontalkraft wird in Scheibenrichtung über einen auf der Mauerwerkswand liegenden Stahlträger eingeleitet. Dabei ist der Horizontalzylinder mittels eines Bolzens auf halber Wandlänge gelenkig mit dem Stahlträger verbunden.

Hinsichtlich der Messtechnik werden Stauchungen und Verformungen hauptsächlich anhand des optischen Messsystems ARAMIS Adjustable erfasst. Zusätzlich werden induktive Wegaufnehmer an verschiedenen Stellen am Prüfkörper angebracht, um die Ergebnisse aus dem optischen Messsystem vor allem in Scheibenrichtung zu kontrollieren.

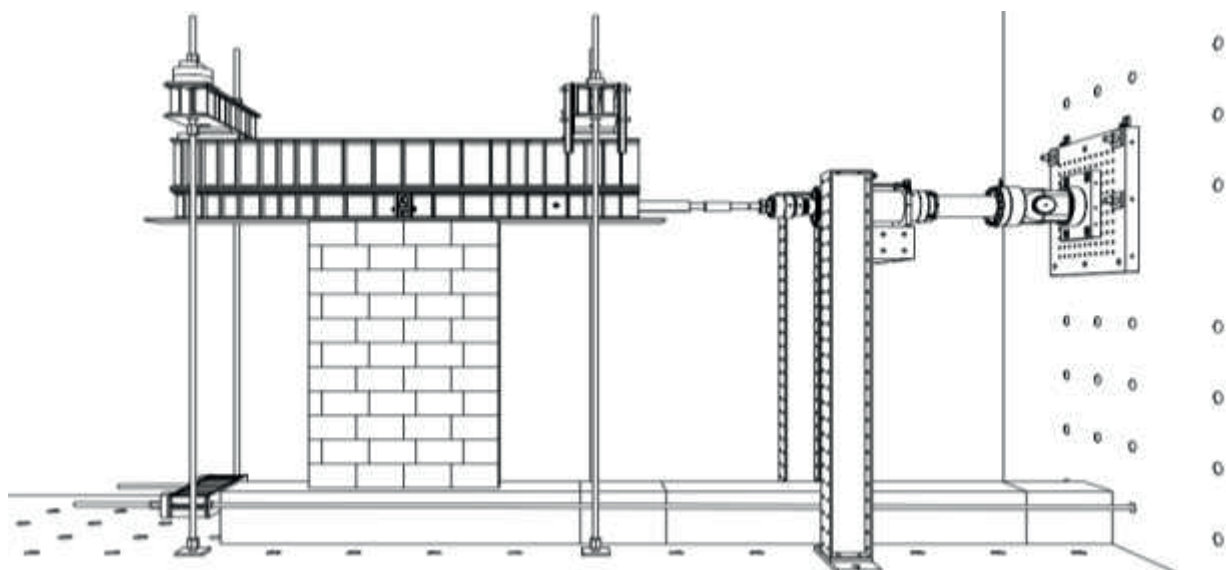


Abb. 1: Zeichnung des Versuchsstands

Methodik von Schubwandversuchen

Dem Prinzip der statisch-zyklischen Versuche nach [1] folgend, induziert die Horizontalkraft ein Biegemoment in die Wand. Die Vertikalkraft wird über die beiden Vertikalzylinder so gesteuert, dass die Gesamtauflast auf den Prüfkörper während des Versuchs konstant gehalten wird. Darüber hinaus ermöglicht diese Versuchssteuerung die Simulation der Einspannungswirkung aus der Verdrehungsbehinderung durch die aufliegende Stahlbetondecke. Auf diese Weise werden die variierenden Randbedingungen erfasst, welche bei Aussteifungswänden infolge seismischer Beanspruchung auftreten.

Einordnung des Versagens

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Quantifizierung des Versagens der beiden Wandprüfkörper. Daher wird unter Zugrundelegung des Schubmodells von Mann/Müller [2] aus dem Jahr 1978 gezeigt, wie das Versagen von Aussteifungswänden aus Mauerwerk unter kombinierter M-N-V Beanspruchung rechnerisch erfasst werden kann. Dadurch werden die resultierenden Versagensbilder einer Bewertung unterzogen. Im Folgenden

wird exemplarisch der zweite Wandprüfkörper vorgestellt.

Hier treten gemäß dem Versagensbild in Abbildung 2 senkrecht und schräg durch die Steine verlaufende Risse auf. Darüber hinaus sind zu Versuchsende auch Risse durch Stoß- und Lagerfugen erkennbar.

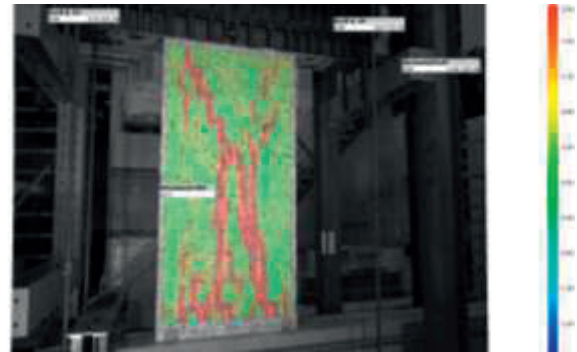


Abb. 2: Versagensbild nach Versuchsende Prüfkörper 2

Durch die Einordnung der vorhandenen Normal- und Schubspannungen in die Versagenshüllfläche wird deutlich, dass der Großteil der Spannungspaare im Bereich des Steinzugversagens liegt (vgl. Abbildung 3).

Anhand dieser Betrachtung wird der vorherrschende Versagensmechanismus des zweiten Prüfkörpers als Steinzugversagen nach Mann/Müller [2] eingeordnet. Daher liefert die Nachrechnung eine gute Übereinstimmung mit den beobachteten Versagensbildern.

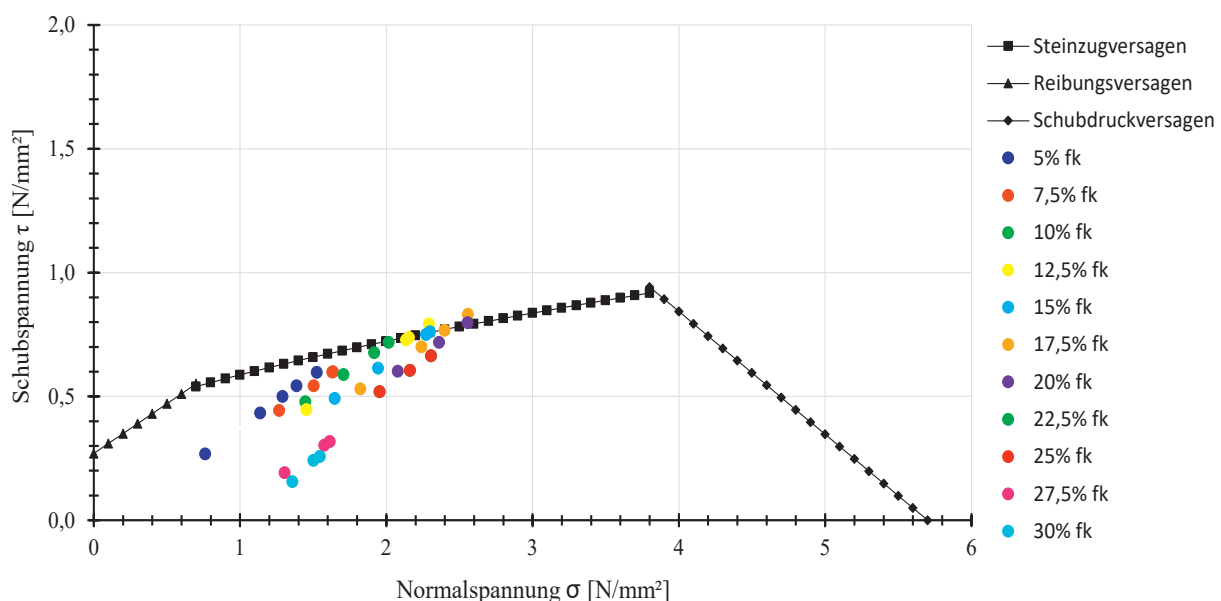


Abb. 3: Versagenshüllkurve nach Mann/Müller [2] mit einwirkenden Normal- und Schubspannungen

Duktilität

Auf Grundlage des Ansatzes von Tomažević [3] aus dem Jahr 2006 wird die Duktilität der beiden Wandprüfkörper abgeleitet. Daraus wird der Verhaltensbeiwert q einerseits nach dem Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit und andererseits nach dem Prinzip der gleichen maximalen Verschiebung berechnet. Eine Gegenüberstellung mit den in DIN EN 1998-1/NA [4] festgelegten Verhaltensbeiwerten für unbewehrte Mauerwerkswände dient der Einordnung dieser Werte.

Daraus ergibt sich für den ersten Prüfkörper, dass ein rund 20 % höherer Verhaltensbeiwert als der normativ festgelegte Bezugswert erzielt werden konnte. Im Falle des zweiten Wandprüfkörpers nähern sich die am Ende des Versuchs erreichten Verhaltensbeiwerte aufgrund der Vorschädigung in der Wand den normativen Mindestwerten an.

Bemessungsbeispiel

Um die Erkenntnisse aus den Versuchen praxisnah anzuwenden, erfolgt abschließend die seismische Bemessung eines Reihenhauses in Erdbebenzone drei. Hierbei wird das vereinfachte Antwortspektrenverfahren unter Berücksichtigung der experimentell ermittelten Verhaltensbeiwerte angewendet.

Nach erfolgreicher Überprüfung der Regelmäßigkeitskriterien wird das System im Aufriss auf einen Mehrmassenschwinger abstrahiert und die Stockwerksmassen werden ermittelt. Unter Berücksichtigung der Systemsteifigkeiten werden die Erdbebenersatzkräfte für die beiden Richtungen berechnet. Nach der Verteilung der Erdbebenersatzkräfte auf die einzelnen Wandscheiben werden die Standsicherheitsnachweise nach DIN EN 1996-1-1 [5] geführt. Dabei handelt es sich einerseits um den Nachweis der exzentrischen Druckbeanspruchung und andererseits um den Schubnachweis. Mit dem experimentell ermittelten höheren Verhaltensbeiwert können

beide Nachweise erbracht werden. Der Schubnachweis erreicht dabei eine Ausnutzung von 90 %, während mit dem normativen Mindestverhaltensbeiwert der Nachweis mit einer Ausnutzung von 120 % nicht mehr erbracht werden kann.

Zusammenfassung

Ein zentrales Thema bestand in der Ableitung des Verhaltensbeiwerts q aus den Schubwandversuchen und ein Vergleich mit den normativen Höchstbeträgen nach DIN EN 1998-1/NA [5]. Dabei ist es gelungen, experimentell höhere Verhaltensbeiwerte als den Mindestwert von $q = 1,5$ bei beiden Schubwandversuchen zu erzielen. Da der Einfluss der Vorschädigung der Prüfkörper nicht berücksichtigt werden konnte, lagen die erzielten Verhaltensbeiwerte zu Versuchsende im Intervall $1,5 < q < 2,1$.

Im Zuge des zweiten Schwerpunkts, dem Bemessungsbeispiel, wurde deutlich, dass ein typisches Reihenhauses mit lediglich zwei relativ kurzen Aussteifungswänden in einer Richtung in Erdbebenzone drei rechnerisch anhand des vereinfachten Antwortspektrenverfahren mit dem experimentell ermittelten Verhaltensbeiwert nachgewiesen werden konnte.

Der dritte Bestandteil dieser Arbeit lag in der Einordnung der experimentellen Normal- und Schubspannungen in die Versagenshüllfläche der Schubbruchtheorie nach Mann/Müller [2], um eine Quantifizierung des Versagens zu ermöglichen. Grundsätzlich zeigt sich dadurch eine gute Übereinstimmung der Nachrechnung mit dem vorhergesagten Versagensmechanismus aus den Rissbildern. Die Versuchsergebnisse verdeutlichen jedoch einen fließenden Übergang zwischen den einzelnen Versagensformen. Es wurde verdeutlicht, dass neben vorhandenen Traglastreserven Mischversagen häufig eine bedeutende Rolle beim endgültigen Versagen des Wandprüfkörpers spielt und in die zukünftige Normung integriert werden sollte.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Schermer, D.; Fehling, E.; Stürz, J.: Schubprüfungen an geschosshohen Wänden – Grundlagen und Durchführung. In: Mauerwerk 12 (2008), Heft 1, S. 13-18.
- [2]: Mann, W.; Müller, H.: Schubtragfähigkeit von gemauerten Wänden und Voraussetzungen für das Entfallen des Windnachweises. In: Mauerwerk-Kalender (1985), S. 95-114.
- [3]: Tomaževič, M.: Damage as a measure for earthquake-resistant design of masonry structures: Slovenian experience. In: Canadian Journal of Civil Engineering (2007), Heft 34, S. 1403-1412.
- [4]: Eurocode 8 – Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten (2021) – Nationaler Anhang
- [5]: Eurocode 6 – Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk (2019)

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Meskouris, K.; Hinzen, K.; Butenweg, C. et al.: Bauwerke und Erdbeben – Grundlagen - Anwendung - Beispiele, Praxis, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011.
2. Kranzler, T.: Tragfähigkeit überwiegend horizontal beanspruchter Aussteifungsscheiben aus unbewehrtem Mauerwerk. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2008, Dissertation / Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt H. 17, Selbstverl., Darmstadt, 2008.
3. Schermer, D.: Verhalten von unbewehrtem Mauerwerk unter Erdbebenbeanspruchung. München, Technische Universität München, Dissertation, 2004

Autor

Studium

Oktober 2017 – Juni 2021:	Bachelorstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg
Oktober 2021 – Juli 2023:	Masterstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg

Berufserfahrung

Seit Oktober 2023:	Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Labor für Konstruktiven Ingenieurbau, OTH Regensburg
April 2023 – Juli 2023:	Studentische Hilfskraft im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau, OTH Regensburg
August 2020 – März 2023:	Werkstudentin im Ingenieurbüro Kolbeck, Cham

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau an der OTH Regensburg. Betreuer der Arbeit ist Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Finckh und Zweitprüfer ist Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer.

Die Arbeit wurde mit dem 1. Preis ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNGEN ZUR MODELLBILDUNG UND DEM LANGZEITVERHALTEN VON HOLZ-BETON-VERBUND-KONSTRUKTIONEN ANHAND NUMERISCHER BERECHNUNGEN

Masterarbeit

Wolfgang Dempert

Im Bereich der Tragwerksplanung ergibt sich durch den Verbund einer Betonschicht mit einem Holztragwerk ein ressourceneffizientes statisches System. Die Schwierigkeit in der Bemessungsaufgabe einer Holz-Beton-Verbund-Konstruktion (HBV) besteht neben der inhomogenen, stark streuenden Materialität vor allem aus den nachgiebigen Verbindungsmitteln und dem unterschiedlichen Langzeitverhalten der Baustoffe. Es wird ein anwenderfreundliches parametrisches Bemessungsmodell mit Hilfe einer handelsüblichen Software von SOFiSTiK erarbeitet. Das Rechenmodell kann unabhängig von den Eingangswerten eine HBV-Konstruktion zu beliebigen Zeitpunkten automatisch bemessen. Als Planungshilfe für Ingenieure werden durch Parameterstudien eine Vielzahl an Detailpunkten zur Modellbildung, Interpretation der Ergebnisse, sowie Sensitivität und Möglichkeiten der Modelle diskutiert. Dies soll Planer motivieren, in Alternativen zu denken und das Potenzial von nachhaltigen Tragkonstruktionen zu erkennen. Zudem führen Unterschiede in der Steifigkeitsentwicklung eines HBV-Tragwerks teilweise zu ungünstigen Beanspruchungen und Spannungsumlagerungen, was diverse Parameterstudien bestätigen. So zeigt sich, dass das vorgestellte Berechnungsmodell hervorragende Möglichkeiten bietet durch einen geringen Mehraufwand in Sonderfällen zur Optimierung des Bauprozesses und der Ressourceneffizienz beizutragen.

Keywords: Holz-Beton-Verbund, Kriechen, FEM, Tragwerksplanung, Ressourceneffizienz, Hybridbau

Ressourcenoptimierung mit Verbund

Die von der Erde zur Verfügung gestellten Ressourcen sind begrenzt und werden dennoch in großen Mengen vom Bauwesen benötigt. Daher müssen effiziente und nachhaltige Bauweisen entwickelt werden. Die Rechnung ist hier simpel: Materialsparende Bauweise = CO₂-Reduktion.

Zusammen mit einem nachwachsenden Rohstoff ergibt sich ein hohes Einsparpotenzial bei der Tragstruktur. So bietet die Holz-Beton-Verbund-Bauweise (HBV) eine Möglichkeit die Vorteile der beiden Baustoffe zu vereinen.

In Anlehnung an den Stahlverbundbau nach DIN EN 1994-1-1 [4] wird ein Holzträger über Verbindungsmittel mit einer obenliegenden Betonplatte

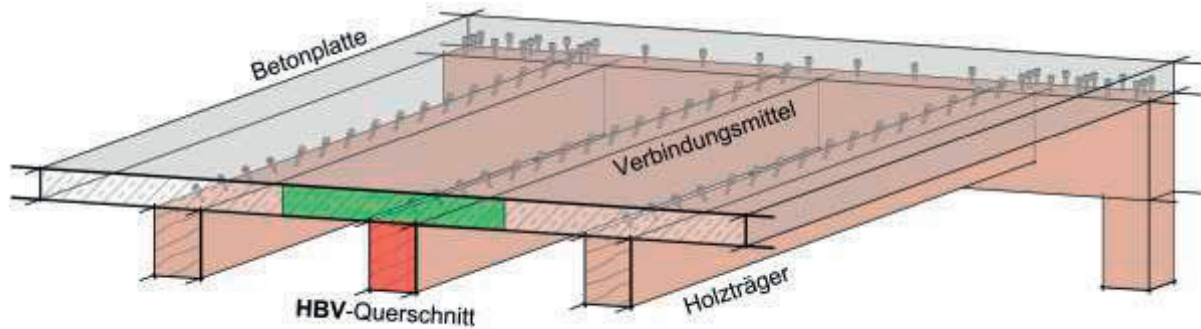


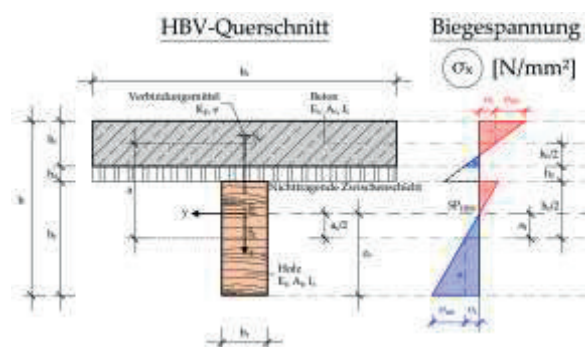
Abb. 1: Holz-Beton-Verbund-System als Isometrie

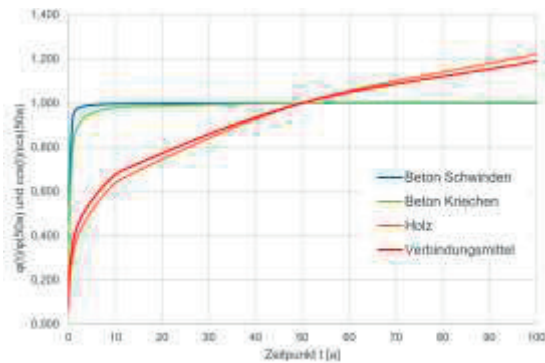
verbunden (Abbildung 1). Die Schubfuge besitzt wegen der Materialeigenschaften eine bemessungsrelevante Nachgiebigkeit und darf nicht als starr vorausgesetzt werden. In Abhängigkeit der Steifigkeiten zeigt Abbildung 2 die Normalspannungsverteilung im Querschnitt. Ein Hilfsmittel zur Bemessung ist die DIN CEN/TS 19103:2021 [1] als Technische Spezifikation zur DIN EN 1995-1-1 [5]. Aufgrund der komplexen Verbundwirkung im HBV werden Anwendungsgrenzen formuliert, aus denen eine starke Einschränkung in der praktischen Umsetzung folgt. Daher soll mit dieser Arbeit durch Parameterstudien gezeigt werden, dass ein geringer Mehraufwand in der Planung zu einem ressourceneffizienteren Tragwerk außerhalb der Regelungen führen kann.

Kriechen und Schwinden der Baustoffe im Holz-Beton-Verbund

Aufgrund der Verbundwirkung beeinflussen sich die Materialien im HBV-Träger gegenseitig und sollten zunächst gesondert betrachtet werden. Für Beton können die Langzeitverformungen nach DIN EN 1992-1-1 [6] durch eine Kriechzahl $\varphi_c(t, t_0)$ und das Schwindmaß ε_{cs} zum betrachteten Zeitpunkt t berücksichtigt werden. Diese sind unter anderem abhängig von der Umgebung, Betongüte, Zementart, Belastungsdauer und -zeitpunkt. Für Hölzer wird nach DIN EN 1995-1-1 [5] ein konstanter Verformungsbeiwert k_{def} in Abhängigkeit von der Nutzungsklasse (NKL) und Holzart festgelegt. Der betrachtete Zeitpunkt, die Ausnutzung, die Belastungsdauer und -art bleiben unberücksichtigt. Der konstante k_{def} -Wert stellt die genaue Verformung im Gebrauchszustand nur

unzureichend dar. Daher wird ein Vorschlag von Rautenstrauch bei Schmidt et al [2] zur Bestimmung der Kriechzahl $\varphi_c(t)$ aufgegriffen. Ein qualitativer Vergleich der Kriechbeiwerte kann in Abbildung 3 nachvollzogen werden. Nach Erkenntnissen von Schänzlin [3] sollte im HBV besonders der Bereich zwischen $t = 3$ und 7 Jahren betrachtet werden. In diesem Zeitraum erreicht der Beton annähernd die maximale Steifigkeit und die Kriechzahl nähert sich einem Grenzwert an. Die theoretischen Grundlagen konnten im Zuge der Ausarbeitung durch verschiedene Parameterstudien bestätigt werden. So ergeben sich infolge der Steifigkeitsentwicklung und Langzeitverformung Umlagerungen im Tragwerk. Tendenziell wird zu frühen Zeitpunkten das Holz und zu späteren Zeitpunkten der Beton stärker beansprucht. Im Bereich der Verbindungsmittel führen lokale Spannungsspitzen über die Zeit zu einer größeren Relativverschiebung zwischen Holz und Beton, was mit einer Abnahme der Steifigkeit, also einem Kriechen der Verbindungsmittel gleichzusetzen ist. Effektiv wird also die Zugspannung an der Betonunterseite und die Druckspannung an der Holzoberseite betragsmäßig erhöht.

Abb. 2: Normalspannung im nachgiebigen Verbund für $M_{yd}(+)$



	2 d	28 d	1 a	3 a	7 a	50 a
Schwinden $\epsilon_{cs}(t)$ [‰]	-0,061	-0,333	-0,540	-0,559	-0,564	-0,568
Kriechen $\varphi_c(t,t_0)$	0,906	1,952	3,477	3,910	4,087	4,222
Holz $\varphi_h(t)$	0,178	0,380	0,795	1,089	1,389	2,443
VBM $\varphi_{VBM}(t)$	0,192	0,372	0,707	0,930	1,150	1,880

Abb. 3: Vergleich Werte für Langzeitverhalten HBV

Entwicklung eines Bemessungsmodells mit der finite Elemente Methode

Die Zielstellung ist die Entwicklung eines für die Baupraxis zugänglichen, parametrischen Rechenmodells, welches trotz der komplexen Verbundwirkung einen Großteil der HBV-Systeme inklusive einer genaueren Betrachtung des Langzeitverhaltens berechnen kann. Durch die Variabilität können mit wenig Zeitaufwand diverse Parameterstudien zur streuenden Materialität und dem Langzeitverhalten auf Grundlage der aktuellen Normung, ohne Einschränkung in der Konstruktionsart durchgeführt werden.

Zur Idealisierung des Verbundsystems wird im ersten Schritt ein Zwei-Stab-Modell in SOFiStiK

erstellt, welches in Abbildung 4 visualisiert ist.

Hierbei sind die Querschnitte frei definierbar, sodass beispielsweise auch ein Bauteil mit abschnittsweise variabler Geometrie oder Fugennachgiebigkeit umsetzbar wäre. Die Stäbe sind über eine Kopplung verbunden, welche die Verbindungsmittelsteifigkeit in x-Richtung und eine unverschiebliche Verbindung in y- und z-Richtung abbildet. Im Laufe der Bearbeitung hat sich herausgestellt, dass sowohl die Lage der Festhaltungen als auch der Lasteinleitung eine Auswirkung auf die Ergebnisse hat. Deshalb wird ein dritter Stab ohne Querschnitt in Lage des ideellen Schwerpunkts modelliert, welcher die Randbedingungen berücksichtigt. Die Belastung kann variabel gewählt werden, sodass jegliche Lastart aufgebracht werden kann, was bei analytischen Bemessungsmethoden nicht möglich ist.

Das Kriechen wird programmintern über Eingabe von Beiwerten inklusive der Steifigkeitsentwicklung berücksichtigt, wodurch die Belastungsgeschichte zu beliebigen Zeitpunkten nachvollzogen werden kann.

Der Nachweisführung des Verbundquerschnitts ist dann in einer Tabellenkalkulation oder mit den Teilquerschnitten direkt in der Software möglich. Ein Vergleich der Berechnung mit dem modifizierten γ -Verfahren nach Eurocode 5 [5] zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse, wobei die gewählte Modellbildung eine statisch günstigere und wirtschaftlichere Bemessung ermöglicht.

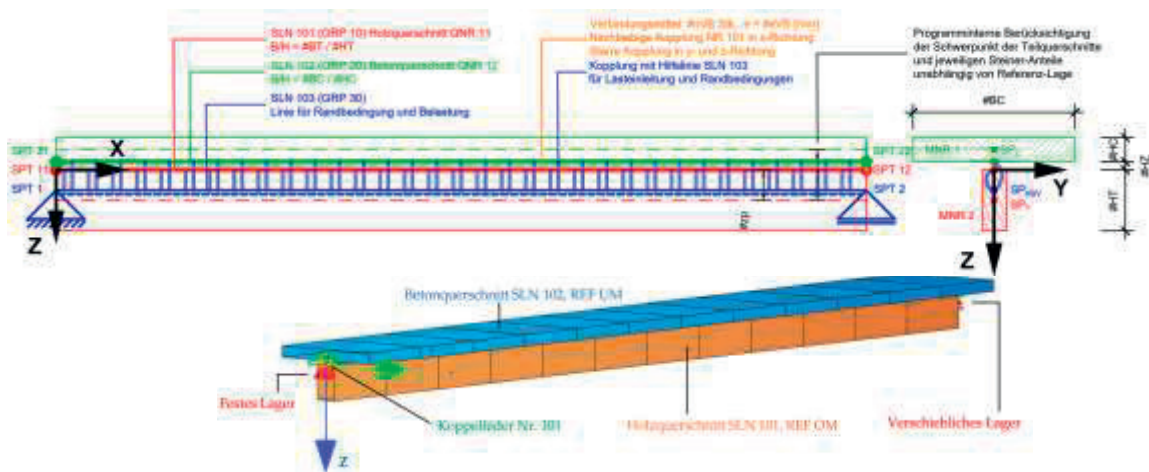


Abb. 4: Statisches System des Zwei-Stab-Bemessungsmodell

Weiterentwicklung der Bemessungsmodelle: Flächenelemente, variable Geometrien und globale Strukturen

Durch eine Modifikation des Modells lassen sich unzählige Anwendungsfälle verifizieren. Nachfolgend sollen einige ausgewählte Möglichkeiten beschrieben werden:

- Durch ein nichtlineares Materialverhalten kann die Rissbildung des Stahlbetons berücksichtigt werden. Dies ermöglicht die Berechnung von statisch unbestimmten Systemen im Zustand II.
- Die Betonplatten kann mit Flächenelementen (Plattenwirkung) abgebildet werden. Damit kann unter anderem die mittragende Breite und Lastverteilung in Deckenebene genauer erfasst werden.
- Ein Schalenmodell muss die Faserrichtung des Holzes und die Lage der Verbindungsmittel berücksichtigen. Dann können variable Geometrien und Aussparungen im Tragwerk berücksichtigt werden.
- Mit Hilfe eines globalen Tragwerksmodells kann die Steifigkeit benachbarter Bauteile berücksichtigt werden. Dadurch können auch größere Deckenflächen zum Nachweis im GZG aktiviert werden.

Modellbildung des Bauablaufs unter Berücksichtigung der Lastgeschichte

Aufgrund der Spannungumlagerung in der Nutzungsdauer von Holz-Beton-Verbund-Strukturen, ist es notwendig diverse Zeitabschnitte inklusive der Lastgeschichte zu untersuchen. Die maximalen Beanspruchungen in den Teilquerschnitten entstehen nicht immer im Endzustand.

Besonders im Bauablauf können hierbei bereits Spannungen in das System eingeprägt werden. Beispielsweise zeigt Abbildung 5 qualitativ die Verformungsgeschichte für einen im Bauzustand zweimal unterstützen HBV-Träger, welcher durch ein Anpressen der Baustützen eine Vorspannung

für den Endzustand erfährt und sich anschließend eine Differenzverformung aus Kriechen einstellt.

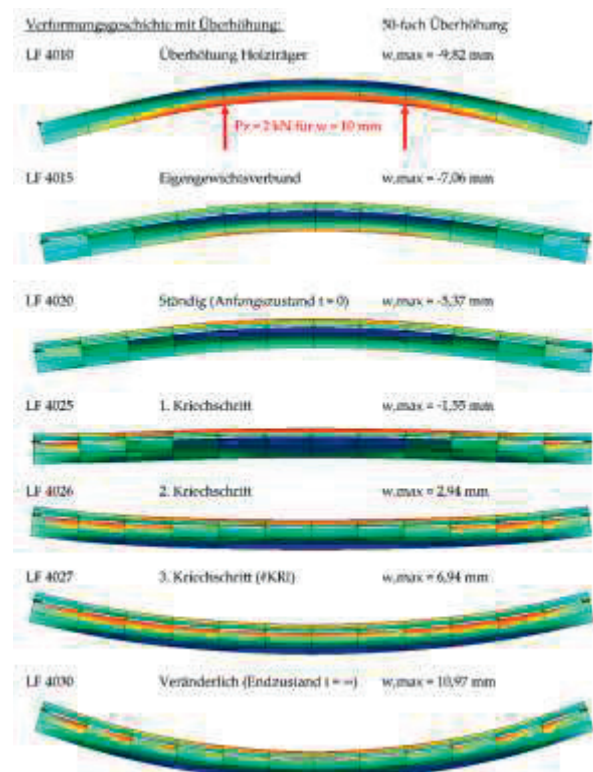


Abb. 5: Verformungsgeschichte für angespannten Holzträger, Druckspannungen = rot, Zugspannungen = blau

Zusammenfassung und Diskussion

Mit Hilfe des in der Masterarbeit vorgestellten, parametrischen Berechnungsmodells können Bemessungsaufgaben unter Berücksichtigung der variablen Materialeigenschaften und der Normung in der Ingenieurpraxis umgesetzt werden. Das Langzeitverhalten kann normgerecht oder variabel berücksichtigt werden. Hierbei können in der Baupraxis handelsübliche Berechnungsprogramme eingesetzt und auf bauwerksspezifische Anforderungen über Anwendungsgrenzen der DIN CEN/TS 19103 [1] hinaus eingegangen werden. Das vorgestellte Berechnungsmodell bietet ebenfalls hervorragende Möglichkeiten, das Tragverhalten in Sonderfällen zu untersuchen und so zur Optimierung der Tragstruktur, des Bauprozesses, der Ressourceneffizienz und der Nachhaltigkeit im Bauwesen beitragen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: DIN CEN/TS 19103:2021: Technische Spezifikation EC 5, Berechnung von HBV, Februar 2022
- [2]: J. Schmidt, W. Schneider, R. Thiele: Kriechen von HBV-Konstruktionen, in Stahlbetonbau 98, 2003
- [3]: J. Schänzlin: Langzeitverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken, Uni. Stuttgart, 2003
- [4]: DIN EN 1994-1-1: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton, 2012
- [5]: DIN EN 1995-1-1: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, 2016
- [6]: DIN EN 1992-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, 2016

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- 1. K. Holschemacher, H. Kieslich: Beton-Kalender 2021 – Kapitel IV: Holz-Beton-Verbund, 2021
- 2. A. Kenel: Zur Berechnung von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen - Entwicklung und Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden, Abteilung 115, Holz, EMPA, Dübendorf, 2000
- 3. U. Kuhlmann, J. Schänzlin: Erweiterung des Anwendungsbereichs von Holz-Beton-Verbunddecken durch Erfassung von Kriechen und Schwinden am Beispiel der Brettstapel-Beton-Verbunddecken, Universität Stuttgart, Forschungsbericht, 2002
- 4. H. J. Blaß und M. Romani: Langzeitverhalten von Holz-Beton-Konstruktionen, Uni. Karlsruhe, 2002
- 5. M. Grosse, R. Hartnack, S. Lehmann, K. Rautenstrauch: Modellierung von diskontinuierlich verbundenen Holz-Beton-Verbundkonstruktionen – Teil 1: Kurzzeittragverhalten und Teil 2: Langzeittragverhalten, in Bautechnik 80, 2003

Autor

Wolfgang Dempert

Ausbildung:

September 2014 – Juli 2017:	Berufsausbildung Bauzeichner Ingenieurbau (IHK)
Oktober 2018 – März 2022:	Studium Bachelor Bauingenieurwesen (B.Eng.), TH Nürnberg
März 2022 – März 2024:	Studium Master Bauingenieurwesen (M.Eng.), TH Nürnberg
Seit Juli 2022:	BNK-Auditor, Bauinstitut für Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen GmbH (BiRN)

Berufserfahrung:

September 2014 – Oktober 2018:	Bauzeichner im Stahlbetonfertigteiltbau, Fa. Dennert
Oktober 2018 – März 2022:	Tragwerksplanung im Stahlbetonfertigteiltbau, Fa. Dennert
Seit März 2022:	Projektleitung Tragwerksplanung Hybridbau, F&E, Fa. Dennert
Oktober 2019 – September 2023:	Studentische Hilfskraft im konstruktiven Labor, TH Nürnberg

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt im Fachgebiet Verbundbau der TH Nürnberg Georg Simon Ohm.

Betreuer der Arbeit ist Prof. Dr.-Ing. Thorsten Wanzek und Zweitprüfer ist Prof. Dr.-Ing. René Conchon.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

DER EINFLUSS VON ENERGIEEFFIZIENZ AUF DEN IMMOBILIENPREIS

Masterarbeit

Nicolas Gabriel

Gebäude sind weltweit für rund 40% der CO₂-Emissionen und 40% des Energieverbrauchs verantwortlich und bieten große Einsparpotenziale. Mieter und Käufer achten zunehmend auf die Energieeffizienz, sowohl bei Wohn- als auch bei Gewerbeimmobilien. Ziel dieser Masterarbeit war es, den Einfluss der Energieeffizienz auf den Preis von selbstgenutzten Ein- und Zweifamilienhäusern in der Metropolregion München empirisch zu untersuchen. Auf Basis eines Datensatzes von über 80.000 Transaktionen wurde mittels multipler linearer Regression die Zahlungsbereitschaft der Käufer für verschiedene Energieeffizienzkriterien untersucht. Besonders signifikante und konsistente Einflüsse konnten u.a. für den Energiebedarfsausweis und für Wärmepumpen nachgewiesen werden. Die Ergebnisse wurden anschließend ins Verhältnis zum Vermarktungszeitraum sowie der jeweiligen Lage gesetzt und mit Hilfe eines Machine Learning Algorithmus repliziert. Die Arbeit zeigt Handlungsmöglichkeiten für politische Entscheidungsträger auf, um wirksame Anreize für Energieeffizienz im Wohnimmobilienmarkt zu setzen. Darüber hinaus verdeutlicht sie Bauträgern durch die Ermittlung der Zahlungsbereitschaft der Käufer für verschiedene Energieeffizienzkriterien, welche Energieeffizienzmaßnahmen bei Neubau und Sanierung rentable Investitionen darstellen.

Keywords: Energieeffizienz, Energiebedarf, Energieverbrauch, Energieausweis, Nachhaltigkeit, Immobilienpreis, Wohnhäuser, Multiple Lineare Regression, Machine Learning, Metropolregion München

Von sinkenden Emissionen und steigenden Immobilienwerten

Diese Arbeit behandelt die Schnittstelle zwischen Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit auf dem Immobilienmarkt und beleuchtet die ökonomischen Aspekte energieeffizienter Wohngebäude. Das Thema Nachhaltigkeit gewinnt seit Jahren zunehmend an Bedeutung.

Es ist das beherrschende Thema in allen Bereichen der Gesellschaft, Politik und Wirtschaft. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit fossiler Energieträger, des stagnierenden Ausbaus erneuerbarer Energien und der damit drohenden Energiekrise kommt dem Teilbereich der Energieeffizienz derzeit eine besondere Bedeutung zu.

Da Gebäude für etwa 40% der CO₂-Emissionen und 40% des Energieverbrauchs verantwortlich sind [1], bieten sie große Einsparpotenziale. Mieter und Käufer achten zunehmend auf die Energieeffizienz, sowohl bei Wohn- als auch bei Gewerbeimmobilien. Die Auswirkungen der Energieeffizienz auf den Wert der Immobilien aufgrund dieser steigenden Nachfrage sind daher von großem Interesse.

Forschungsmethodik

Ziel dieser Masterarbeit ist es, den Einfluss der Energieeffizienz auf den Preis von selbstgenutzten Ein- und Zweifamilienhäusern in der Metropolregion München empirisch zu ermitteln. Dabei werden verschiedene Faktoren wie der Energiebedarf und -verbrauch, die Energieeffizienzklasse und das Heizungssystem untersucht. Anhand eines Datensatzes von über 80.000 Transaktionen wird die Zahlungsbereitschaft der Käufer für das jeweilige Energieeffizienzkriterium sowie der Zusammenhang zur Vermarktungsdauer mittels multipler linearer Regression mit der Software R untersucht.

Regressionen dienen im Allgemeinen dazu, den Zusammenhang zwischen einer Zielvariablen y und einer oder mehreren Prädiktorvariablen x zu quantifizieren. Lineare Regressionen können durch Gleichung 1 beschrieben werden [2]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon$$

y	Zielvariable
β_0	Konstante
β_k	Koeffizient
x_k	Prädiktorvariable
ϵ	Fehlerterm

Gl. 1: Allgemeine Regressionsgleichung

Ein Beispiel für eine einfache lineare Regression ist im Kontext von Wohnimmobilien der Einfluss der Wohnfläche x auf den Kaufpreis y (Abbildung 1). Jeder Datenpunkt repräsentiert ein Gebäude. Mit steigender Wohnfläche steigt auch der Kaufpreis.

Dieser Zusammenhang wird durch die rote Gerade in Form der Regressionsgleichung vereinfacht linear dargestellt. Die Steigung der Regressionsgleichung β_k beschreibt den Einfluss der Prädiktorvariablen: Je höher die Steigung, desto größer ist der Einfluss. Die Konstante β_0 stellt eine Art Basispreis dar, da der Preis einer Immobilie auch bei sehr geringer Wohnfläche nie gegen null geht. Der Fehlerterm berücksichtigt die Differenz zwischen dem geschätzten Kaufpreis $\hat{y}$ und dem wahren Kaufpreis y , da die Regressionsgleichung nur eine Näherung darstellt und die Zielvariable nicht für jeden Datenpunkt exakt bestimmen kann.

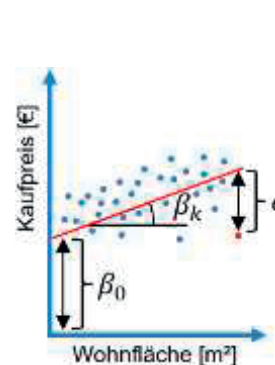


Abb. 1: Einfache lin. Regr.

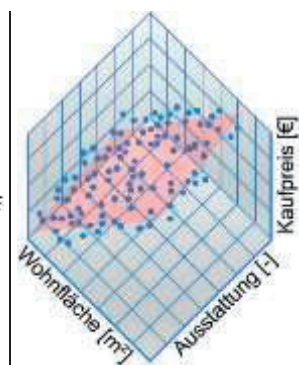


Abb. 2: Multiple lin. Regr.

Da eine Vielzahl weiterer Faktoren den Kaufpreis beeinflussen, wurde hier mit multiplen linearen Regressionen gearbeitet. Die in Abbildung 2 bspw. dargestellte multiple lineare Regression mit zwei Prädiktorvariablen führt zu einem dreidimensionalen Graphen. In dieser Arbeit wurden aus 46 im Datensatz enthaltenen Prädiktorvariablen die zehn signifikantesten Variablen ausgewählt, um die allgemeinere Gebäudeeigenschaften (Baujahr, Lage, Zustand etc.) in der Regressionsgleichung zu berücksichtigen (Gl. 2). Der daraus entstehende n-dimensionale Graph ist nicht in einem Schaubild darstellbar. Die verschiedenen Energieeffizienzkriterien wurden dann als zusätzliche Variable aufgenommen und deren Einfluss auf den Kaufpreis ermittelt.

$$\begin{aligned} \text{Kaufpreis} = & \beta_0 + \beta_1 \text{Postleitzahl} + \beta_2 \text{Verkaufsjahr} \\ & + \beta_3 \text{Log(Wohnfläche)} + \beta_4 \text{Alter} + \beta_5 \text{Gebäudeart} \\ & + \beta_6 \text{Zustand} + \beta_7 \text{Ausstattung} + \beta_8 \text{Makler} + \beta_9 \text{Keller} \\ & + \beta_{10} \text{Modernisiert} + \beta_{11} \text{Energieeffizienzkriterium} + \epsilon \end{aligned}$$

Gl. 2: Spezifische Regressionsgleichung

Unterschiedliche Gewichtung von Energiebedarf und Energieverbrauch

Ein besonders signifikanter und konsistenter Einfluss konnte für den Energiebedarf nachgewiesen werden. Für Wohngebäude mit einer bedarfsorientierten Energieeffizienzklasse C/B/A/A+ konnte ein zunehmender Aufschlag, für die Klassen E/F/G/H ein zunehmender Abschlag festgestellt werden, jeweils im Vergleich zur Klasse D (Abbildung 3). Die Grenzwerte der Effizienzklassen sind in Abbildung 4 dargestellt.

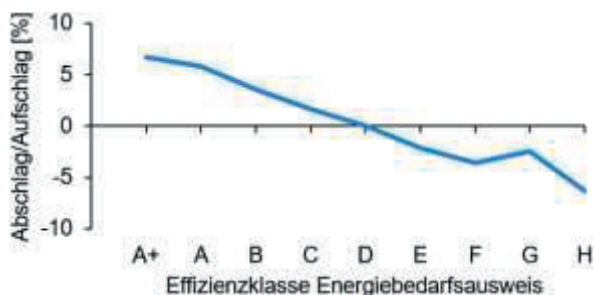


Abb. 3: Einfluss des Energiebedarfs auf den Kaufpreis

Die Kennwerte des Energiebedarfsausweises werden auf Basis der Gebäudedaten und technischen Gebäudeausrüstung (z.B. Baustoffe und Heizungssysteme) unter standardisierten Rahmenbedingungen (jeweils konstante Klimadaten, Nutzerverhalten, Raumtemperaturen) rechnerisch ermittelt.

Die Kennwerte des Energieverbrauchsausweises werden dagegen durch den tatsächlichen Energieverbrauch des Nutzers bestimmt. Sie sind daher stark vom individuellen Nutzerverhalten abhängig.

Für den Energieverbrauch konnte kein statistisch signifikanter Einfluss auf den Immobilienpreis festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass Käufer den Energieverbrauch des Vornutzers nicht als signifikanten Parameter für die Einschätzung des eigenen Energieverbrauchs in derselben Immobilie heranziehen und diesen daher weniger stark einpreisen.

Das Ziel von Energieausweisen ist Transparenz und Offenlegung, damit Verbraucher die energetischen Eigenschaften einer Immobilie

verstehen und vergleichen können. Wenn die Verbraucher den Energieverbrauchsausweisen jedoch nicht genügend Informationswert beimessen, um sie bei Miet- oder Kaufentscheidungen zu berücksichtigen, verfehlt einer der treibenden Faktoren sein Ziel.

Energieverbrauchsausweise stellen eine Vereinfachung der teureren und komplizierteren Energiebedarfsausweise dar. Eine Vereinfachung verliert jedoch ihre Daseinsberechtigung, wenn sie ihren ursprünglichen Zweck nicht mehr erfüllt. Es wird daher empfohlen, weitere Untersuchungen zur Glaubwürdigkeit und Marktakzeptanz des Energieverbrauchsausweises durchzuführen, um festzustellen, ob eine Überarbeitung der Richtlinie erforderlich ist.



Abb. 4: Grenzwerte der Energieeffizienzklassen [kWh/(m²·a)]

Bei der Untersuchung des Einflusses der Heizungssystemen wurden Preisaufschläge insbesondere für alternative Systeme wie Wärmepumpen und Solarthermie im Vergleich zu konventionellen Ölheizungen festgestellt.

Geodaten zeigen negative Korrelation des durchschnittlichen Kaufpreises mit dem Einfluss der Energieeffizienz

Durch die Auswertung der Geodaten konnten Beobachtungen aus früheren Veröffentlichungen bestätigt werden, dass der Einfluss der Energieeffizienz negativ mit durchschnittlichen Immobilienpreis einer Region korreliert [3]. Das bedeutet, dass die Energieeffizienz in Regionen mit niedrigeren durchschnittlichen Immobilienpreisen einen größeren Beitrag zur Preisbildung leistet als in Regionen mit höheren Preisen. Konkret konnte dies sowohl auf der Makroebene für die gesamte Metropolregion München als auch auf der Mikroebene für verschiedene Postleitzahlen innerhalb der Region beobachtet werden.

Validierung der Ergebnisse mittels Machine Learning Algorithmus

Als erweiterte Aufgabenstellung wurde ein Machine Learning Algorithmus (MLA) entwickelt, der die Immobilienpreise des Datensatzes unter den gewählten Annahmen des Regressionsmodells mit sehr hoher Übereinstimmung replizieren konnte. Zu diesem Zweck wurde der Datensatz in jeweils einen 70:30 Trainings- und Testsatz aufgeteilt. 70 % der Daten werden für das Training des Algorithmus verwendet, die restlichen 30 % dienen dazu, die Prognosefähigkeit des entwickelten Modells für neue Daten zu überprüfen.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum[(\text{Geschätzter Preis} - \text{Wahrer Preis})^2]}{\sum[(\text{Wahrer Preis} - \text{Mittl. Wahrer Preis})^2]}$$

Gl. 3: Bestimmtheitsmaß der wahren und geschätzten Preise

Zur Bewertung der Qualität der gewählten Regression und der Vorhersagekraft des Trainingssatzes für den Testsatz wird das Bestimmtheitsmaß R^2 (Gleichung 3) verwendet. Das Testmodell hat ein Bestimmtheitsmaß zwischen den wahren und geschätzten Preisen von $R^2 = 0,792$, was einem außergewöhnlich hohen Wert entspricht. Es kann somit bestätigt werden, dass die gewählte Regression präzise Voraussagen über die Kaufpreise treffen kann. In Abbildung 5 werden für die ersten zehn Zeilen des Testsatzes die wahren Kaufpreise der Immobilien mit den vom Modell geschätzten Kaufpreisen verglichen.

	Wahrer Kaufpreis y	Geschätzter Kaufpreis $\hat{y}$
1	1.075.000	1.023.293
2	825.000	924.107
3	980.000	976.632
4	680.000	614.197
5	1.198.500	1.395.439
6	802.800	753.461
7	850.000	766.128
8	1.495.000	1.550.156
9	1.500.000	1.189.882
10	559.000	624.959

Abb. 5: Exemplarische Ergebnisse des MLA

Bedeutung für die Bau- und Immobilienwirtschaft

Es ist zu erwarten, dass die Energieeffizienz als Teilbereich der Nachhaltigkeit mit zunehmender Regulierung und wachsendem Umweltbewusstsein weiter an Bedeutung gewinnen wird; insbesondere vor dem Hintergrund des anstehenden Generationswechsels, sowohl bei den politischen Entscheidungsträgern als auch bei den Immobilienkäufern. Umso wichtiger wird es in Zukunft sein, einen datenbasierten Ansatz zur Definition, Messung und Analyse von Nachhaltigkeit zu verfolgen und die Macht der Information zu nutzen, um wirksame Maßnahmen für eine nachhaltige Entwicklung des Immobilienmarktes auszuarbeiten.

Angesichts der derzeit hohen Abhängigkeit von ausländischen Energielieferungen zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit und des gleichzeitigen Trends zur Deglobalisierung sollten der Ausbau erneuerbarer Energien und der Weg hin zu mehr Energieeffizienz dabei einen Schwerpunkt bilden. Dies umfasst sowohl übergreifende Maßnahmen – z.B. in Form eines flächendeckenden Ausbaus von Windkraftanlagen – als auch individuelle Maßnahmen – in Form von energieeffizienten Sanierungen und dem Umstieg auf alternative Heizungssysteme.

Die Arbeit zeigt, dass sich Energieeffizienz anhand verschiedener Kriterien mit hoher statistischer Signifikanz im Immobilienpreis niederschlägt. Die Ergebnisse zeigen den politischen Entscheidungsträgern Handlungsmöglichkeiten auf, um wirksame Anreize für Energieeffizienz im Wohnimmobilienmarkt zu setzen. Sie verdeutlichen Bauträgern, welche Energieeffizienzmaßnahmen bei Neubau und Sanierung rentable Investitionen darstellen. Nicht zuletzt zeigen die Ergebnisse Hausbesitzern und potenziellen Käufern, dass diese ihre Häuser zukunftssicher machen, ihren CO₂-Fußabdruck reduzieren und gleichzeitig den Wert ihrer Immobilie steigern können, um den Weg in eine nachhaltigere Zukunft zu ebnen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: International Council for Research and Innovation in Building and Construction (2013): The Implementation of Energy Efficient Buildings Policies: An International Comparison. International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB) Task Group 66 <<Energy and the Built Environment >> - Review of activities 2009-2012 - Final Report.
- [2]: Fahrmeir, Ludwig; Kneib, Thomas; Lang, Stefan (2009): Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [3]: Fuerst, Franz; McAllister, Patrick; Nanda, Anupam; Wyatt, Peter (2015b): Does energy efficiency matter to home-buyers? An investigation of EPC ratings and transaction prices in England. In Energy Economics 48, pp. 145–156. DOI: 10.1016/j.eneco.2014.12.012.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Cajias, Marcelo; Fuerst, Franz; Bienert, Sven (2019): Tearing down the information barrier: the price impacts of energy efficiency ratings for buildings in the German rental market. In Energy Research & Social Science 47, pp. 177–191. DOI: 10.1016/j.erss.2018.08.014.
2. Kholodilin, Konstantin A.; Mense, Andreas; Michelsen, Claus (2017): The market value of energy efficiency in buildings and the mode of tenure. In Urban Studies 54 (14), pp. 3218–3238. DOI: 10.1177/0042098016669464.
3. Popescu, Daniela; Bienert, Sven; Schützenhofer, Christian; Boazu, Rodica (2012): Impact of energy efficiency measures on the economic value of buildings. In Applied Energy 89 (1), pp. 454–463. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.08.015.

Autor

Studium

April 2021 – März 2023

M.Sc. Bauingenieurwesen, TU München

Oktober 2015 – Dezember 2020

B.Eng. Bauingenieurwesen, TH Köln

Berufserfahrung

Seit April 2023

Real Estate Consultant, Deloitte Consulting GmbH

April 2022 – März 2023

Werkstudent, Art-Invest Real Estate GmbH & Co. KG

September 2017 – März 2022

Werkstudent, ZECH Bau SE

Oktober 2014 – Juli 2017

Praktikant und Werkstudent, Bilfinger Hochbau SE

April 2014 – September 2014

Gerüstbauhelfer, Gabriel Gerüstbau GmbH

Betreuer

Die Masterarbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung der Technischen Universität München unter Betreuung von Prof. Dr. rer. pol. Bing Zhu.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

POTENTIALE VON BIM-BASIERTEN BAUWERKSMODELLEN - KONZEPTION EINES HOLISTISCHEN PROZESSMODELLS

Masterarbeit

Dac, Ho

Seit 1991 verzeichnet das Baugewerbe im Gegensatz zu anderen produzierenden Sektoren eine Regression in der Arbeitsproduktivität. Infolge der Einführung digitaler Innovationen stellt Building Information Modeling (BIM) eine potenzielle Lösung dar, um diesen negativen Trend umzukehren. Die Prämisse dieser Arbeit besteht darin, dass insbesondere für Klein- und mittelständische Unternehmen (KMU) die BIM-Implementierung eine finanzielle und fachliche Herausforderung darstellt. Deshalb werden BIM Open-Source Softwarelösungen (OSS) als Alternative zu lizenzpflichtigen Softwarelösungen in Betracht gezogen und deren Eignung für KMU bewertet. Dabei werden die aktuellen Herausforderungen und Hindernisse bei der BIM-Implementierung in KMU mit Hilfe einer qualitativen Expertenbefragung (N = 12) erhoben und analysiert. Das Ergebnis der Forschungsarbeit besteht in der Konzeption eines holistischen Anwendungsmodells, das KMU die Integration von BIM-Prozessen in ihre Geschäftsprozesse verdeutlicht und dadurch das Bewusstsein für ihre eigene Rolle im Rahmen der BIM-Prozesse verstärkt.

Keywords: Industrie 4.0, BIM, Open-Source Software, KMU, BIM-Anwendungsmodell, Referenzmodellierung, Baugewerbe

Bauwirtschaft im Wandel – Bauen 4.0

Das Baugewerbe steht seit den 1990er Jahren vor dem Problem einer im Vergleich zu anderen Produktionssektoren stagnierenden Arbeitsproduktivität [1]. Die Einführung von Industrie 4.0-Technologien, wie beispielsweise Building Information Modeling (BIM), bietet das Potenzial, die Produktivität auch im Baugewerbe zu steigern. Mit BIM soll durch einen standardisierten und transparenten Informationsaustausch die Effizienz in der Bauwirtschaft nachhaltig gesteigert werden.

Allerdings sind Investitionen und die Weiterbildung der Mitarbeitenden notwendig, um durch die Anwendung der BIM-Methode effizientere Arbeitsprozesse zu ermöglichen.

Die Thesis beleuchtet die Herausforderungen und Chancen, die sich aus der Anwendung von BIM für klein- und mittelständische Unternehmen (KMU) aus dem Baugewerbe ergeben. Insbesondere für KMU stellt die Umstellung ihrer Arbeitsprozesse auf BIM eine erhebliche finanzielle und technologische Herausforderung dar. Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit die Anwendung von

Open-Source-Softwarelösungen (OSS) als kosteneffiziente Alternative für KMU.

Im Gegensatz zu existierender Literatur fokussiert sich diese Arbeit auf die Untersuchung der besonderen Herausforderungen und Nutzen von BIM speziell für KMU. Durch die Erarbeitung eines praxisnahen Anwendungsmodells liefert sie einen zielgerichteten Beitrag, KMU in der Einführung und Anpassung der Geschäftsprozesse an BIM zu unterstützen.

Forschungsmethode

Die methodische Vorgehensweise der Forschungsarbeit besteht aus einer Kombination von theoretischen und qualitativen Ansätzen. Im theoretischen Teil erfolgt eine umfassende, systematische Literaturrecherche zu den Schlüsselbegriffen „Wertschöpfung“, „BIM“ und „Prozessmodellierung“. Die empirische Ausarbeitung beinhaltet eine leitfadengestützte Expertenbefragung und die Prozessmodellierung anhand eines Referenzmodells. Die Befragung ist mit insgesamt zwölf KMU (N = 12) aus dem Baugewerbe durchgeführt worden. Die Prozessmodellierung in dieser Arbeit folgt einem systematischen Ansatz, bei dem ein anwendungsbezogenes Modell auf der Grundlage eines Referenzmodells konzipiert wird [2]. Als Referenzmodell ist die „idealtypische Soll-prozesskette zur Anwendung der BIM-Methode“ des BIM-Instituts der Bergischen Universität Wuppertal herangezogen worden [3]. Die folgende Abbildung 1 skizziert die methodische Herangehensweise dieser Arbeit:

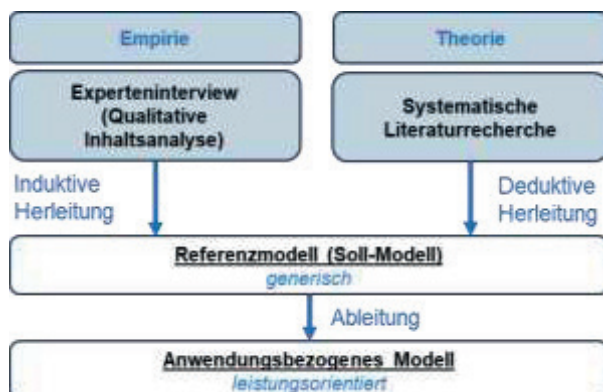


Abb. 1: Methodische Vorgehensweise (eigene Darstellung)

Definition BIM-Prozess

Gemäß der DIN EN ISO 29481-1 [4] und der VDI 2552 Blatt 2 [5] wird BIM als eine kollaborative, lebenszyklusorientierte und prozessorientierte Arbeitsmethode definiert, die auf einem digitalen Bauwerksmodell basiert. Das digitale Bauwerksmodell schafft eine zentrale und gemeinsame Datengrundlage und unterstützt dadurch die kollaborative Zusammenarbeit.

BIM-Prozesse bzw. Anwendungsfälle lassen sich in fachliche und technische Prozesse gliedern. Fachliche Prozesse beschreiben Geschäftsprozesse anhand von sequenziellen Teilprozessen auf einer rein informativen Ebene (z.B. „LV-Erstellung“) [6]. Technische Prozesse beschreiben die Methode zur informationstechnischen Datenverarbeitung, die in den jeweiligen Teilprozessen zur Anwendung kommen und können generisch auf folgende Kernaktivitäten reduziert werden [6]:

- Daten schreiben,
- Daten erfassen,
- Daten ableiten,
- Daten verarbeiten (extern),
- Kommunikation auf Basis Bauwerksinformationsmodell

Auswertung der Befragung

Die Analyse der Befragungsergebnisse zeigt, dass die befragten KMU ein heterogenes Verständnis von BIM aufweisen, welches auf unterschiedliche praktische Erfahrungen zurückgeführt werden kann.

Unternehmen mit praktischen BIM-Kenntnissen identifizieren spezifische Schwierigkeiten, welche sich auf die Anwendung der BIM-Methode in Projekten bezieht. So geben diese Unternehmen an, dass die isolierte Anwendung von BIM in der Wertschöpfungskette die Ursache dafür sei, dass das volle Potenzial von BIM nicht ausgeschöpft werden kann.

Ein weiterer Aspekt ist, dass Bauwerksmodelle in einigen Fällen nicht in einem weiterverarbeitbaren Datenaustauschformat übermittelt werden, da die

Informationslieferanten diese Modelle ausschließlich in proprietären Austauschformaten zur Verfügung stellen. KMU, die überwiegend theoretische Kenntnisse von BIM besitzen, erkennen zwar die Vorteile, sehen diese jedoch primär in der Planungsphase. Dadurch profitiert der Bauablauf durch die Reduktion von Störfaktoren infolge besserer Planung. Es wurde ebenfalls aufgeführt, dass der Anreiz zur Durchführung von BIM-Projekten seitens der Auftraggeber oft fehle. In der Regel muss die Anwendung von BIM durch die Auftraggeber vorgegeben werden, da entsprechende Vorleistungen bzw. Projektvorgaben für die erfolgreiche BIM-Anwendung benötigt werden. Die Firmen bemängeln, dass der Auftraggeber diese Anreize nicht setzt, da das Fachwissen dazu fehle.

Innerhalb der Befragung wurde ebenfalls angemerkt, dass die vertraglichen Rahmenbedingungen eine kollaborative Zusammenarbeit nicht fördert, sondern gegenseitige Schuldzuweisungen begünstigt und somit Barrieren zwischen Wertschöpfungspartnern schafft. Hierfür sind weitere Untersuchungen erforderlich, inwiefern die aktuelle Vertragsgestaltung die kollaborative Arbeitsmethode behindert.

Darüber hinaus befürchten KMU, dass die Einführung neuer Technologien angesichts des bestehenden Fachkräftemangels die bereits voll ausgelasteten Mitarbeitenden überfordern könnte, wodurch die Akzeptanz neuer Prozesse nicht gewährleistet wird.

Zusammengefasst konnte im Rahmen der Befragung sowohl externe als auch interne Faktoren ermittelt werden, die aus Sicht der KMU die erfolgreiche BIM-Implementierung im eigenen Betrieb behindern.

Diese Faktoren führen dazu, dass die vollständige und effiziente Einführung von BIM in kleinen und mittleren Unternehmen oft nicht realisiert werden kann.

BIM-Anwendungsmodell

Während das Referenzmodell die BIM-Prozesse ganzheitlich über den Lebenszyklus eines Gebäudes hinweg abbildet, fokussiert sich das Anwendungsmodell dieser Arbeit (vgl. Abbildung 2) spezifisch auf die zentralen Geschäftsprozesse des Bauunternehmens. Diese Anpassung hebt die für KMU relevanten Phasen hervor und sorgt dafür, dass das Modell genau jene Kernprozesse umfasst, die für die Wertschöpfung des Unternehmens relevant sind.

Die Darstellung der Rollen in „Informationsempfänger“ (Inputseite) und „Informationsanbieter“ (Outputseite) auf der vertikalen Achse verdeutlicht die Rolle des Modellanwenders für den jeweiligen BIM-Anwendungsfall. So ist beispielsweise für den Anwendungsfall „Mengen- und Kostenermittlung“ (Nr. 2) die Kompetenz in der Datenableitung aus dem digitalen Bauwerksmodell sowie die Dateneingabe in das Modell von zentraler Bedeutung. Das Anwendungsmodell soll einerseits die Komplexität von BIM verringern, indem es den Fokus auf die datenbasierte Verarbeitung richtet und andererseits verdeutlichen, welche BIM-Anwendungsfälle die Kernprozesse unterstützen kann. Eine Voraussetzung hierfür ist die Kompetenz in der informationstechnischen Datenverarbeitung. Sobald die technischen Prozessschritte identifiziert sind, können die fachlichen Teilprozesse den technischen Prozessen klar und eindeutig zugeordnet werden [3].

Fazit & Ausblick

Innerhalb der Wertschöpfungskette sind die KMU auf die Vorleistungen der Planung und Vorgaben des Auftraggebers angewiesen.

BIM als kollaborative Arbeitsmethode fördert die frühzeitige Erkennung von Planungsmängeln und trägt zu einer verbesserten Entscheidungsfindung bei, von der bauausführende KMU passiv profitieren. Jedoch bestehen auch BIM-Anwendungsfälle im Rahmen der Bauausführung,

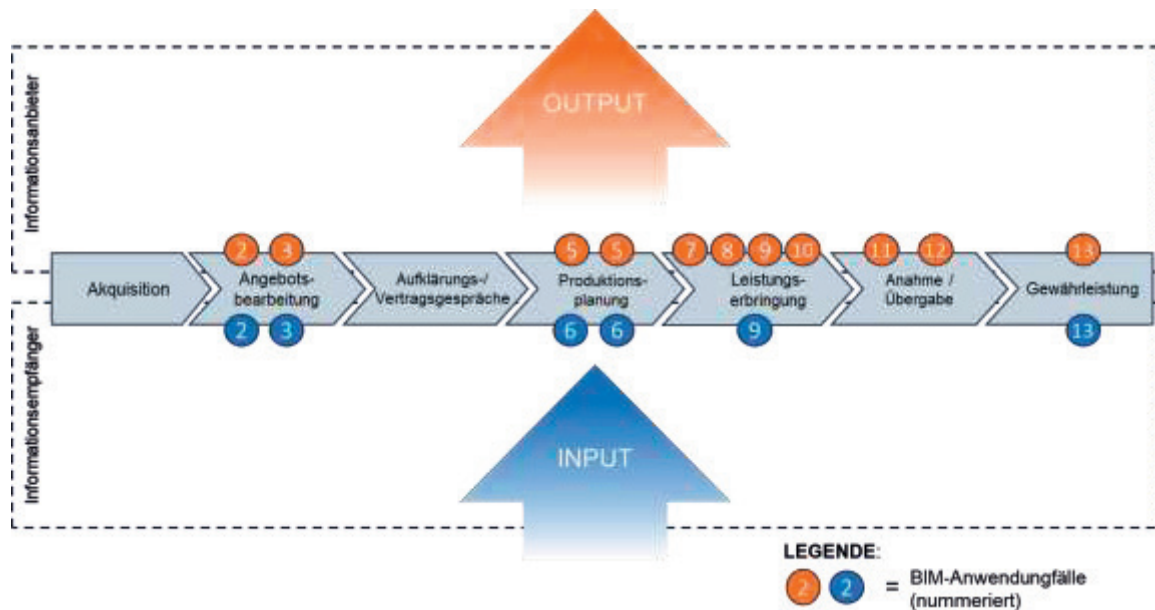


Abb. 2: Anwendungsbezogenes Ergebnismodell mit beispielhaften BIM-Anwendungsfällen und Kernprozesse (eigene Darstellung)

die die aktive Partizipation von KMU erfordert, wie beispielsweise die digitale Dokumentation der Bauausführung. Darüber hinaus können die eigenen Geschäftsprozesse mit Hilfe von BIM effizienter gestaltet werden, wie beispielsweise die Kalkulation mit Hilfe eines digitalen Bauwerksmodells. Für KMU ist daher die informationstechnische Datenverarbeitung und der Umgang mit BIM-Datenaustauschformaten eine entscheidende Kompetenz, um im Zeitalter der Industrie 4.0 wettbewerbsfähig zu bleiben. Eine erfolgreiche Integration von BIM in KMU setzt betriebsinterne als auch -externe Veränderungsprozesse voraus. Die Einführung von BIM muss von der Führungsebene angestoßen werden und sukzessive erfolgen, um die Akzeptanz der Mitarbeitenden zu gewährleisten. Zur Unterstützung dieser Integration ist ein BIM-Anwendungsmodell entwickelt worden, das die Anpassung und systematische Weiterentwicklung von Geschäftsprozessen ermöglicht. Dieses Modell betont die Bedeutung des Informationsaustausches und unterstützt KMU dabei, ihre Rolle in der Wertschöpfungskette effektiv zu steuern.

Es zeigt auf, wie BIM-Anwendungsfälle die primären Geschäftsprozesse unterstützen kann

und hebt die Wichtigkeit der richtigen Informationsverarbeitungsschritte hervor.

Das Modell ist ein strategisches Instrument für KMU, um die BIM-Methode in ihre Geschäftsprozesse einzubinden, wodurch die Produktivität und Effizienz gesteigert werden kann. *BlenderBIM*, eine OSS-Lösung, bietet eine kostengünstige Möglichkeit, sich mit den technischen Prozessen von BIM auseinanderzusetzen, ohne hohe Investitionen in proprietäre Software tätigen zu müssen. Es unterstützt nativ das IFC-Datenformat und ermöglicht die Anwendung auf verschiedenen Plattformen. Diese Eigenschaften machen es zu einer praktischen Option für die Evaluierung und das Testen von BIM-Prozessen in KMU. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass OSS-Lösungen nicht alle Funktionen von lizenzpflichtigen Softwarelösungen abdecken. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, inwieweit OSS-Lösungen betrieblich eingesetzt werden können. Die Einführung von BIM erfordert einen Paradigmenwechsel, der nicht nur technologische, sondern auch strukturelle Veränderungen mit sich bringt. Es bedeutet, bestehende Strukturen und Vorgehensweisen zu überdenken und gegebenenfalls zu brechen, um einen Rahmen für kooperatives und kollaboratives Arbeiten zu schaffen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. (Hrsg.) (2022): Produktivität im Bau(haupt-)gewerbe - ein statistischer Befund. Berlin, S. 1.
- [2]: Schwegmann, Ansgar und Laske, Michael (2003): Istmodellierung und Istanalyse. In: Prozessmanagement - Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung. Hrsg. von Jörg Becker, Martin Kugeler und Michael Rosemann, 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 170.
- [3]: BIM-Institut (BUW) (2017): Entwicklung einer idealtypischen Soll-Prozesskette zur Anwendung der BIM Methode im Lebenszyklus von Bauwerken. Abschlussbericht. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal
- [4]: DIN EN ISO 29481-1:2018-01: Bauwerksinformationsmodelle – Handbuch der Informationslieferungen - Teil 1: Methodik und Format (ISO 29481-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 29481-1:2017
- [5]: VDI-Richtlinie 2552 - Blatt 2: Building Information Modeling – Begriffe
- [6]: BIM-Institut (BUW) (Hrsg.) (2017): Teil 1: Grundlagenbericht - Building Information Modeling und Prozesse. Grundlagenbericht. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- 1. André Borrmann et al. (Hrsg.) (2021): Building Information Modeling, 1. Aufl., VDI-Buch. Wiesbaden: Springer Vieweg
- 2. Hausknecht, Kerstin und Liebich, Thomas (2016): BIM-Kompodium - Building Information Modeling als neue Planungsmethode. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- 3. Hartmann, Ulrich (2023): Building Information Modeling - Grundlagen, Standards, Praxis - Digitales Denken im Ganzen. Berlin: Ernst & Sohn; bSD Verlag

Autor

Dac Ho, M. Sc. (TUM), geboren am 07.11.1994 in Fürstenfeldbruck

Bildungsweg:

2013 – 2018: Bachelorstudium an der an der TU München (Bauingenieurwesen)

2018 – 2023: Masterstudium an der TU München (Bauingenieurwesen)

Beruflicher Werdegang:

2015: Auslandspraktikum in Singapur bei Soilbuild Group Holdings

2017 - 2023: Praktika und Werkstudent in der Projektsteuerung bei Hitzler Ingenieure und Co. KG

Seit 2024: Projektingenieur bei Hitzler Ingenieure und Co. KG

Diese Arbeit widme ich meinen Eltern, die als vietnamesische Kriegsflüchtlinge in Deutschland ein neues Leben aufbauten, um mir den Bildungsweg zu ebnen.

Betreuer

Die Arbeit wurde am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung angefertigt, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Nübel, betreut von Pia Stanzel-Deffner, M. Sc. und Marcel Schlicke, M. Sc.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

VERBESSERUNG DER NACHHALTIGKEITSBEWERTUNG: EIN MULTIKRITERIELLER ANSATZ ZUR ENTSCHEIDUNGSFINDUNG FÜR DIE BEWERTUNG VON BAUKONSTRUKTIONEN

Masterarbeit

Bruna Lourenco

Die Baubranche hinterlässt beträchtliche ökologische Fußabdrücke, die sich auf unsere Umwelt auswirken. Somit ist es von entscheidender Bedeutung, die Auswirkungen dieser Branche zu minimieren. Diese Aufgabe gestaltet sich jedoch oft äußerst komplex, da zahlreiche Projektbeteiligte mit unterschiedlichen Fachkenntnissen in Bauprojekte involviert sind. In Projekten, die eine Vielzahl von Kriterien berücksichtigen werden und aus diversen Alternativen die optimale gewählt werden muss, steigt die Komplexität des Entscheidungsprozesses deutlich an. Um dieser Herausforderung zu begegnen, präsentiert die vorliegende Arbeit ein multikriterielles Modell (Multi-Criteria Decision Making - MCDM), um die Nachhaltigkeit auf Bauteilebene von Bauprojekten zu bewerten und den Entscheidungsprozess zu unterstützen. Der Analytic Network Process (ANP) wurde als Methode gewählt, um die Nachhaltigkeit von Deckenkonstruktionen im Rahmen eines Forschungsprojekts zu bewerten. Durch den Einsatz der ANP-Methode trägt diese Forschung dazu bei, den Bereich des nachhaltigen Bauens voranzutreiben, indem sie eine Methode zur Bewertung und Auswahl von nachhaltigen Bauteilen bereitstellt.

Keywords: Lebenszyklusanalyse, Treibhauspotenzial, Kreislaufpotenzial, Entscheidungsfindung, multikriterielle Entscheidungsfindung, MCDM, MCDA, Analytic Network Process ANP, Bauteile, Deckenkonstruktionen

Einführung

Der Bausektor zählt zu den Hauptverursachern von Umweltbelastungen, wie aus Statistiken hervorgeht: 26,1 % des Endenergieverbrauchs [1], 40 % der Treibhausgasemissionen [2] und 40

% des Materialverbrauchs [3] sind heutzutage mit dem Bau und Betrieb von Gebäuden verbunden. Dieser ökologische Fußabdruck erstreckt sich nicht nur auf Neubauten, sondern auch auf bestehende Gebäude, da etwa 75 % der aktuellen Gebäude nicht den heutigen Standards entsprechen [4].

Die frühzeitige Festlegung von Strategien für eine nachhaltige Gestaltung ist für die Schaffung zukünftiger nachhaltiger Gebäude von entscheidender Bedeutung [5]. Die Planung und Errichtung von Gebäuden mit dem Ziel, die Umweltauswirkungen zu minimieren, ist jedoch eine anspruchsvolle Aufgabe. Viele Maßnahmen und Handlungsfelder spielen in diesem Entscheidungsprozess eine Rolle.

Die Priorisierung aller möglichen Maßnahmen für ein Projekt ist aufgrund ihrer Komplexität und Interdependenzen ein anspruchsvoller Prozess - bringt die Reduzierung des Primärenergiebedarfs, die Verringerung der Treibhausgasemissionen oder vielleicht die Erhöhung des Kreislaufwirtschaftspotenzials mehr Vorteile für ein bestimmtes Projekt? Wenn diese Kriterien bei der Planung berücksichtigt werden, welche der zahlreichen Planungsalternativen trägt am meisten zur Reduzierung der Umweltauswirkungen bei?

Die Multi-Criteria Decision Making (MCDM) ist eine Methode, die dabei hilft, diese Herausforderung zu bewältigen und Entscheidungsprozesse zu vereinfachen [6] [8]. Die Methode fördert die Auswahl der besten und vorteilhaftesten Maßnahmen für ein Projekt, insbesondere in Fällen, in denen viele Handlungsfelder und Kriterien eine Rolle spielen [1], wie beispielsweise im interdisziplinären Nachhaltigkeits- und Bausektor.

In dieser Arbeit wird untersucht, wie Nachhaltigkeit in Gebäuden mithilfe multikriterieller Entscheidungsfindung bewertet werden kann. Zunächst erfolgte eine umfassende Literaturrecherche zu Nachhaltigkeitskriterien auf Bauteilebene. Basierend darauf wurden acht Kriterien für Umwelt- und Klimaschutz ausgewählt und auf ein Forschungsprojekt in Nürnberg angewendet. Sieben Varianten von Deckenkonstruktionen wurden untersucht. Das Hauptziel besteht darin, die nachhaltigste Deckenkonstruktion für das Projekt unter

Berücksichtigung der acht verschiedenen Kriterien zu ermitteln.

Diese Arbeit fokussiert sich auf drei Hauptbereiche: Erstens liegt der Fokus ausschließlich auf den Umwelt- und Klimaschutzdimensionen der Nachhaltigkeit, wobei soziale und ökonomische Aspekte ausgeklammert werden. Zweitens beschränkt sich die Untersuchung auf Nachhaltigkeitsbetrachtungen auf Bauteilebene. Und schließlich wird ein umfassender Ansatz gewählt, der den gesamten Lebenszyklus von Bauteilen, von der Herstellung bis hin zu End-of-Life-Szenarien, betrachtet.

Stand der Forschung

Nachhaltigkeitskriterien auf Bauteilebene

Um den aktuellen Stand der Forschung in Bezug auf Umweltkriterien auf Bauteilebene zu bewerten, wurden mehrere Komponenten untersucht, darunter Zertifizierungssysteme, einschlägige Veröffentlichungen und eine Untersuchung des rechtlichen Rahmens weltweit. Im Hinblick auf die Zertifizierungssysteme wurden fünf Systeme ausgewählt. Die ausgewählten Systeme waren das britische BREEAM, das amerikanische LEED-System, das deutsche DGNB-System, das australische Green Star und das japanische CASBEE. Darüber hinaus wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um den aktuellen Stand der Gesetzgebung zur Nachhaltigkeit in der Baubranche zu erfassen.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche wurden in vier Hauptgruppen zusammengefasst: Emissionen, Energie, Ressourcen und Materialien. Kriterien wie Treibhausgasemissionen, Innenraumluftqualität, Primärenergiebedarf, Kreislauffähigkeit von Materialien und Ressourcenverbrauch wurden als äußerst relevant erachtet.

Multi-criteria decision making (MCDM)

Wie bereits erwähnt, bietet der multi-criteria decision making (MCDM) eine Lösung für die Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung mehrerer Kriterien und widersprüchlicher Präferenzen. Diese Methode bedient sich eines mathematischen Ansatzes, um die optimale Alternative aus einer Vielzahl von Optionen zu ermitteln, wobei die Perspektiven unterschiedlicher Interessengruppen einfließen und komplexe Entscheidungsprozesse vereinfacht werden. [1] [4] [5] [8]

MCDM ist ein systematischer Ansatz, der verschiedene mathematische Techniken einsetzt, um die am besten geeignete Alternative zu bestimmen. Zu den zahlreichen Methoden gehören der Analytic Hierarchy Process (AHP), der Analytical Network Process (ANP), TOPSIS, ELECTRE und andere. [8]

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Literaturrecherche über diese Schlüsselmethoden und ihre Anwendbarkeit im Bereich der Nachhaltigkeit erstellt. Basierend auf dieser Auswertung wurde der Analytical Network Process (ANP), entwickelt von Thomas Saaty, als bevorzugte Methode gewählt [9]. Der Analytical Network Process (ANP) hat sich als äußerst bedeutsam und weit verbreitet für Entscheidungsfindungsprozesse im Bereich der Nachhaltigkeit erwiesen, insbesondere aufgrund seiner Fähigkeit, die Interdependenzen zwischen den Kriterien zu berücksichtigen [9]. Die Existenz von Korrelationen zwischen Nachhaltigkeitskriterien wurde in früheren Studien ausführlich untersucht [7] und ist besonders relevant für die Methode.

Forschungsprojekt

Der Analytical Network Process (ANP) wird eingesetzt, um ausgewählte Deckenkonfigurationen (Kostengruppe 350 nach DIN 276) im Rahmen des EDUwood-Projekts in Nürnberg, Deutschland, zu untersuchen. Für die

Anwendung dieser Methode wurden die folgenden Kriterien ausgewählt: Treibhauspotenzial [kg CO₂-eq], Abiotischer-Ressourcenverbrauch (fossil [MJ] & nicht fossil [kg Sb-eq]), Schadstoffe [-], Anteil erneuerbarer Primärenergie [%], thermische Masse [kJ/m²K], Zirkularitätspotential: Pre-Use [%] & Post-Use [%]. Folgende Deckenkonstruktionen im Forschungsprojekt wurden ausgewählt:

Projekt	Deckenkonstruktion	Abkürzung
EDUwood Nürnberg, Deutschland	Stahlbetondecke	B-korr_DE_SIB
	Breitspindeldecke	B_DE_BST_IE
	Breitschichtholzdecke	B_DE_BSP_nE
	Rippendecke	B_DE_R_nE
	Hohlkastendecke	B_DE_HK_nE
	Holz-Beton-Verbundsystem - Balken	B_DE_HBV (HTB)
	Holz-Beton-Verbundsystem - Brettstapel	B_DE_HBV (BST)

Abb.1: Deckenkonstruktionen im Forschungsprojekt

Jede der Deckenvarianten wurde anhand unterschiedlicher Berechnungsmethoden bewertet. Zum Beispiel wurde eine Ökobilanz für alle sieben Deckenkonstruktionen durchgeführt, um die Kriterien GWP, PERT, ADP (fossil und nicht-fossil) zu berechnen. Die Zirkularität wurde anhand des Urban Mining Index von Anja Rosen bewertet. Die weiteren Berechnungsmethoden sind in Abb. 2 dargestellt. Anschließend wurde für jedes Kriterium ein Ranking aller sieben Bauteile erstellt. Anschließend wurde für jedes Kriterium ein Ranking aller sieben Bauteile erstellt.

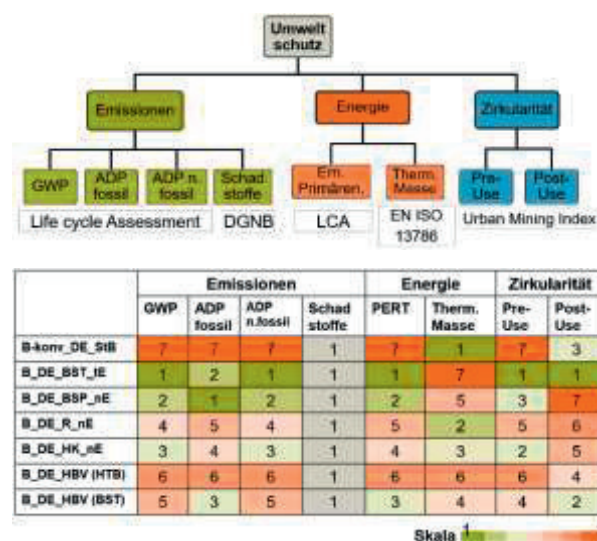


Abb.2: Definition der Kriterien und Bewertung der einzelnen Deckenkonstruktionen (eigene Darstellung)

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Methode ANP ist die Bestimmung der Interdependenzen zwischen bestimmten Kriterien [9]. Zum Beispiel könnte eine Erhöhung des Kreislaufwirtschaftspotenzials in der Pre-Use Phase die Treibhausgasemissionen verringern. Diese Zusammenhänge wurden in dieser Arbeit eingehend untersucht, und eine grafische Darstellung ist in Abbildung 4 zu sehen (durchgestrichene Linien).

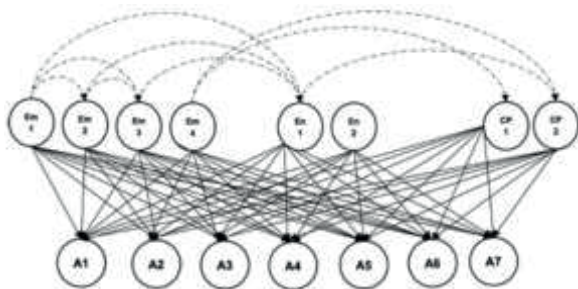


Abb.3: Multikriterielles Modell und Abhängigkeiten zwischen Kriterien (eigene Darstellung)

Ergebnisse

Die Berechnungen wurden mithilfe der Software Super Decisions durchgeführt. Das Modell (siehe Abb. 3) und die Berechnungsergebnisse (zusammengefasst in Abb.2) wurden in der Software erzeugt, um eine Rangfolge der Deckenkonstruktionen zu bestimmen. Die finalen Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt, wobei die verschiedenen Deckenaufbauten entlang der y-Achse aufgetragen sind und die endgültige Gewichtung angegeben ist (die zu einem Ranking führt - je höher die Gewichtung, desto besser).

Die Ergebnisse der Berechnungen offenbaren eindeutige Präferenzen zwischen den Deckenkonstruktionen. Die Brettstapeldecke zeigt die beste Performance, gefolgt von der Brettsperrholzdecke. Beide Holzdecken weisen bei allen Kriterien die beste Leistung auf, was darauf hindeutet, dass sie die nachhaltigsten Optionen für das Projekt EDUwood sind. Anschließend folgen die Holzhybriddecken im Ranking. Die Stahlbetondecke wird als die

schlechteste bewertet, obwohl ihre hohe thermische Kapazität (thermische Masse).

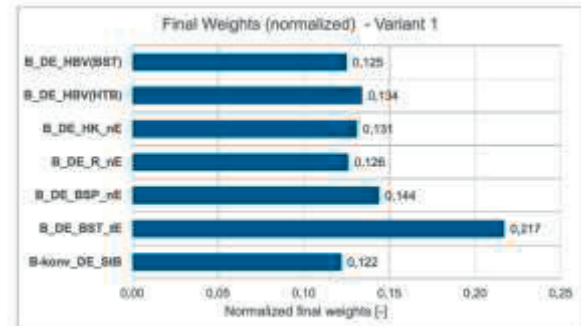


Abb. 4: Finale Rangfolge der Deckenkonstruktionen

Diskussion und Fazit

Die Anwendung des Analytic Network Process (ANP) in einer Fallstudie hat verschiedene Diskussionspunkte aufgeworfen. Hierzu zählen insbesondere die mathematische Komplexität, die mit der Methode des Analytic Network Process einhergeht. Ein weiterer Punkt ist der derzeitige Mangel an Forschung hinsichtlich der Abhängigkeiten zwischen Nachhaltigkeitskriterien.

Eine zentrale Empfehlung für zukünftige Forschungsrichtungen ist die Erforschung der Wechselwirkungen zwischen den Nachhaltigkeitsparametern. Darüber hinaus könnten alternative Methoden des Multi-Criteria Decision Making (MCDM), die sich einfach implementieren lassen (z. B. in Excel oder durch maschinelles Lernen), die Entscheidungsfindung in realen Projekten erleichtern. Mithilfe von Excel-Tools könnte die Methode in Planungsbüros von Architekten und Ingenieuren leicht angewendet werden, um die nachhaltige Entscheidungsfindung zu unterstützen.

Des Weiteren wäre die Berücksichtigung weiterer Kriterien im MCDM-Modell, wie beispielsweise im Bereich der ökonomischen und sozialen Säulen der Nachhaltigkeit, äußerst relevant, um eine ganzheitliche Betrachtung der Nachhaltigkeitsplanung zu gewährleisten.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Klumbyte, E., Bliudžius, R., Medineckiene, M., & Fokaides, P. A. (2021). An MCDM model for sustainable decision-making in municipal residential buildings facilities management. *Sustainability*, 13(5), 2820
- [2] *United Nations Environment Programme*. (2021). Global status report for buildings and construction. Global Alliance for Building and Construction
- [3] Heinrich, M., & Lang, W. (2019, February). Materials Passports - Best Practice - Innovative Solutions for a Transition to a Circular Economy in the Built Environment.
- [4] Amorocho, J. A. P., & Hartmann, T. (2022). A multi-criteria decision-making framework for residential building renovation using pairwise comparison and TOPSIS methods. *Journal of Building Engineering*, 53, 104596
- [5] Balcomb, J., & Curtner, A. Multi-criteria decision-making process for buildings. In: In Collection of Technical Papers. 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit
- [6] Saaty, T., & Vargas, L. (2001, January). Models, Methods, Concepts Applications of the Analytic Hierarchy Process. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>.
- [7] Ziembra, P. (2022). Application Framework of Multi-Criteria Methods in Sustainability Assessment.
- [8] Sangiorgio, V., Vargas, L., Fatiguso, F., & Fiorito, F. (2022). New Approaches for Multi-Criteria Analysis in Building Constructions: User-Reporting and Augmented Reality to Support the Investigation. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-83875-1>.
- [9] Saaty, T., & Vargas, L. (2006). The Analytic Network Process. https://doi.org/10.1007/0-387-33987-6_1.

Autorin

Bruna Lourenco, M.Sc. Bauingenieurwesen

Weder gang

seit 2023	Graduate Consultant im Bereich Nachhaltigkeit, Stadtplanung und Zertifizierung bei Buro Happold (München)
seit 2023	DGNB Registered Professional
2021-2023	Werkstudentin im Bereich Energie & Nachhaltigkeit bei Drees & Sommer
2020-2023	Masterstudium Bauingenieurwesen an der Technischen Universität München
2016 – 2020	Bachelorstudium Bauingenieurwesen an der Technischen Universität München
2014	Allgemeine Hochschulreife, Deutsche Schule in Rio de Janeiro, Brasilien

Betreuer

Die Arbeit wurde am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München angefertigt und wurde von Prof. Dr.-Ing. Werner Lang, M. Sc. Kathrin Theillig und M.Sc. Nico Ehlers betreut.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

POTENZIALE ZUR NACHHALTIGEN UMGESTALTUNG UND OPTIMIERUNG VON BETONKONSTRUKTIONEN

Bachelorarbeit

Erika Matjuch

Der weitverbreitete Einsatz von Beton in der Bauindustrie geht mit nachweislich negativen Umwelteinwirkungen einher. Daher ist es zwingend erforderlich diesen Umwelteinflüssen durch nachhaltige Lösungen zu entgegenzuwirken. Vielfältige Ansätze werden hierzu im Rahmen dieser Arbeit auf Grundlage einer Literaturrecherche beleuchtet. Diese umfassen die Verwendung von Recyclingmaterialien zur Herstellung von Beton, alternative Zementzusammensetzungen zur Reduzierung des Portlandzementanteils, lastorientierte Konstruktionsmethoden zur Materialeinsparung sowie gesellschaftliche und politische Handlungsspielräume. Diese Methoden werden dabei insbesondere hinsichtlich ihrer Qualität und praktischen Umsetzbarkeit bewertet. Eine vereinfachte Ökobilanzierung zeigt abschließend auf, dass das Bauwesen durch die Kombination dieser Ansätze deutlich ökologischer gestaltet werden kann.

Keywords: Nachhaltigkeit, Beton, Recyclingbeton, Zementalternativen, Ressourcenschonung, Materialeinsparung, Gesellschaft und Politik im Bauwesen

Hintergrund und Ziel der Arbeit

Der Bausektor hat einen maßgebenden Einfluss auf den Klimawandel. Ein Großteil der durch diesen Sektor entstehenden Emissionen ist auf den Betonbau zurückzuführen. Allein die Herstellung von Zement ist für bis zu 8 % der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich [1].

Trotz der Auswirkungen auf Klima und Umwelt, ist der vollständige Ersatz durch alternative Baustoffe, aufgrund der zahlreichen besonderen mechanischen und physikalischen Eigenschaften

von Beton nicht realisierbar. Vielmehr ist aufgrund des weltweiten Bevölkerungswachstums und der zunehmenden Modernisierung von Baustrukturen in Entwicklungsländern mit einem künftig wachsenden Bedarf zu rechnen [2].

Angesichts dieser Herausforderungen sind eine nachhaltige Umgestaltung und Optimierung des Betonbaus dringend erforderlich. Das daraus resultierende Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene Lösungsansätze zu untersuchen, um innovative Wege zur Bewältigung dieser Problematik aufzuzeigen.

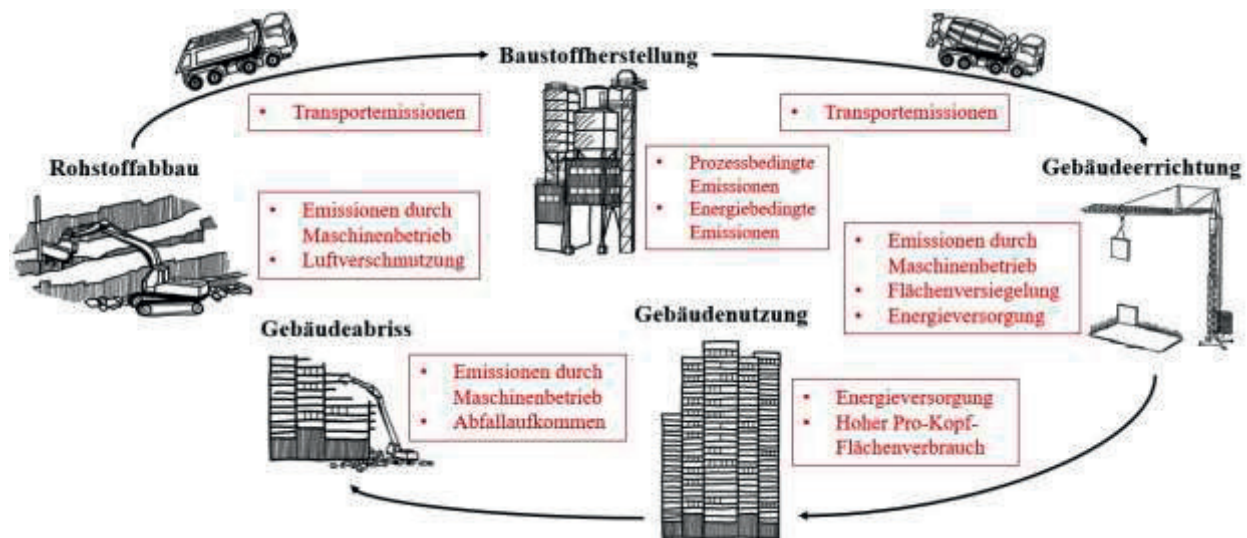


Abbildung 5: Umwelteinflüsse durch den Betonbau über die Lebensdauer eines Gebäudes hinweg.

Einflussfaktoren des Betonbaus auf die Umwelt

Die Umweltauswirkungen, die sich aus dem Betonbau ergeben, sind zahlreich und reichen von der Rohstoffgewinnung bis weit über die Fertigstellung eines Gebäudes hinaus (s. Abb. 1).

Die Folgen des Rohstoffabbaus erstrecken sich über Bodenversiegelung, sinkende Grundwasserspiegel, bis hin zur Luftverschmutzung. Ein erheblicher Anteil der durch den Betonbau bedingten CO₂-Emissionen entsteht nicht nur durch Transport und Maschinenbetrieb, sondern vor allem durch die Zementherstellung. Der soziale Wandel, gekennzeichnet durch einen Anstieg von Singlehaushalten und den steigenden Bedarf nach mehr Wohnfläche, führt zu einem erhöhten Pro-Kopf-Verbrauch von Flächen und Baustoffen. Der vorzeitige Abriss funktionsfähiger Gebäude resultiert zudem in einem gesteigerten Abfallaufkommen, wovon ein beträchtlicher Anteil aufgrund mangelnder Deponiekapazitäten ins Ausland exportiert wird.

Recyclingbeton

Eine Möglichkeit dem hohen Abfallaufkommen der Bauindustrie entgegenzuwirken, liegt in der Wiederverwertung des Bauschutts. Zum Teil geschieht dies bereits im Straßenbau [3].

Größeres Potenzial liegt jedoch in der Nutzung bei der Betonherstellung, da hierbei zugleich dem Problem der hohen Rohstoffgewinnung entgegengewirkt wird.

Die Verwendung von rezykliertem Betonsplitt ist je nach Anforderung bereits bis zu einem Anteil von 45 % zugelassen [4] und wurde in Pilotprojekten, wie dem Rathaus Korbach oder dem Büscher-Recyclinghaus bereits erfolgreich umgesetzt. Der hohe Anteil von Zementstein am Betonbruch ist dabei der limitierende Faktor für den zulässigen Anteil von Rezyklat im Beton. Dieser wirkt sich aufgrund seiner hohen Porosität negativ auf Betoneigenschaften wie Verarbeitbarkeit und Druckfestigkeit aus [5]. Aktuelle Innovationen, wie die gezielte Carbonatisierung des Betonsplitts ermöglichen die Verdichtung des Zementsteins [6]. Zugleich wird dadurch die Speicherung von erheblichen Mengen CO₂ ermöglicht. Weitere Verfahren, wie die thermisch-abrasive Behandlung oder die elektrodynamische Fragmentierung, erzielen dahingegen die fast vollständige Trennung des natürlichen Gesteins vom anhaftenden Zementstein [7,8].

Etliche Projekte aus der Praxis belegen, dass Recyclingmaterial zuverlässig auf vielfältige Weise als Ort-, Fertigteil- und Sichtbeton verwendet werden kann.

Ersatz von Portlandzement

Ein sinnvoller Einsatzbereich für den durch die Aufbereitung von Betonsplitt anfallenden Zementstein liegt in der Verwendung bei der Zementherstellung [9]. Als Hauptverursacher der CO₂-Emissionen der Bauindustrie sind Alternativen für herkömmlichen Portlandzement notwendig. Der Großteil der durch die Zementherstellung verursachten Emissionen, ist auf den Brennvorgang des im Zement enthaltenen Kalksteins zurückzuführen, bei welchem CO₂ freigesetzt wird. Durch Substitution des Portlandzements werden diese Emissionen zum Teil beachtlich reduziert.

Üblich ist dies bereits in Form von Kompositementen, welche alternative Stoffe, wie Hütten sand, Silicastaub oder Flugasche enthalten. Neuere Forschungen untersuchen neben recyceltem Zement auch calcinierte Tone, dessen Herstellung deutlich niedrigere Temperaturen erfordern [10]. Die Beschaffung solcher Tone ist aufgrund der weltweiten Verfügbarkeit nicht umständlicher als die von Kalkstein. Zudem sind zur Calcinierung keine neuartigen komplexen Technologien notwendig.

Die größere Herausforderung hinsichtlich klimafreundlicher Zementalternativen liegt jedoch in der langsameren Festigkeitsentwicklung von Zementen aus calciniertem Ton. Aufgrund dessen ist die praktische Anwendung bisher nur beschränkt zugelassen. Hinsichtlich dieser Problematik ist insbesondere die Ultraschallerhärtung ein relevanter Forschungsgegenstand, da diese dazu beitragen kann, die Erhärtung nachhaltiger Zementalternativen zu beschleunigen [11].

Alternative Konstruktionsmethoden

Neben der Reduzierung des Klinkeranteils im Zement besteht eine umfassendere Lösung darin, den Betonverbrauch auf das Nötigste zu reduzieren. Tragwerke sind innerhalb ihrer

Querschnitte unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt, variieren jedoch nach herkömmlicher Bauweise weder in ihrer Dicke noch im verwendeten Material. Der Betonbau setzt auf Wirtschaftlichkeit durch Effizienz und Schnelligkeit, weshalb die konventionelle Betonbauweise kaum mit materialschonenden Bauweisen vereinbar ist. Hier sind Innovationen gefragt, die Ökologie und Ökonomie miteinander vereinbaren.

Das 3D-Druckverfahren erweist sich hierbei, aufgrund des automatisierten Arbeitsablaufs und der hohen Einsatzflexibilität, als interessanter Forschungsgegenstand. Durch das schichtweise Auftragen des Materials, wird die effiziente Konstruktion komplexer, materialeinsparender Geometrien unter geringem Arbeitsaufwand ermöglicht [12]. Ein jüngerer Verfahren liegt in der Integration von künstlichen Lufteinschlüssen an wenig beanspruchten Bauteilstellen. Durch die automatisierte Einbringung von vorgefertigten mineralischen Hohlkörpern können insbesondere Fertigteilkonstruktionen errichtet werden, welche den Materialbedarf deutlich reduzieren [13].

Beide Ansätze stellen den Betonbau vor neue Herausforderungen. Die Realisierung komplexer Betonstrukturen erfordert Innovationen im Bereich der Bewehrungsführung. Eine Kombination aus lastorientierter Bewehrungsführung und effizientem Materialeinsatz ermöglicht jedoch erhebliche Einsparpotenziale. Insbesondere der 3D-Druck erwies sich bereits in der Vergangenheit als sowohl ökologische und aufgrund der deutlich verkürzten Bauzeit als ökonomische Technologie. Aufgrund der Komplexität dieser Bauweisen ist insbesondere eine weitere Automatisierung des Bauwesens erforderlich, um die Effizienz zu steigern.

Gesellschaftliche Handlungsfelder

Zusätzlich zu technischen Lösungsansätzen ist ein Umdenken im sozialen Rahmen erforderlich, um den Ressourcenverbrauch zu verringern.

In diesem Zusammenhang spielt der derzeit hohe Pro-Kopf-Flächenverbrauch eine tragende Rolle. Die Einführung von Wohnkonzepten, die sich an zeitgemäßen gesellschaftlichen Entwicklungen orientieren, kann sowohl dem Wohnraummangel als auch dem hohen Ressourcenverbrauch entgegenwirken. Eine in anderen Ländern bereits etablierte Methode ist das Micro-Living. Das Prinzip beruht auf der Schaffung von Wohnraum, welcher in seiner Größe limitiert, aber so konzipiert ist, dass die alltägliche Bedürfniserfüllung uneingeschränkt möglich ist [14].

Neben der Schaffung von modernem Wohnraum spielt der Erhalt von Bestandsgebäuden eine bedeutende Rolle in der Nachhaltigkeit. Oftmals werden gut erhaltene Gebäude frühzeitig abgerissen. Grund hierfür ist meist ein veraltetes Energiekonzept oder ein nicht mehr zeitgemäßer Zweck. Dabei stellen die Sanierung und Umnutzung solcher Gebäude den meist nicht nur nachhaltigeren, sondern auch ökonomischeren Lösungsansatz dar [15].

Politische Einflussfaktoren

Die meisten der genannten Maßnahmen wären ohne staatliche Intervention kaum umsetzbar. Staatliche Unterstützung ist oft unerlässlich für innovative Entwicklungen und die Umsetzung von Pilotprojekten, die auf neuer Technologie

basieren. Neben Forschung und Technologieentwicklung spielt daher politisches Handeln eine entscheidende Rolle in diesem Bereich.

Viele Forschungsprojekte sind auf Fördermittel angewiesen und etablierte Technologien benötigen geeignete Regularien, um effektiv in der Praxis angewendet zu werden. Eine Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen ist ebenfalls notwendig, um beispielsweise Umnutzungsmaßnahmen zu erleichtern. Vor allem ist es wichtig, das Bewusstsein für Nachhaltigkeit im Bausektor zu schärfen und Bildung über geeignete Maßnahmen zur klimafreundlichen Umgestaltung zu fördern, um Entwicklungen dieser Art voranzutreiben. Das politische Handlungsfeld ist groß und es sollte im Interesse des Staates liegen, den Betonbau auf dem Weg zur nachhaltigen Entwicklung zu unterstützen.

Fazit

Die Möglichkeiten den ökologischen Fußabdruck des Betonbaus zu reduzieren sind vielfältig (s. Abb. 2). Zahlreiche Projekte belegen bereits die ökologische und ökonomische Relevanz und Umsetzbarkeit vieler dieser Methoden. Um das volle Potenzial einer nachhaltigen Optimierung des Betonbaus auszuschöpfen, sollten auch bisher weniger erforschte Bereiche weiter untersucht werden.

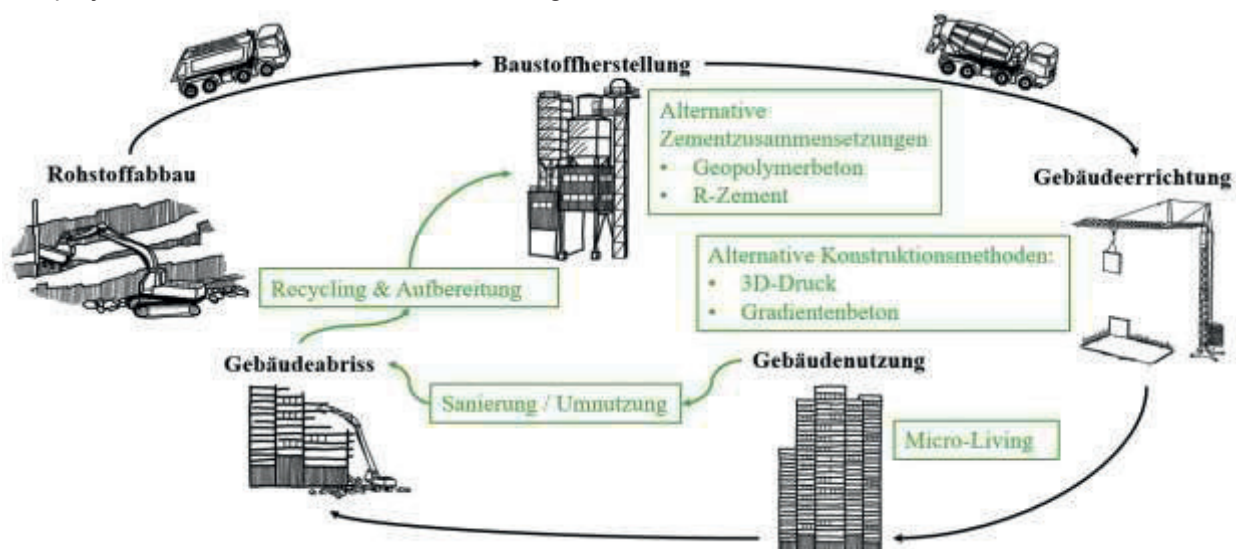


Abbildung 6: Methoden zur nachhaltigen Optimierung von Beton

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte und für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [1]: R. M. Andrew, „Global CO₂ emissions from cement production, 1928-2018“, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 195-217, Januar 2018
- [2]: W. Sobek, *non nobis – über das Bauen in der Zukunft - Band 1: Ausgehen muss man von dem, was ist*, Stuttgart: avedition GmbH Publishers for Architecture and Design, 2022
- [3]: F. Schwarzkopp, S. Loyer, J. Blazejczak und M. Gornig, *Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine- Erden-Industrie bis 2040 in Deutschland*, Berlin: Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V., Februar 2022
- [4]: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton*, DIN 1045-2, Juli 2022
- [5]: J. Scheidt und W. Breit, „Aufweitung der vorhandenen Anwendungsbeschränkungen für Beton mit rezyklierter feiner und grober Gesteinskörnung (Teilvorhaben 3)“, in *Schlussberichte zum BMBF-Verbundforschungsvorhaben „R-Beton – Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation“ – Schwerpunkt 2: Praxisanforderungen an die neuen Werkstoffe*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 639, Berlin: Beuth, 2022
- [6]: M. Seidemann, A. Müller und Horst-Michael Ludwig, *Weiterentwicklung der Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen aus Altbeton (2. Phase: Prozessoptimierung im Labormaßstab und Technologieentwurf)*, Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, Bauhaus-Universität Weimar, November 2015
- [7]: Y. Sui und A. Mueller, „Untersuchung der Einflussgrößen der thermisch-mechanischen Behandlung für das Altbetonrecycling Thermo-mechanical treatment Thermisch-mechanische Behandlung“, *Aufbereitungs-Technik/Mineral Processing*, Jg. 52, S. 60-69, März 2011
- [8]: T. Keller, M. Streicher Porte und H. Schuler, „Elektrodynamische Fragmentierung von Betonabbruch“, *Recy & DepoTech 2016*, Leoben Österreich: Montanuniversität Leoben, 2016
- [9]: C. Müller, K. Severins und G. Spanke, „Leitlinien künftiger Anwendung im Zement und Beton – Brechsand als Zementhauptbestandteil“, *Beton*, Nr. 9, S.338-345, 2020
- [10]: K. Thienel und N. Beuntner, „Calcinierte Tone und ihr Potenzial für die moderne Betontechnologie“ in *Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen*, J. Link, M. Haist, F. Dehn und U. Noltings, Hg., KIT Scientific Publishing, S. 37-48, März 2018
- [11]: R. Remus, *Ultraschallgestützte Betonherstellung – Konzept für eine ressourcenschonende Betonproduktion*, Dissertation, Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar, Januar 2023
- [12]: H. Kloft, M. Empelmann, N. Hack, E. Herrmann und D. Lowke, „Bewehrungsstrategien für den Beton- 3D-Druck“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 115, Juli 2020
- [13]: W. Sobek und Daniel Schmeer, „Gradientenbeton 2.0 – Ressourcenoptimierung durch Kombination von Hohlkörperbauweise und Trajektorienbewehrung“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 118, Nr. 5, S. 303-309, 2023
- [14]: N. M. H. Soub und I. Memikoglu, „Exploring the Preferences for Micro-Apartments“, *Online Journal of Art and Design*, Jg. 8, Nr. 2, April 2020
- [15]: I. Glander, N. Hipp, B. Preuß, A. Reese, I. Klocke und I. Mazzoni, *Baukultur Bericht – Neue Umbaukultur 2022/23*, 2. Auflage, Baukultur Bundesstiftung, Februar 2023

Autor

Matjuch, Erika

Nach ihrem Abitur am Comenius-Gymnasium Deggendorf im Jahr 2018 nahm Erika Matjuch ein Studium im Fach „Bauingenieurwesen“ an der Technischen Hochschule Georg Simon Ohm in Nürnberg auf, das sie im Jahr 2024 mit dem Bachelor of Engineering erfolgreich abschloss.

Betreuer

Die Arbeit wurde an der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm unter Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann und Prof. Dr.-Ing. Paul Lorenz angefertigt.

Die Arbeit wurde mit dem 3. Preis ausgezeichnet.

BEMESSUNG EINES WU-KELLERS AUS STAHLFASERBETON MITHILFE EINER MATERIAL-SPEZIFISCHEN IMPLEMENTIERUNG IN EINEM FEM SYSTEM

Bachelorarbeit

Max Peetz

Die gegenwärtige Situation des Baugewerbes ist unter anderem von zwei entscheidenden Faktoren geprägt, einem anhaltenden Fachkräftemangel und einem erheblichen Anstieg der Baustoffpreise. Diese Herausforderungen erfordern innovative Lösungsansätze, um Bauvorhaben effizienter und kostengünstiger gestalten zu können. Durch den Einsatz von Stahlfaserbeton verringern sich die lohnintensiven Bewehrungsarbeiten, was zu einer Bauzeitverkürzung sowie zur Reduzierung der verbauten Stahlmenge führt. Die vorliegende Arbeit konzentrierte sich auf die Bemessung und Ausführung von Stahlfaserkonstruktionen. Ziel ist es, bei der Bemessung eines WU-Kellers, am Beispiel des Musterhauses der Rohbauausführungsdetails des LBB, unter Einhaltung der aktuell geltenden Vorschriften, vollständig oder größtenteils auf Betonstahlbewehrung zu verzichten. Da der Nachweis von Stahlfaserbetonbauwerken wirtschaftlich nur mit einer nichtlinearen FEM-Berechnung umsetzbar ist, erfolgte eine umfassende Implementierung der baustoffspezifischen Materialeigenschaften in die FEM-Lösung der SOFiSTiK AG. Darüber hinaus wurde versucht, einen Regelablauf für die Bemessung von faserbewehrten Bauteilen festzulegen.

Keywords: Stahlfaserbeton, FEM, Implementierung, WU-Keller, Bodenplatte, LBB-Musterhaus

Grundlagen zur Bemessung von Stahlfaserbeton

Die Bemessung von Stahlfaserbetonen wird von vielerlei materialspezifischen Eigenschaften beeinflusst. Im Gegensatz zum Stahlbeton ist Stahlfaserbeton in der Lage Kräfte über sämtliche Rissufer zu leiten [1], da die während des Mischvorgangs beigefügten Stahlfasern

gleichmäßig über den betonierten Baukörper verteilt sind.

Die Problematik beim Nachweis von Stahlfaserbetonbauteilen besteht in den zum Stahlbeton abweichenden Last-Verformungs-Verhalten. Dieses befindet sich bei den verfügbaren und geregelten Stahlfaserbetonen ausschließlich im

unterkritischen Bereich. Das bedeutet, dass die Tragwirkung des Querschnitts sprunghaft nach Erstrissbildung abfällt und mit zunehmender Makrorissbildung kontinuierlich abnimmt (Abb.1).

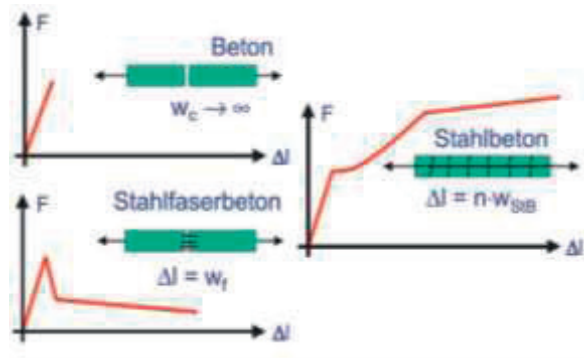


Abb.1 Last-Verformungsverhalten von Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton [2]

Das Last-Verformungsverhalten von unterkritischen Stahlfaserbetonen lässt eine Ausführung ohne zusätzlicher Betonstahlbewehrung nur dann zu, wenn plastische Lastumlagerungsmöglichkeiten durch Rissbildung vorhanden sind und trotz der abfallenden Festigkeit ein Gleichgewicht am Gesamtsystem ausgebildet werden kann. Dies gilt in aller Regel für statisch unbestimmte Systeme sowie elastisch gebettete Bodenplatten [1].

Die Steigerung der Systemtragfähigkeit sowie eine realistische Abbildung des Verformungsverhaltens unter Berücksichtigung von Lastumlagerungen bzw. Plastifizierungen ist wirtschaftlich nur mit einem nichtlinearem Berechnungsverfahren zu ermitteln, welche im Zusammenspiel mit der in der Arbeit entwickelten Implementierung durchgeführt wurde.

Implementierung

Die für die Implementierung notwendigen Materialkennwerte des Stahlfaserbetons werden durch die in der DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ [2] festgelegten Spannungs-Dehnungs-Beziehung definiert. Die Arbeitslinien weichen dabei je nach Gebrauchszustand voneinander ab.

In der Texteingabe des FEM-Programms der SOFiSTiK AG wurde zur Bemessung von Stahlfaserbetontragwerken eine automatische Berechnung des Bemessungswertes der Nachrisszugfestigkeit, sowie die Definition der sich je nach Gebrauchszustand unterscheidenden Arbeitslinien aus der Angabe der verwendeten Leistungsklassen implementiert.

Des Weiteren musste über die Texteingabe das nichtlineare Berechnungsverfahren und die dafür relevanten Berechnungsparameter, sowie die dafür vorab definierten Lastfallkombinationen festgelegt werden.

Bemessung am Beispiel des WU-Kellers

Mit dem im Rahmen der Arbeit entwickelten Bemessungsschema wurde versucht bei der Bemessung des WU-Kellers auf konventionelle Stabstahlbewehrung zu verzichten. Dieses Bemessungsschema bildet dabei einen Grundstein, für ein allgemeines Vorgehen bei der Bemessung von rein stahlfaserbewehrten Querschnitten in statisch unbestimmten Systemen und versucht alle nötigen Nachweise in möglichst wenigen Arbeitsschritten abzuarbeiten.

Der reale Volumenkörper wird dazu zuerst in ein aus gekoppelten, zweidimensionalen Flächen-tragwerken bestehenden Körper übersetzt. Wichtig ist dabei, dass trotz der Abstraktion des Tragwerks, das Tragverhalten des Volumen-körpers, sowie die Bettung der Bodenplatte, realitätsgetreu abgebildet wird.

Da die Schnittkräfte der Einzellastfälle nicht superpositioniert werden können, sind die für die Bemessung maßgebenden Kombinationen vorab mit ingenieurmäßigen Überlegungen zu erörtern.

Das modifizierte FEM-Programm von SOFiSTiK wurde hier primär als Hilfsmittel zur nichtlinearen Schnittkraftermittlung verwendet. Der eigentliche

Diskussion der Bemessungsergebnisse

Die Biegebemessung der Bodenplatte ergab, dass bei den hier angesetzten Belastungen und dem gewählten Bettungsmodul nur auf Bewehrungsstahl verzichtet werden kann, wenn eine nicht lieferbare Leistungsklasse (L2,7/2,4) verbaut werden würde. Alle anderen Nachweise (Querkraft, Durchstanzen, Rissbreite, Verformung etc.) wurden mit lieferbaren Leistungsklassen erfüllt. Selbst die Rissbreiten, verursacht durch die behinderte Formänderung des Betons infolge der Abbindeprozesse, konnte für die Bodenplatte ohne Bewehrungsstahl nachgewiesen werden.

Besonders problematisch stellte sich der durch Hydratationswärmabfluss und Schwinden verursachte äußere Zwang zwischen Bodenplatte und den aufgehenden Wänden heraus. Die zur Reduzierung der Rissbreite benötigte Bewehrung kann nach Norm bei den üblichen unterkritischen Stahlfaserbetonen zu lediglich 20% eingespart werden. Um den Einsatz von Bewehrungsstahl auf ein Minimum zu begrenzen, wurde in der Mitte der langen Außenwandseiten jeweils ein Sollrisselement angeordnet.

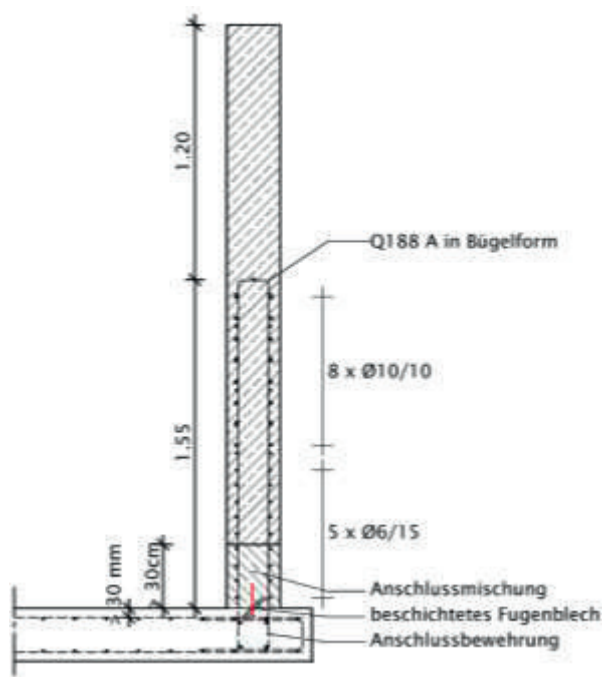


Abb. 5: Detail der Bewehrungsführung am Wandfuß

Fazit

Die Frage, ob durch den Einsatz von Stahlfaserbeton die herkömmliche Ausführungsart eines wasserundurchlässigen (WU) Kellers optimiert werden kann, ist mit dieser Arbeit nicht abschließend beantwortet. Vor allem die Problematik der rissbreitenbeschränkenden Bewehrung in den Wänden macht eine ausschließlich mit Stahlfasern bewehrte Ausführung unmöglich. Durch weiterführende Untersuchungen der durch Zwang induzierten Risse bei Stahlfaserbeton könnte die rissbreitenbeschränkende Bewehrung auch in diesen Bereichen weiter reduziert werden.

Aus einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergaben sich Abweichungen im finanziellen Aufwand der jeweiligen Konstruktionsarten. Die dem Beton zugegebenen Stahlfasern erhöhen dessen Einkaufspreis, jedoch können die dadurch gestiegenen Materialkosten durch die Bewehrungsstahleinsparungen kompensiert werden. Der größte Vorteil der Stahlfaserbetonausführung liegt in den wegfallenden bzw. minimierten Bewehrungsarbeiten. Dieser Effekt spiegelt sich sowohl in den Lohnkosten als auch in einer verkürzten Bauzeit wieder. Der Einsatz von Stahlfaserbeton erweist sich damit als besonders wirtschaftlich, wenn auf zusätzliche Stahlbewehrung vollständig verzichtet werden kann.

Durch die Ausführung des Kellers mit Stahlfaserbeton kann unter den gegebenen Randbedingungen auf circa 1,5 Tonnen Stahl verzichtet werden. Dieses Ergebnis ist vor allem im Kontext der Nachhaltigkeitsdebatte besonders hervorzuheben.

Abgesehen von WU-Kellern ist ein flächendeckender Einsatz von Stahlfasern zur Bewehrung von ebenerdigen Bodenplatte möglich. Insbesondere bei niedrigbeanspruchten Flachgründungen von Einfamilienhäusern oder kleineren Mehrfamilienhausbauten könnte die Variante der Stahlfaserbewehrung eine wirtschaftlichere und ressourcenschonendere Alternative darstellen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D.: Beton-Kalender 2021, Ernst & Sohn. 2021.
- [2]: DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton. Juni 2021.
- [3]: Ruhr Universität Bochum: Bemessungsprogramm für Stahlfaserbetonbauteile: Berechnen - Bemessen - Optimieren, bit.ly/3NW5omT.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton. Juni 2021.
2. DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie). Dezember 2017.
3. SOFiSTiK AG: Handbuch: ASE - Allgemeine Statik der FE Strukturen. 2023.
4. Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D.: Beton-Kalender 2021, Ernst & Sohn. 2021.
5. Gossla, U.: Nichtlineare Berechnung von Faserbetonbauteilen mit SOFiSTiK, Fachhochschule Aachen.

Autor

Max Peetz, B. Eng. (OTH Regensburg), Zimmerer

Seit 2023 Masterstudium des Bauingenieurwesens, TU München

Seit 2023 Werkstudent, Bergmeister Ingenieure GmbH

2018 - 2023 Duales Studium des Bauingenieurwesens / Ausbildung zum Zimmerer,
OTH Regensburg/ Peetz Bau GmbH

2018 Allgemeine Hochschulreife, Schiller-Gymnasium Hof

Betreuer

Die Arbeit wurde im Fachbereich des konstruktiven Ingenieurbaus der OTH Regensburg angefertigt.

Betreuer/Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Finckh, Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Othmar Springer.

Die Arbeit wurde mit dem 2. Preis ausgezeichnet.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUM KURZ- UND LANGZEITVERBUNDVERHALTEN SOWIE ZUR TRAGWIRKUNG VON BASALTFASERVERBUND-KUNSTSTOFFBEWEHRUNG (BFVK) IN RECYCLINGBETON

Masterarbeit

Raphael Pichlmayr

Die Lebensdauer von Bauteilen aus Stahlbeton wird vor allem im Bereich der Infrastruktur stark durch chloridinduzierte Bewehrungskorrosion begrenzt, die sich aus dem Einsatz von Taumitteln ergibt. Ebenfalls unterliegt der Einsatz von R-Betonen normativen Einschränkungen, die eine Anwendung in den tausalzbelasteten Umgebungsbedingungen der Expositionsklassen XD3 und XS3 ausschließen. Um eine Bauweise zu etablieren, die sowohl der Problematik der Bewehrungskorrosion Rechnung trägt als auch den Anwendungsrahmen von R-Beton erweitert, wurde an der Hochschule München umfangreiche Forschung betrieben. Die hier vorgestellten Untersuchungen fanden im Rahmen eines Forschungsvorhabens, das sich dem Einsatz von nichtrostender Faserverbundkunststoffbewehrung aus Basalt (BFVK) in Brückenkappen widmete, statt. Aufbauend auf betontechnologischen Vorversuchen wurden experimentelle Untersuchungen zum Verbund- und Zugtragverhalten von mit Basaltfaserstäben bewehrten Betonkörpern aus R-Beton durchgeführt. Anhand der Untersuchungsergebnisse konnte festgestellt werden, dass der Einsatz von R-Beton mit bis zu rd. 2/3 RC-Anteil weder das Verbundverhalten noch die Festbetoneigenschaften merklich beeinflusst. Basaltbewehrung zeigt im Vergleich zu Stahlbewehrung eine erhöhte Kriechneigung, was mit dem geringeren E-Modul zu erklären ist. Insgesamt lassen die Untersuchungsergebnisse ein großes Potential für zukünftige Praxisanwendungen im Bauwesen erahnen. R-Beton und Basaltbewehrung können einen wertvollen Beitrag leisten, um Bauwerke umweltverträglicher und dauerhafter zu machen.

Keywords: Betontechnologie; Recyclingbeton; Nachhaltigkeit; ressourcenschonende Bauweise; Basaltfaserstabbewehrung; BFVK; nichtmetallische Bewehrung; Verbundverhalten; Zugtragverhalten;

1 Einleitung

Das Baugewerbe gehört neben anderen Sektoren wie dem Verkehr und der Landwirtschaft zu den

Hauptverantwortlichen für den hohen Ausstoß an klimaschädlichen Treibhausgasen, die das weltweite Klima belasten. So gehen rund 8 % der CO₂-Emissionen weltweit auf die Betonher-

stellung zurück [1]. Ein Ansatz, der zumindest in Teilen Abhilfe schaffen kann, ist der forcierte Einsatz von R-Betonen, also Betonen aus rezyklierter Gesteinskörnung.

Derzeit wird ein Großteil der aus Betonabbruch gewonnenen Materialien als Füllstoff im Tief- und Wegebau eingesetzt. Häufig aber ermöglichen die wiederaufbereiteten Gesteinsfraktionen auch die Herstellung von Beton, der hinsichtlich seiner Qualität dem Referenzbeton aus natürlicher Gesteinskörnung nicht nachsteht. Der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung ist jedoch in Deutschland in einen engen normativen Rahmen gefasst. So ist nach entsprechender DAfStb-Richtlinie [2] nur die Zugabe von bis zu maximal 45 Vol.-% rezyklierter Gesteinskörnung (Typ 1) in Abhängigkeit der Expositionsklasse zulässig, und dies auch nicht bei allen Anwendungsfällen.

2 Ausgangsmaterialien

Die verwendete Gesteinskörnung der Verteilungsgrößen 0/4 mm und 4/8 mm wurde aus dem Abbruch von Bahnschwellen gewonnen. Die Gesteinskörnung ist dem Typ 1 (Betonsplitt) gemäß DAfStb und DIN EN 12620 [3] zuzuordnen. Die festgestellte Sieblinie entspricht der Norm-Sieblinie AB8.

Als Bewehrung wurde zweiseitig gerippte BFVK-Bewehrung verwendet. Diese besteht aus einem Kernquerschnitt aus longitudinal angeordneten Basaltfaserbündeln und einer umgebenden, stoffschlüssig angeschlossenen Harzmatrix, in welche die Rippung eingefräst ist.



Abb. 1: Verwendete BFVK-Bewehrung

3 Voruntersuchungen

Rezyklierte Gesteinskörnung weist im Unterschied zu natürlicher Gesteinskörnung eine deutlich höhere Porosität auf. Daraus ergibt sich eine ausgeprägte Wasseraufnahme, die im Vorfeld nach dem BVK-Verfahren nach DIN EN 1097-6 Anhang D [4] ermittelt wurde. Zudem wurde die Rohdichte für den Betonentwurf untersucht.

3.1 Betonentwurf

Insgesamt wurden drei unterschiedliche Betonrezepturen entworfen. Bei der ersten Rezeptur bestand die Gesteinskörnung vollständig aus natürlicher Körnung (Referenzbeton REF). Bei den übrigen beiden Rezepturen wurde ein Großteil der Kornfraktionen durch rezyklierte Körnung ersetzt. Einmal von 1 bis 8 mm (R1: rd. 69 Vol.-% RC) und einmal vollständig von 0 bis 8 mm (R2: 100 Vol.-% RC).

3.2 Frisch- und Festbetoneigenschaften

Um einheitliche betontechnologische Eigenschaften zu gewährleisten, wurden im Zuge jeder Betonage das Ausbreitmaß, die Frischbetonrohichte und der Luftporengehalt bestimmt.

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit, der zentrischen Zugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls wurden Festbetonversuche durchgeführt. Die Druckfestigkeitsprüfungen erfolgten an insgesamt 46 Betonwürfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm. Das Elastizitätsmodul wurde an 13 Zylindern mit jeweils 100 mm Durchmesser und 200 mm Höhe untersucht. Die zentrische Zugfestigkeit wurde an insgesamt sechs unbewehrten Betonknochen ermittelt. Die Ergebnisse der Festbetonprüfungen (Mittelwerte) sind in Tabelle 1 dargestellt.

Rezeptur	Druckfestigkeit	Elastizitätsmodul	Zentrische Zugfestigkeit
[–]	[N/mm ²]		
R1	60,5	33200	3,77
R2	32,7	16800	2,24
REF	58,9	27500	5,0

Tabelle 1: Ergebnisse Festbetonprüfung (charakteristische Mittelwerte)

4 Experimentelle Untersuchungen

Das Versuchsprogramm umfasste Zugversuche von basaltbewehrten Betonkörpern, unter quasistatischer Kurzzeitbelastung sowie unter zyklischer Belastung und Langzeitbiegeversuche (Dauerstand) von basalt- und stahlbewehrten Betonbalken über einen Zeitraum von drei Monaten. Die Prüfkörper wurden chargenweise gefertigt, die Prüfungen begannen i. d. R. nach einer Lagerung von 28 Tagen. Die Bauteilversuche umfassten acht Chargen.

4.1 Zugversuche

Zur Untersuchung des Zugtragverhaltens von R-Beton mit Bewehrung aus BFVK wurden prismatische Versuchskörper angefertigt. Ihre Geometrie (Abb. 2) geht auf frühere Versuche an der Hochschule München sowie an der Technischen Universität München zurück [5] [6].

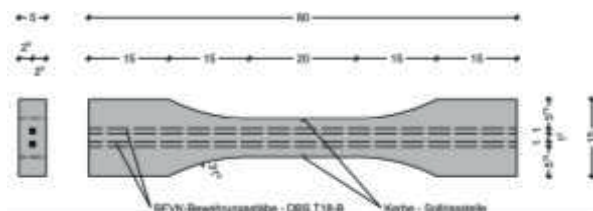


Abb. 2: Geometrie der Prüfkörper nach [6], Maße in cm

Die Versuchskörper wurden über eine aufgeklebte Lasteinleitungsstruktur quasi-starr an die Prüfmaschine angeschlossen und bis zu einer Maximallast von 40 kN belastet.

Die Verformungen der Prüfkörper wurden mit potentiometrischen Wegaufnehmern und optischem DIC-System aufgezeichnet. Nach Versuchsende wurden die aufgetretenen Risse an den Prüfkörpern nachgezeichnet und anschließend in Rissplänen kartiert. Der Versuchsaufbau, die Darstellung im DIC-System und die Risskartierung sind in Abb. 3 dargestellt.

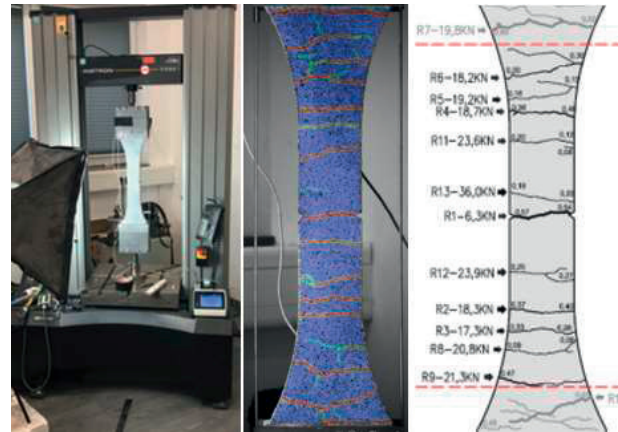


Abb. 3: Versuchsaufbau, Rissauswertung im DIC und Rissauswertung (v.l.n.r.)

Hinsichtlich der Versuchsdurchführung unterschied sich die Belastungsart und die Prüfmaschinensteuerung:

- quasistatisch: weggesteuerte Belastung (1 mm/min) bis max. Last (40 kN) oder vorheriges Versagen
-
- zyklisch: weggesteuerte Belastung bis Erreichen 25 kN, anschl. kraftgesteuerte zykl. Belastung mit 5 bis 10 kN/s zw. $F_U = 10$ kN und $F_O = 25$ kN (1000 Lastwechsel), anschl. weggesteuerte Belastung bis Erreichen F_{max} (40 kN) oder vorheriges Versagen

Aus den gewonnenen Daten wurden Kraft-Verformungsdiagramme erstellt, die die Unterschiede der Chargen in Hinblick auf die unterschiedlichen Betonrezepturen (RC-Gehalt) und Belastungsarten aufzeigen (Abb. 4).

Die Ergebnisse der Rissauswertung sind in Tabelle 2 (Mittelwerte) zusammengefasst.

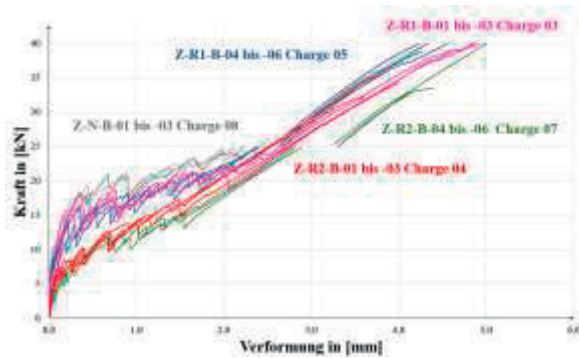


Abb. 4: Kraft-Verformungs-Verläufe der Zugversuche – BFKV-bewehrte Prüfkörper aus R-Beton (quasistatisch und zyklisch)

Charge/ Rezeptur	F_1^1	F_2^2	F_{max}	u_{max}^3	w_m^4	a_m^5	Anz.
[-]	[kN]			[mm]			[Stk.]
03/R1	6,0	22,8	40	4,86	0,27	4,4	13 - 14
04/R2	5,1	17	33,8	3,89	0,37	6,9	7 - 8
05/R1	7,0	21,0	39,6	4,40	0,33	4,5	11 - 13
07/R2	4,4	15,0	35,5	4,36	0,42	6,4	8 - 11
08/REF	9,7	24,7	40	4,32	0,30	4,2	12 - 14

Tabelle 2: Ergebnisse der Zugversuche

4.2 Dauerstandversuche

Um das Verbundkriechverhalten von basaltbewehrtem R-Beton im Vergleich zu stahlbewehrtem R-Beton abschätzen zu können, wurden Dauerstandversuche durchgeführt. Insgesamt wurden hierzu sechs Prüfkörper angefertigt und über einen Versuchszeitraum von drei Monaten als Biegeversuch geprüft.

5 Zusammenfassung

Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den Untersuchungen zusammengefasst:

- Bei den Rezepturen mit einem RC-Anteil von bis 69 Vol.-% (REF, R1) konnte die geforderte

Mindestdruckfestig erreicht werden. Bei 100 % RC-Anteil zeigte sich ein prägnanter Abfall der Festigkeitseigenschaften. Die Mindestanforderungen wurden verfehlt.

- Im direkten Vergleich der basaltbewehrten Zugversuche mit unterschiedlichem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung zeigte sich, dass das Zugtragverhalten bei Verwendung von bis zu 69 Vol.-% RC-Körnung kaum beeinflusst wird. Bei weiter erhöhtem RC-Anteil fallen die Anfangssteifigkeit, die Kraft beim Übergang in den Zustand der abgeschlossenen Rissbildung und die Anzahl der Risse geringer aus. Rissbreiten- und abstände sowie Maximalverformungen nehmen dagegen zu.
- Bei der Gegenüberstellung der quasistatischen zu den zyklischen Zugversuchen ließ sich eine Zunahme der Rissbreiten von rd. 14 bis 19 % feststellen. Darüber hinaus entfiel das Mitwirken des Betons zwischen den Rissen („tension stiffening“) im Zuge der aufgetragenen Lastzyklen bei 100 Vol.-% RC nahezu vollständig.
- Aus den Ergebnissen der Dauerstandversuche geht hervor, dass sowohl der Einsatz von BFKV-Bewehrung als auch ein steigender RC-Anteil die Verbundkriechneigung erhöht.

5 Ausblick

Im Hinblick auf eine angestrebte Praxisanwendung von Basaltbewehrung in R-Beton sind weitergehende Untersuchungen erforderlich. An der Hochschule München sind dazu unter anderem bereits Pull-out-Versuche unter Dauerlast und alkalischen Umgebungsbedingungen geplant. Gelingt es, die untersuchte Bauweise standardmäßig in die Praxis zu bringen, so kann damit ein wertvoller Beitrag zur Nachhaltigkeit geleistet werden.

¹ Mittlere Erstrisskraft

² Mittlere Kraft bei abgeschlossenem Rissbild

³ Mittlere Gesamtverformung

⁴ Mittlere Rissbreite

⁵ Mittlerer Abstand der Risse untereinander

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: WWF Deutschland, „Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie“, Berlin, Feb. 2019.
- [2]: DAfStb-Richtlinie, „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Sep. 2010.
- [3]: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton“. Beuth, Berlin, Juli 2008.
- [4]: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; Deutsche Fassung EN 1097-6:2022“, Beuth, Berlin, Mai 2022.
- [5]: D. Glomb, „Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Riss- und Zugtragverhalten von Betonkörpern mit Bewehrung aus Basaltfaserverbundkunststoff (BFVK)“, Hochschule München, 2018.
- [6]: B. Fitik, „Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) bei zyklischer Beanspruchung im Druck-Zug-Wechselbereich“, Technische Universität München, 2011.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. D. Glomb, „Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Riss- und Zugtragverhalten von Betonkörpern mit Bewehrung aus Basaltfaserverbundkunststoff (BFVK)“, Hochschule München, 2018.
2. J. Niewels, „Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit Faserverbundkunststoffbewehrung“, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2008.
3. L. Franke, „Einfluß der Belastungsdauer auf das Verbundverhalten von Stahl in Beton (Verbundkriechen)“, DAfStb Heft 268, Berlin, 1976.
4. M. Pahn und C. Caspari, „Lückenforschung Faserkunststoffbewehrung (FKB), Fraunhofer IRB, Kaiserlautern, 2020.

Autor

Raphael Urs Pichlmayr, M. Eng., Bauingenieur seit 2023, davor Holzbauingenieur (B. Eng.) seit 2020, Ausbildung zum Zimmerer, abgeschlossen 2013 in Anzing, bei München.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Bauwerkserhaltung, Fachbereich der Hochschule München, Professor Dr. -Ing. Christoph Dauberschmidt; M. Eng. Daniel Glomb (Wissenschaftlicher Mitarbeiter); M. Sc. Benjamin Wolf (Wissenschaftlicher Mitarbeiter)

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN VORGESCHÄDIGTEN GROSSFORMATIGEN UHFSB-NORMALBETON VERBUNDBAUTEILEN

PLANUNG, DURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG VON 4-PUNKT-BIEGEVERSUCHEN

Masterarbeit

Puth, Cornelius

Der Beitrag behandelt die Verstärkung und Instandsetzung von Stahlbeton mit Ultra-Hochleistungs Faserverstärktem Spritzbeton (UHFSB). In experimentellen Untersuchungen wurden Stahlbeton-Großbauteile mit den Abmessungen $L \times B \times H = 3,15 \times 0,20 \times 0,25$ m hergestellt. Die Bauteile wurden mit einer externen Stahlkonstruktion bis zu einer definierten Rissweite belastet. Anschließend fand eine Verstärkung der Bauteile durch das Auftragen einer 4 cm dünnen Schicht aus UHFSB statt. Die Verbundbauteile wurden sowohl mit als auch ohne zusätzlicher Stabstahlbewehrung in der Verstärkungsschicht hergestellt. In anschließenden Bauteilprüfungen konnte eine Tragfähigkeitssteigerung der Verbundbauteile gegenüber der Referenzprobekörper von bis zu 120% festgestellt werden. Bei der Betrachtung der Rissbildung wurde durch Bildkorrelation eine Multirissbildung mit feinen Rissen in der UHFSB-Schicht detektiert. Ebenso wurde bei Verbundbauteilen mit Bewehrung ein ausgeprägtes rissüberbrückendes Verhalten identifiziert. Die erfolgreiche Anwendung der Verstärkung von vorgeschädigten Stahlbetonbauteilen ist eine große Chance für die Baupraxis, die Instandsetzung mit UHFSB als alternatives Verfahren auszuführen.

Keywords: Instandsetzung und Verstärkung, Ultra-Hochleistungs Faserverstärkter Spritzbeton (UHFSB), Anwendungsorientierte Forschung, Digitale Bildkorrelation (DIC), Großbauteilversuche

Allgemein

Ein Großteil der Ingenieurbauwerke aus Deutschland wurde in den 70er Jahren gebaut. Um den Abriss und Wiederaufbau zu vermeiden, werden innovative Lösungsansätze gesucht. Ertüchtigungen mit geringen Mengen Ultra-

Hochleistungs Faserverstärktem Beton (UHFB) können die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit dieser verbessern. Ein besonderer Kennwert ist die hohe Druckfestigkeit des Hochleistungsbaustoffes von über 130 N/mm^2 . Schlanke Bauwerke aus UHFB haben gegenüber konventionellen außerdem einen geringeren

Umwelteinfluss [1]. So können CO₂ Emissionen durch Ressourceneinsparung reduziert werden. Der innovative Baustoff Ultra-Hochleistungs Faserverstärkter Spritzbeton (UHFSB) steht in dieser Untersuchung im Zusammenhang mit der Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbetonstrukturen. Die Anwendung des Materials erfolgt durch das Auftragen dünner Ergänzungsschichten. Durch diese Anwendung entstehen UHFSB-Stahlbeton Verbundbauteile. Die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit des bestehenden Bauwerks/-teil werden, analog zu konventionellem UHFB, wiederhergestellt oder verbessert. Vorhandene Risse im Stahlbeton sollen dabei durch feine Multirisse im UHFSB überbrückt werden. Diese Arbeit wurde an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München (HM) im Rahmen des Forschungsprojekts i-SCUP (Instandsetzung-Shotcrete Ultra High Performance) [2],[3] erstellt und ist zugleich eine laborbegleitende Untersuchung zu einem Pilotprojekt. Die Thesis umfasst die Planung, Durchführung und Auswertung der Großbauteilversuche. Um eine reale Instandsetzung/Verstärkung zu simulieren wurden die Stahlbetonbauteile zunächst vorgeschädigt.

Aufbau und Fragenstellung

Bei dieser wissenschaftlichen Arbeit wurde zunächst eine Literaturrecherche zum Stand der Technik und Wissenschaft durchgeführt. Anschließend erfolgte eine Vordimensionierung der Probekörper und eine entsprechende Prüfeinrichtung wurde gewählt.

Zunächst wurden die Stahlbetongrundkörper hergestellt. In einer Stahlvorrichtung wurden die Stahlbetonbauteile durch das Aufbringen von externen Kräften bis zu einer Rissweite von ~0,2 mm in Feldmitte vorgeschädigt. Die Risse wurden durch die Stahlkonstruktion offengehalten und im vorbelasteten und gerissenen Zustand mit einer dünnen UHFSB-Schicht von 4 cm verstärkt. In einem Vierpunkt-Biegeversuch erfolgten die Versuche. Die Bauteilprüfungen wurden mit

konventioneller und optischer Messtechnik begleitet. Bei der Bearbeitung der Masterarbeit waren folgende Fragestellungen besonders im Fokus:

- *In welchem Maß beeinflusst eine dünne Schicht aus UHFSB die Tragfähigkeitssteigerung von Stahlbetonprobekörpern? Und welchen Einfluss hat der Einbau einer zusätzlichen Bewehrung in der UHFSB-Schicht?*
- *Wie stellt sich die Rissverteilung bei den unterschiedlichen Bauteilkonfigurationen ein?*

Versuchsplanung

Zunächst wurden die Abmessungen der Bauteile mit L x B x H von 3,15 x 0,20 x 0,25m festgelegt. Durch die Erstellung von Momenten-Krümmungsdiagrammen konnten die Zustände I und II des Stahlbetons dargestellt werden. Aus einer zusätzlichen Rissweitenberechnung wurde die Dehnung ermittelt, bei der das Stahlbetonbauteil eine Rissweite von 0,2 mm aufwies. Die Überlagerung der Ergebnisse ergab die benötigte Kraft der Vorbelastung. Außerdem konnte aus der maximalen Tragfähigkeit die benötigte Kraft der Prüfmaschine abgelesen werden. Die Aufbetonschicht aus UHFSB wurde unterschiedlich konfiguriert. Es wurden Probekörper mit und ohne zusätzlicher Stabstahl-Bewehrung in der UHFSB-Schicht geplant.

Versuchsdurchführung

Wie zuvor beschrieben, wurden Verbundbauteile aus Stahlbetongrundkörpern und einer UHFSB-Ergänzungsschicht hergestellt. Die Stahlbetongrundkörper wurden aus einem Normalbeton mit der Klassifizierung C45/55 und Bewehrungsstahl B500B hergestellt. Die UHFSB-Verstärkung bestand aus dem Premix Shotcrete Grey von *Ductal* und 3,11 V-% hochduktilen Mikrostahtfasern (L / D = 14 / 2 mm). UHFSB kann Zugkräfte aufnehmen, was im Zusammenhang mit einem verfestigendem Materialverhalten unter

Zugbelastung und einer Multirissbildung steht. Die Betonage des UHFSB (Abbildung 1) fand im Rahmen eines Pilotprojekts [4] des Projekts i-SCUP statt. Die Machbarkeit der Spritzbetonage wurde im Projekt bereits im Vorfeld erfolgreich bestätigt [2].



Abb. 1: UHFSB Spritzbetonage durch fachkundiges Personal

Um Rückschlüsse auf die Rissbildung zu erhalten, wurden die Bauteilprüfungen mittels optischer Bildkorrelation aufgezeichnet. Hierfür kam sowohl ein 2D-DIC als auch ein 3D-DIC System zum Einsatz. Zusätzlich wurden auf der gegenüberliegenden Seite, vertikal und horizontal, induktive Wegaufnehmer angebracht, um unter anderem Durchbiegungen in Feldmitte aufzuzeichnen. Die unterschiedlichen Messsysteme dienten auch als Vergleich / Verifizierung des jeweils anderen Systems. Die Vier-Punkt-Biegeversuche fanden in einem Stahl-Prüfrahmen mit einem 250 kN Prüfzylinder statt.

Auswertung

Zunächst wurde die Tragfähigkeit der Bauteile betrachtet und damit einhergehend eine Tragfähigkeitssteigerung durch die UHFSB-Ergänzungsschicht festgestellt. Die Kraft der Prüfmaschine und die Durchbiegung in Bauteilmitte wurden in einem Kraft-Verformungs-Diagramm angegeben (Abbildung 2). Hieraus lässt sich ein Vergleich der unterschiedlichen Bauteilkonfigurationen ziehen, sowie ein Vergleich zur Referenz. Die hellgrauen Linien stellen dabei die Referenzen dar, die gestrichelten Linien stehen für die UHFSB-Verbundbauteile

und die dunklen Linien für die bewehrten UHFSB-Verbundbauteile. Die Referenzbauteile aus Stahlbeton erreichten eine Maximaltragfähigkeit von ca. 45 kN, die Bauteile mit UFSB-Verstärkung 63 kN und die Bauteile mit Stahl-UHFSB bis zu 100 kN.

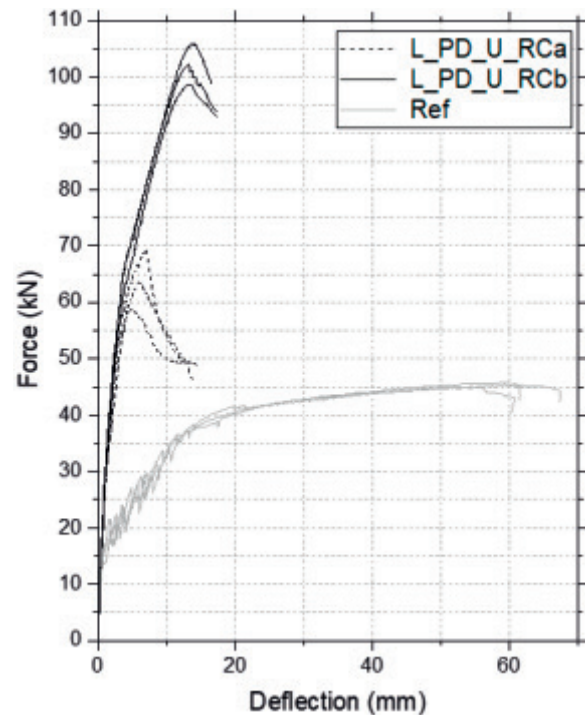
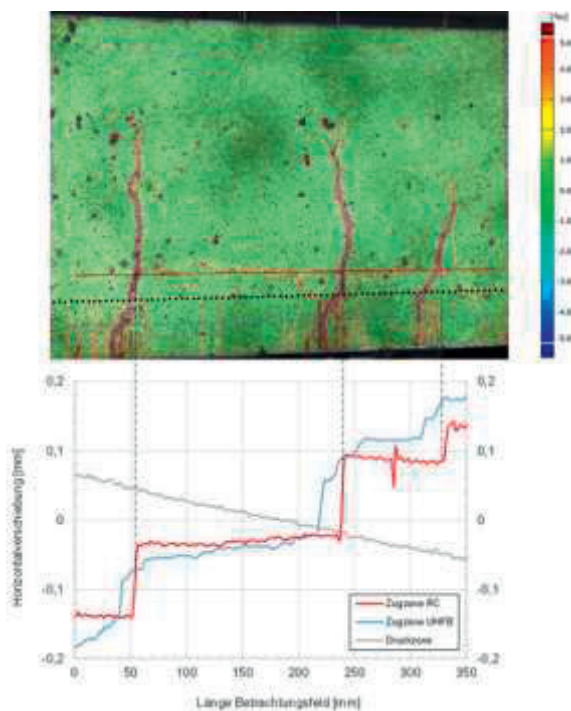


Abb. 2: Kraft-Verformungs-Diagramme (aus [5])

Zusätzlich zu der Betrachtung des Tragverhaltens wurden die Aufnahmen der DIC-Systeme ausgewertet, um die Rissbildung nachzuvollziehen. Bei den Referenzbauteilen aus Stahlbeton wurde ein „klassisches Rissbild“ festgestellt. Bei den Verbundbauteilen mit unbewehrter UFSB-Schicht konnte eine Multirissbildung, d.h. eine Anhäufung / Auffächerung vieler feiner Risse, detektiert werden. Unter den vorhandenen Rissen im Stahlbeton schlugen unter Vollast teilweise Risse aus dem Stahlbeton durch. Bei Verbundbauteilen mit bewehrter UHFSB-Schicht wurden Multirisse und ein rissüberbrückendes Verhalten festgestellt. In den Bereichen der Makrorisse des Stahlbetons entstanden Anhäufungen und Auffächerungen in Form von Multirissen. Verglichen mit den anderen zwei Bauteilkonfigurationen entstanden im Stahlbeton

doppelt so viele Risse. In Abbildung 3 ist exemplarisch auf der linken Seite ein Bauteil ohne Bewehrung in der UHFSB Schicht und rechts ein Bauteil mit zusätzlicher Bewehrung zum Zeitpunkt unter Vollast abgebildet. Die Multi-/Risse werden durch die rote Einfärbung dargestellt. Unter den DIC-Bildern sind Diagramme dargestellt, die die Horizontalverschiebung an jedem gemessenen Punkt auf Höhe der Bewehrung in der unteren

a)



Lage des Stahlbetons und in Mitte der UHFSB-Schicht angeben. Die Abszisse gibt die Länge des Betrachtungsfelds in mm an und die Ordinate die Horizontalverschiebung. Die rote Linie stellt die Zugzone und die graue die Druckzone des Betons dar. Die Zugzone des UHFSB wird in blau dargestellt und in schwarz die Bauteilfuge zwischen Beton und UHFSB.

b)

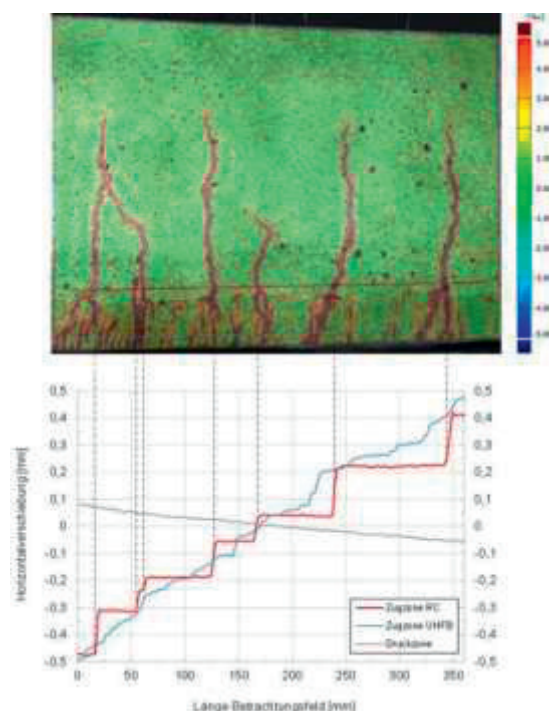


Abb. 3: Rissbilder des 3D-DIC mit Rissöffnungs-Diagramm. a): UHFSB-Schicht unbewehrt; b): UHFSB-Schicht bewehrt

Fazit und Ausblick

Der zur Vorschädigung konzipierte Stahlrahmen ermöglichte das Einstellen von Rissen im Stahlbeton mit Rissweiten von $\sim 0,2$ mm. Das Auftragen von UHFSB mit einer Schichtstärke von 40 mm führte zu einer signifikanten Tragfähigkeitszunahme. Bei der Verwendung von UHFSB ohne zusätzlicher Stabstahlbewehrung war die Tragfähigkeit 40% höher als bei der Referenz. Bei Stahl-UHFSB lag die Steigerung bei 120%. Die deutlich kleineren Verformungen verdeutlichen die Steifigkeitszunahme durch die UHFSB-Verstärkung. Die Verwendung der optischen Messtechnik (DIC) zeigte eine Multirissbildung in der UHFSB-Schicht auf. Bei

der Verwendung von Stabstahlbewehrung im UHFSB konnte ein rissüberbrückendes Verhalten festgestellt werden, während unter Vollast, ohne zusätzliche Bewehrung, durchschlagende Risse aus dem Stahlbeton detektiert wurden. Ein qualitativer Vergleich mit Versuchen von [6] zeigte bei ungeschädigten Verbundbauteilen aus Stahlbeton und UHFSB ähnliche Ergebnisse auf. Die Resultate der Untersuchung weisen das Verstärkungskonzept von UHFSB bei geschädigten Stahlbetonbauteilen nach, was eine große Chance für die Baupraxis darstellt, das Verfahren dort anzuwenden. Zukünftige Entwicklungen von Bemessungsansätzen und eine Normierung sind die aktuelle Aufgabe der Forschung.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Brühwiler E.: Recent sustainable and innovative UHPFRC Applications in Switzerland. Proceedings of HiPerMat 2024, 6th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, p.3-8, Kassel 2024
- [2] Strotmann A., Pollner T., Kustermann A., Jungwirth J.: Grundlagenuntersuchung zu Ultra-Hochleistungs Faserverstärktem Spritzbeton (UHFSB) für die Instandsetzung und Verstärkung von Beton- und Stahlbetonbauteilen. Spritzbeton-Tagung 2021, Alpbach 2021.
- [3] Jungwirth J., Kustermann A., Dauberschmidt C., Pollner T., Strotmann A.: Retrofitting and Strengthening of Reinforced Concrete Structures by Using Thin UHPFRC Shotcrete Layers. Fields of Application, Design, Durability, Construction Technology. Proceedings of fib Symposium "Concrete Structures for Resilient Society", Shanghai 2020.
- [4] Pollner T., Strotmann A., Kustermann A., Dauberschmidt C., Jungwirth J.: Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Ultra-High Performance Shotcrete (UHPSC). Proceedings of HiPerMat 2024, 6th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, p.195-198, Kassel 2024.
- [5] Puth C., Strotmann A., Jungwirth J.: Large-Scale Experimental Investigation on Pre-Damaged RC-UHPFRSC Composite Beams - Repair and Strengthening using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Shotcrete (UHPFRSC). Proceedings of HiPerMat 2024, 6th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, p.71-74, Kassel 2024.
- [6] Strotmann A., Jungwirth J.: Crack control for repair and strengthening of reinforced concrete structures using the multi-cracking behaviour of Ultra-high Performance Fibre Reinforced Shotcrete (UHPFRSC). MATEC Web Conf. (364), Cape Town 2022.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- 1. Bergmeister K., Fingerloos F., Wörner J.-D., Hg., BetonKalender 2013: Lebensdauer und Instandsetzung - Brandschutz. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2013.
- 2. Brühwiler E., Denarié E.: „Stahl-UHFB - Stahlbeton Verbundbauweise zur Verstärkung von bestehenden Stahlbetonbauteilen mit Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB)“, Beton- und Stahlbetonbau, Jg. 108, Nr. 4, S. 216–226, 2013.
- 3. Strotmann A., Jungwirth J.: Crack control for repair and strengthening of reinforced concrete structures using the multi-cracking behaviour of Ultra-high Performance Fibre Reinforced Shotcrete (UHPFRSC). MATEC Web Conf. (364), Cape Town 2022.

Autor

Cornelius Puth, M. Eng.

Seit 2023: Tragwerksplaner, Berk + Partner Bauingenieure GmbH, München

2021 – 2023: Masterstudium Bauingenieurwesen, Hochschule München

2017 – 2021: Bachelorstudium Bauingenieurwesen, Hochschule München

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt im Labor für Massivbau und konstruktiven Ingenieurbau (LMKI) des Institutes für Material- und Bauforschung (IMB) an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München (HM), Fakultät 02 Bauingenieurwesen. Die Betreuer waren Prof. Dr. Jörg Jungwirth, Professor für Massivbau und M. Eng. Andre Strotmann, wissenschaftlicher Mitarbeiter im Massivbau.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

AUSWIRKUNGEN VON BRANDEREIGNISSEN AUF DIE FESTIGKEIT UND DAUERHAFTIGKEIT VON FAHRBAHNBETON

Masterarbeit

Anthea Putz

Zur Tiefenschädigung von Betonfahrbahnen durch Brandereignisse gibt es bisher wenig Untersuchungen. Ein Brandereignis auf der BAB 8 West München-Augsburg löste eine Reihe von Untersuchungen an der Hochschule München zu diesem Thema aus. An eigens hergestellten Probekörpern wurde in Abhängigkeit verschiedener Brand-Dauern und -Temperaturen Rest-Biegezug- und Druckfestigkeiten, die kapillare Wasseraufnahme und Rest-Haftzugfestigkeiten vor und nach Erhitzung untersucht. Außerdem wurde an massiven Betonkörpern die Erwärmungsgeschwindigkeit gemessen und ein Temperaturprofil in verschiedenen Tiefenlagen erstellt. Unter hohen Temperaturen sind deutliche Schäden im Bereich der Betonfestigkeit zu verzeichnen. Diese sind jedoch aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit und Erhitzungsgeschwindigkeit des Betons nur in den obersten Schichten des Betons zu erwarten. Zur Untersuchung von realen Brandschäden eignet sich die Haftzugfestigkeitsprüfung vor Ort. Zudem können an der Brandstelle entnommene Bohrkern später auf dessen Biegezugfestigkeit und kapillare Wasseraufnahme untersucht werden. Mithilfe dieser Untersuchungen kann eine rasche Wiederherstellung der Verkehrssicherheit und eine wirtschaftliche Sanierung erreicht und zeitintensive Vollsanierungen vermieden werden.

Keywords: Betonstraßenbau, Brandschäden, Resttragfähigkeit

Beton unter hohen Temperaturen

Durch hohe Temperaturen können sich Eigenschaften, wie Dichte, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Wärmedehnung des Betons dauerhaft verändern. [1] Mithilfe von Thermogravimetrische Analysen (TGA) können Abbaureaktionen im Beton nachgewiesen werden. [1]

Folgendes thermisches Verhalten tritt auf:

30-120°C:	Verdunstung/Verdampfung physikalisch gebundenen Wassers
30-300°C:	Gelabbau
120-600°C:	Abgabe chemisch/zellgebundenen Wassers
450-550°C:	Portlandzersetzung
Bei ca. 570°C:	Quarzumwandlung
600-700°C:	CSH-Phasen Zersetzung
600-900°C:	Kalksteinentsäuerung
110-1200°C:	Beginn des Schmelzens

Fragestellung

Ein Brandereignis auf der BAB 8 West München-Augsburg, ausgelöst durch einen Kies beladenen LKW beschädigte etwa sechs Betonplatten der Fahrbahn maßgeblich im Bereich des Standstreifens und Lastfahrstreifens. Ein Resttragvermögen der Fahrbahn sollte durch die Hochschule München ermittelt werden. Daraus ergeben sich die grundsätzlichen Fragen: Wie verhalten sich Betonstraßen unter Brand oder hohen Temperaturen und wie hoch ist dessen Tiefenschädigung? Gibt es einfache Methoden den Schädigungsgrad des Betons vor Ort festzustellen, um daraus ein geeignetes Sanierungskonzept zu erstellen?

Realer Brandschaden der BAB 8 West

Eine an der Bundeswehr Universität München durchgeführte TGA, sowie eigens durchgeführte Druckfestigkeitsprüfungen mittels Rückprallhammer, Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen, E-Modul und Haftzugfestigkeitsprüfungen dienten zur Bestimmung der Resttragfähigkeit der beschädigten Betonstraße. [2] [3] [4] [5]

Am Ende der Untersuchungen konnte zusammenfassend davon ausgegangen werden, dass der Brandschaden keine großen Tiefenschädigungen in der Betonfahrbahn hervorgerufen hat.

Untersuchungen an Normprismen

18 Normprismen lagerten bei den Temperaturen 400°C, 500°C und 600°C für 2, 6 oder 12 Stunden mit vorheriger Wasserbadlagerung, bzw. trocken im Ofen. Im Anschluss wurde an ihnen die kapillare Wasseraufnahme, sowie ihre Biegezug- und Druckfestigkeit (in Anlehnung an die jeweilige Norm [6] [3]) getestet. Hierbei war festzustellen, dass Biegezugfestigkeit und kapillare Wasseraufnahme je nach Temperaturbelastung in ähnlichem Maße ab- bzw. zunehmen (Vergleich Abbildung 1 und 2).

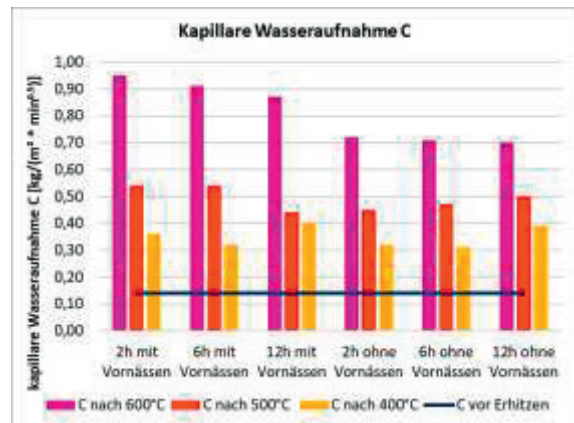


Abb. 1: Ergebnisse der kapillaren Wasseraufnahme

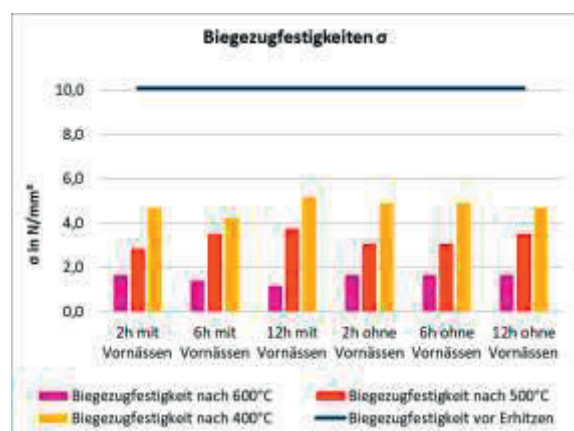


Abb. 2: Ergebnisse der Biegezugfestigkeiten

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung hingegen scheinen weniger repräsentativ auszufallen. Dies liegt daran, dass die Werte im Vergleich zu den der anderen beiden Untersuchungsmethoden weniger stark und weniger schnell abnehmen.

Die Biegezugfestigkeit wird durch die im Betonstraßenbau auftretenden Eckbeanspruchung der eingebauten Betonplatten maßgeblich.

Untersuchungen an Normwürfeln

An 6 hergestellten Normwürfeln wurde die jeweilige Druckfestigkeit mittels Rückprallhammer, die Haftzugfestigkeit und die Druckfestigkeit vor und nach Ofenlagerung bei je 600°C für 0,5, 1, 2 und 6 Stunden ermittelt [2] [5] [7]. Die Druckfestigkeiten mittels Rückprallhammer unterliegen dabei großen Schwankungen und geben kein repräsentatives Bild der Schädigung des Betons wieder.

Die Druckfestigkeiten nehmen zwar, ebenso wie die der Prismen, deutlich bei Höhe und Dauer der Temperaturbelastung ab, sind jedoch nicht ausreichend niedrig, um ein unverfälschtes Schädigungsbild abzugeben.

Die untersuchten Haftzugfestigkeiten geben im Vergleich des beschädigten und unbeschädigten Betons ein gutes Bild des Schädigungsgrades wieder. [5]

Untersuchungen an massiven Betonplatten

3 Betonplatten mit den Abmessungen 400x400x150 mm dienten zur Erstellung eines Temperaturprofils und zur Ermittlung der Erhitzungsgeschwindigkeit des untersuchten Betons im Falle eines Brandes. Hierzu wurden bereits bei der Probekörperherstellung Temperaturmessdrähte in den Tiefenlagen von 20 mm, 50 mm und 80 mm einbetoniert. Alle 3 Platten wurden mithilfe einer Acetylen-Sauerstoff-Flamme beflammt. Die durch das Gasgemisch entstehende Streuflamme kann eine Hitze von bis zu 1500°C erzeugen. Auf der Betonoberfläche wurde während der halbstündigen Messung Maximaltemperaturen von 300°C gemessen. Das sich ergebende Temperaturprofil ist in Abbildung 3 dargestellt.

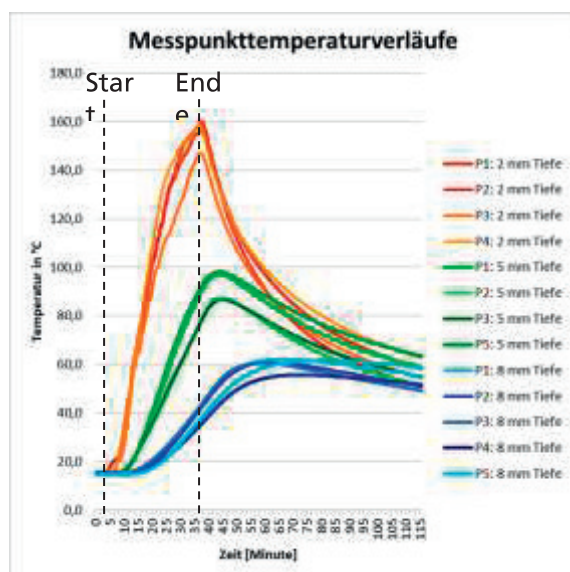


Abb. 3: Messpunkttemperaturverläufe

Außerdem ließen sich nach der Beflammung des nass gelagerten Probekörpers deutlich mehr Abplatzungen feststellen als bei den trocken gelagerten, welche lediglich Oberflächenverfärbungen aufwiesen.

Fazit

Um nach Brandereignissen eine Resttragfähigkeit und später ein Sanierungskonzept zu erstellen, wären einfache Untersuchungen vor Ort in verschiedenen Tiefenlagen sinnvoll.

Dabei könnten tiefengestaffelt entnommene Haftzugfestigkeitswerte zielführend sein. Diese geben einen Einblick in die Schädigungstiefe des Brandschadens.

Die erste Messung sollte an der Oberfläche des brandgeschädigten, sowie am unbetroffenen Beton entnommen werden. Nach dem schrittweisen Abtrag der Betonschichten, beispielsweise beginnend mit den ersten 5 mm und fortlaufend in 10 mm Schritten, könnten auch Haftzugwerte in tieferen Schichten gemessen werden. Haftzugmessungen könnten außerdem vor Ort zur Eingrenzung des Brandbereiches dienen und einen Sanierungsradius ausgeben, indem man zwischen dem unbeschädigten Beton und dem Brandereignis eine genaue Schädigungslinie ermittelt.

Druckfestigkeitsmessungen mittels Rückprallhammer können parallel getätigt werden, geben jedoch kein eindeutiges Bild des Schädigungsbereiches ab und sollten deshalb ausschließlich ergänzend stattfinden.

Für die Ermittlung der Biegezugfestigkeit und der kapillaren Wasseraufnahme könnten Bohrkerne größeren Durchmessers von etwa 200 mm im Brandbereich und im schadensfreien Beton entnommen werden. Die Bohrkerne sollten im Labor zu Prismen geschnitten werden, an welchen Untersuchungen zum kapillaren Saugen und Biegezugfestigkeitsbestimmungen durchgeführt werden können.

Zusätzlich könnten tiefengestaffelt entnommene Bohrmehlproben des unbelasteten und des brandgeschädigten Betons mit einer späteren thermogravimetrischen Analyse Hinweise über mögliche eingetretene Abbaureaktionen im Beton liefern.

All diese Untersuchungen sollten mit Messungen an unbelasteten Stellen der Betonfahrbahn verglichen werden.

Aus Abbildung 4 ist erkennbar, dass die Biegezugfestigkeit (türkise Linie) in etwa den gleichen Verlauf wie die kapillare Wasseraufnahme (rote Linie) zeigt. Diese beiden Messwerte werden als zielführend zur Ermittlung der Schädigungen durch Fahrzeugbränden auf Betonfahrbahnen erachtet.

Die Haftzugfestigkeitsermittlung (Viereckssymbole) kann eine sehr sinnvolle Ergänzung der Messwerte liefern.

Die Druckfestigkeiten mittels Rückprallhammer (Dreieckssymbole) und die ermittelten Druckfestigkeiten (grüne Linie) geben dabei kein repräsentatives Bild des Schädigungsgrades ab.

Ausblick

Für die Praxis ergeben sich hieraus wichtige Anhaltspunkte, um Sanierungsarbeiten nach Brandereignissen effizient und zielgerichtet anzugehen. In Zukunft könnten auf Basis dieser und möglicherweise weiterer Forschungsergebnisse verbesserte Prüfstandards für die Beurteilung und Instandsetzung brandgeschädigter Betoninfrastrukturen entwickelt werden. Dies würde nicht nur eine rasche Wiederherstellung der Verkehrssicherheit ermöglichen, sondern auch die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen steigern, da kosten- und zeitintensive Vollsanierungen verringert werden können.

Zukünftige Studien könnten darauf abzielen, standardisierte Prüfprotokolle und In-situ-Testverfahren zu entwickeln, die es ermöglichen, die strukturelle Integrität und die Sicherheit von Betonstraßen unmittelbar nach einem Brandereignis zu bewerten. Die Erkenntnisse dieser Arbeit können die Schnittstelle zwischen experimenteller Forschung und praktischer Anwendung stärken, indem sie Empfehlungen für das schnelle und kosteneffiziente Sanierungsmanagement liefern.

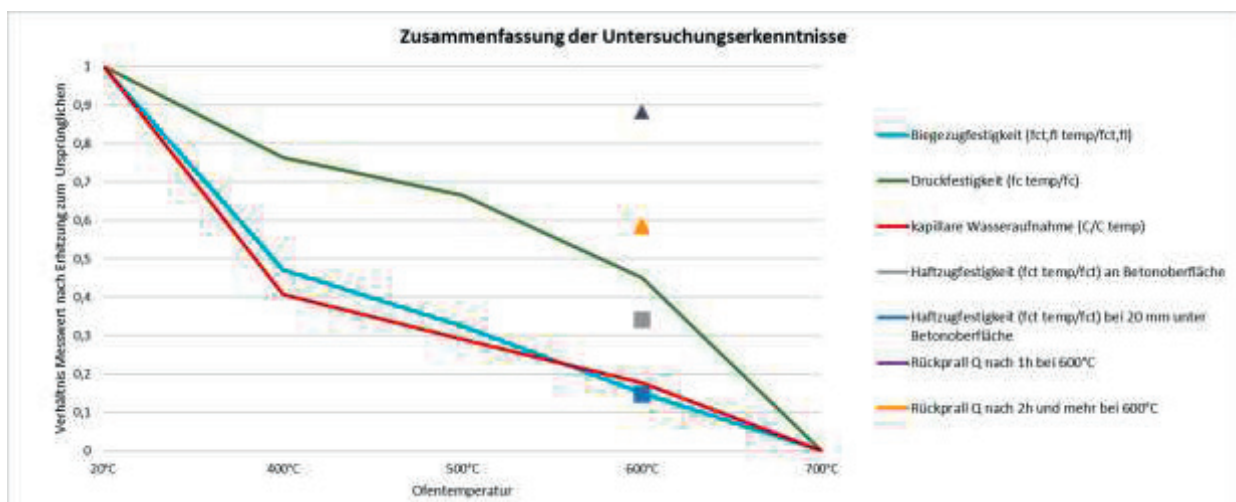


Abb. 4: Vergleich aller Untersuchungen

Literaturverzeichnis

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [1] Ulrich Schneider, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen, Berlin: Wilhelm Ernst und Sohn Verlag, 1982.
- [2] DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), DIN EN12504-2: Prüfung von Beton in Bauwerken - Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung - Bestimmung der Rückprallzahl, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [3] DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), DIN EN 196-1 Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [4] DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), DIN EN 12390-13: Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2013.
- [5] DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), DIN EN 1542: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1999.
- [6] DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), DIN EN 1015-18: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 18: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von erhärtetem Mörtel (Festmörtel), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [7] DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), DIN EN 12390-3: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019.

Autor, Coautoren

Anthea Putz, Master of Engineering

Betreuer

Die Arbeit wurde veranlasst durch Frau Prof. Dipl.-Ing. Charlotte Thiel der OTH Regensburg und in Kooperation des Lehrstuhls für Baustoffkunde der Hochschule München durchgeführt und von Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt betreut.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

HANFKALK ALS DÄMMSTOFF

Untersuchungen zum praxisgerechten Einsatz und Bewertung der Treibhausgasemissionen des Baustoffs über den gesamten Lebenszyklus

Bachelorarbeit

Jakob Tantz

Um zukünftig die Kreislaufwirtschaft im Bausektor zu implementieren, ist die Weiterentwicklung von Baustoffen und Bauweisen nötig. In dieser Arbeit wird daher eine neuartige Hanfkalkrezeptur untersucht, in welcher Branntkalk als Bindemittel zum Einsatz kommt. Dies ist in der Praxis bis heute nur wenig erprobt. In dem praktischen Teil der Arbeit werden Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit dieser sowie zweier weiterer Rezepturen (NHL und Weißkalkhydrat) untersucht. Dazu wurde ein Verfahren zur Probekörperherstellung entwickelt, welches es ermöglicht, eine definierte Verdichtungsarbeit aufzubringen. Die angefertigten Probekörper weisen geringe Druckfestigkeit aber auch niedrige Werte der Wärmeleitfähigkeit auf. Eine bisher wenig erforschte Qualität von Hanfkalk ist die verbesserte Dämmwirkung des Baustoffs durch den Phasenübergang von Wasser. In einem Versuch wurde der Effekt qualitativ nachgewiesen. In einer anschließenden Ökobilanzierung wird die gute CO_{2,eq}-Bilanz von Hanfkalk bestätigt.

Keywords: Hanfkalk, Branntkalk, Phase Change Material, Druckfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit, LCA

Klimafreundliches Bauen braucht klimafreundliche Baustoffe

Seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts haben menschliche Aktivitäten einen Anstieg der durchschnittlichen Temperatur auf der Erdoberfläche um ca. 1,1 °C verursacht [1]. Dem Gebäudesektor kommt bei der Umsetzung von umweltpolitischen Zielen eine Schlüsselrolle zu. Während der Primärenergiebedarf von Neubauten in den letzten Jahrzehnten

kontinuierlich reduziert wurde, sind die durch Baumaterialien verursachten Emissionen kaum gesunken [2][3]. Aufgrund des oft hohen Ressourcenverbrauchs und der klimaschädlichen Wirkung von konventionellen Baustoffen wird weltweit an innovativen ökologischen Alternativen geforscht. Dabei rücken vor allem nachwachsende Rohstoffe in den Fokus der Wissenschaft. Ein in diesem Zusammenhang besonders interessanter Baustoff ist Hanfkalk.

Der Agrarbeton Hanfkalk

Hanfkalk ist ein moderner Dämmstoff, welcher aus Hanfschäben, dem verholzten, gebrochenen Teil des Hanfstängels, und einem mineralischen Bindemittel besteht.

Hanfkalk hat aufgrund der hochporösen pflanzlichen Bestandteile gute wärmedämmende Eigenschaften und eignet sich somit dazu, den Primärenergiebedarf von Gebäuden zu senken. Ein weiteres Argument für die Verwendung von Hanfkalk ist seine geringe Umweltwirkung bei der Herstellung. Durch die Carbonatisierung des Bindemittels und die pflanzlichen Zuschläge kann über die Lebensdauer des Bauteils eine erhebliche Menge CO₂ eingelagert werden [4].

Das Naturdorf Bärnau

In der Stadt Bärnau befindet sich der Geschichtspark Bärnau-Tachov. Seit 2011 wurden in dem Freilichtmuseum rund 30 mittelalterliche Gebäude rekonstruiert. Herzstück des Geschichtsparks ist die Versuchsbaustelle der mittelalterlichen königlichen Reisestation. Wandergesellen erproben bei diesem Projekt seit 2017 mittelalterliche Bautechniken und Baumaterialien. Durch die Baustellen im Geschichtspark konnte im Laufe der Jahre eine große Menge an Wissen zu traditionellen Bauweisen gesammelt werden. Auf dieser Grundlage entstand die Idee für das Naturdorf Bärnau (siehe Abb. 1). Bei diesem Forschungsprojekt wird seit 2021 untersucht, welches Potential traditionelle Bauweisen und Baustoffe in Verbindung mit moderner Technik bergen. Ziel ist es, auf diese Weise vier Ferienhäuser zu errichten, welche den heutigen Vorstellungen von Wohnkomfort gerecht werden. Gedämmt werden die Fachwerkhäuser mit einer eigens für dieses Projekt entwickelten Hanfkalkrezeptur. Eine Besonderheit dieser Rezeptur ist die Verwendung von Branntkalk anstelle von natürlich hydraulischem Kalk (NHL) oder Weißkalkhydrat.



Abb. 1: Forschungsbaustelle Naturdorf Bärnau

Ziel der Arbeit

Die in Bärnau verarbeitete Hanfkalk Rezeptur ist durch empirische Versuche und Erfahrungen entwickelt worden. Ziel des praktischen Teils der Arbeit war es, diese Rezeptur experimentell zu untersuchen und zu bewerten. Folgende Frage sollte durch die Versuche beantwortet werden:

Wie beeinflusst die Wahl von Branntkalk als Bindemittel die Baustoffeigenschaften von Hanfkalk?

Um die Umweltwirkung des in Bärnau entwickelten Wandaufbaus beurteilen zu können, wurde eine umfassende Lebenszyklusanalyse durchgeführt.

Im Folgenden werden die Versuche zum Phasenübergang und der Wärmeleitfähigkeit beschrieben.

Herstellung der Probekörper

Als Verdichtungsgerät wurden für die Herstellung der Probekörper Proctorhämmer, gewählt. So kann gewährleistet werden, dass verschiedene Personen die gleiche definierte Verdichtungsenergie aufbringen. Um festes bzw. leichtes Stampfen durch den Arbeiter zu simulieren, wurden zwei verschiedene Proctorhämmer verwendet (2,5 kg und 4,5 kg mit 300 mm bzw.

450 mm Fallweg). Die Schalung (rund; $d = 100$ mm) wurde schichtweise befüllt. Das einzuschüttende Material wurde dazu auf immer 250 g abgewogen und anschließend mit jeweils 10 Proctorhammerschlägen verdichtet. Die leicht verdichteten Probekörper wurden mit fünf Schichten befüllt, die stark verdichteten mit sechs. Die hergestellten Probekörper waren zwischen 26 und 28 cm hoch.

Wärmeleitfähigkeit

Die Werte liegen, gemessen in Verdichtungsrichtung, für trockene Proben zwischen $0,05\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$ und $0,075\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$. Die Messungen, die orthogonal zur Verdichtungsrichtung durchgeführt wurden, sind im Schnitt um den Faktor 1,052 höher. Die Wärmeleitfähigkeit der Proben, welche bei Umgebungsbedingungen geprüft wurden, ist im Schnitt um den Faktor 1,358 höher als bei getrockneten Proben. Die Wärmeleitfähigkeit der stärker verdichteten Variante ist ca. um den Faktor 1,072 höher als die der leicht verdichteten Variante.

Ein eindeutiger Einfluss des Bindemittels konnte nicht festgestellt werden.

Bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit der getrockneten Proben, wurde in einem Vorversuch die getrocknete Probe aus dem luftdichten Behälter genommen, um die Messung in der Klimakammer durchzuführen. Die so gewonnenen Ergebnisse variierten jedoch stark und es fiel ein Temperaturanstieg in der Probe während der Messreihe auf. Bei den Probekörpern, welche nicht getrocknet wurden, spielte dieser Effekt keine Rolle. In einer ersten Hypothese wurde der Temperaturanstieg auf den Phasenübergang von Wasser zurückgeführt. Aufgrund dieser Erkenntnis wurden die weiteren Messungen innerhalb der luftdichten Box durchgeführt (Das Messgerät wurde dazu in die Box gelegt). So konnte ein Nachströmen von feuchter Luft verhindert werden. Die nun gewonnenen Messwerte wiesen wie vermutet

eine niedrige Varianz auf und die Temperatur im Probekörper blieb gleich.

Phasenübergang

Um den beobachteten Effekt des Phasenübergangs zu dokumentieren, wurde eine Probe im Ofen bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend in einem luftdichten Behälter abgekühlt. Der Behälter wurde in der Klimakammer gelagert. Dieses Vorgehen hat folgenden Effekt: Die Temperatur im Inneren des Probekörpers entspricht der Temperatur der Messumgebung, der Probekörper nimmt aber beim Abkühlen kaum Wasserdampf aus der Raumluft auf. Sobald der Probekörper höherer Luftfeuchte ausgesetzt wird, steigt sein Wassergehalt. Diese Wasserdampfaufnahme wird durch Wiegen dokumentiert. Die Werte werden durch eine Computersoftware aufgezeichnet. Gleichzeitig wird in festen Intervallen von 15 min die Temperatur mithilfe der Wärmeleitfähigkeits-messgeräte der Firma Meter gemessen. Zeitgleich wurde eine Kontrollprobe geprüft, welche sowohl in Temperatur als auch in ihrem Wassergehalt der Messumgebung entsprach (siehe Abb. 2).



Abb. 2: Versuchsaufbau Phasenwechsel

Ergebnis

Abb. 3 zeigt die Ergebnisse des oben beschriebenen Versuchs. Es ist ein deutlicher Massezuwachs von circa 17 g im Versuchszeitraum von 30 h zu erkennen. Gleichzeitig kann ein starker Anstieg der Temperatur um $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ nachgewiesen werden. Die Temperatur erreicht dabei ihr Maximum nach circa 1 h 15 min.

Danach fällt die Temperatur erst stark und nähert sich dann langsam dem Ausgangswert an. Nach 30 h wurde der Versuch abgebrochen.

Die Verdampfungsenthalpie von Wasser beträgt bei 20 °C 2453 kJ/kg. Durch die Aufnahme von 17 g Wasser werden somit 41,70 kJ oder 11,58 Wh latente Wärmeenergie frei.

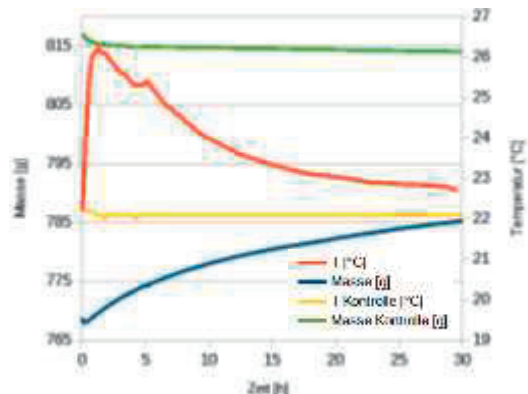


Abb. 3: Ergebnisse des Versuchs zum Phasenwechsel

Umweltbilanzierung

Hanfkalk kann über seine Lebensdauer mehr CO₂ einspeichern als durch seine Herstellung emittiert wird. Maßgeblich dafür sind vor allem:

- Die biogene Einlagerung von CO₂ in den Schäben
- Aufnahme von CO₂ durch Karbonatisierung des Bindemittels

Der Wert des GWP100 liegt für einen m² des untersuchten Wandaufbaus bei 24,2 kg CO₂eq/FU. Entscheidend für die Höhe dieses Wertes ist jedoch auch das gewählte End-of-life-Szenario (siehe Abb. 4). Ohne Berücksichtigung des Lebensendes, beträgt das GWP 100 des Wandaufbaus -38,42 kgCO₂eq/FU.

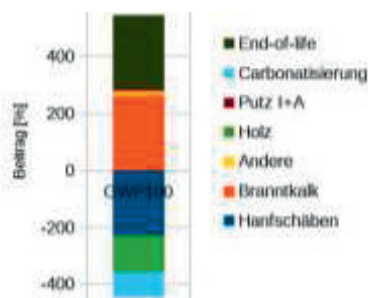


Abb. 4: Maßgebliche Faktoren für die Umweltwirkung

Diskussion der Ergebnisse und Fazit

Sowohl in den hier nicht vorgestellten Versuchen zur Druckfestigkeit wie auch in den Ergebnissen der Versuche zur Wärmeleitfähigkeit zeigt sich kein nennenswerter Einfluss des Bindemittels. Die getesteten Hanfkalkproben weisen eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf, was die Eignung von Hanfkalk als Dämmmaterial unterstreicht. Es wurde dokumentiert, dass feuchte Proben Wärme besser leiten als trockene. Allerdings ist in diesem Zusammenhang festzustellen, dass Feuchtigkeit in Hanfkalk eine äußerst komplexe Rolle spielt.

Im Versuch zum Effekt des Phasenwechsels wurde demonstriert, dass Hanfkalk sehr stark auf Veränderungen der relativen Luftfeuchtigkeit reagiert, indem Wasser aufgenommen bzw. abgegeben wird. In der Praxis sind die Schwankungen der relativen Luftfeuchte der Umgebung im Laufe eines Tages selbstverständlich nicht so hoch wie in dem beschriebenen Versuchsaufbau. Dennoch zeigen die Ergebnisse qualitativ, dass der Effekt für die Bewertung der bauphysikalischen Eigenschaften nicht zu vernachlässigen ist, da so die Amplituden der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur zusätzlich gedämpft werden. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um herauszufinden, welche Rolle Putze oder Beschichtungen in diesem Zusammenhang spielen.

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse belegen die sehr geringe Umweltwirkung von Hanfkalk.

Hanfkalk ist ein umweltfreundlicher Baustoff mit interessanten bauphysikalischen Eigenschaften, welcher hervorragend zu der angestrebten ökologischen Transformation im Baugewerbe passt.

Die Ergebnisse der Versuche sprechen mit Blick auf die Baustoffeigenschaften nicht für die Verwendung von Brannkalk als Bindemittel.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: IPCC. "Synthesebericht zum Sechsten IPCC-Sachstandsbericht (AR6): Hauptaussagen aus der Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung (SPM).", 2023 News release
- [2]: Braune, Anna; Ekhvaia, Levan; Quante, Kathrin. "BENCHMARKS FÜR DIE TREIBHAUSGASEMISSIONEN DER GEBÄUDEKONSTRUKTION Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden.", 2021.
- [3]: Püschel, Danny; Holthuizen, Taco "Grauwerte: Die Rolle des Primärenergiegehalts von Baustoffen." 2013. Last modified 2013. Accessed January 28, 2024.
<https://www.db-bauzeitung.de/wissen/energie/grauwerte/#slider-intro-3>.
- [4]: Amziane, Sofiane, and Laurent Arnaud, eds. Bio-Aggregate-Based Building Materials: Applications to Hemp Concretes. Civil Engineering and Geomechanics Series. London, Hoboken, N.J.: ISTE; Wiley, 2013.
<https://doi.org/10.1002/9781118576809https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118576809>.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Cerezo, Véronique "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique" Dissertation; Génie Civil; Vaulx-en-Velin, Frankreich: L'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat; 2005
2. Nguyen, Tai Thu "Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre." ; Génie civil; Lorient, Frankreich: Université de Bretagne Sud; 2010
3. Niyigena, C., Amziane, Sofiane, Chateauneuf, A "Multicriteria Analysis of Hempparticles Impact on Physical and Thermo-Mechanical Performances of Hemp Concrete" in: Sofiane Amziane, Mohammed Sonebi: "ICBBM 2017, 2nd International Conference On Bio-Based Building Materials"; Clermont Ferrand, France: RILEM Publications; 2017; hal-01561423

Autor, Coautoren

Jakob Tantz,
seit 2019 Bachelorstudent des Bauingenieurwesens, OTH Regensburg
2018 Allgemeine Hochschulreife, Werner-von-Siemens-Gymnasium, Regensburg

Betreuer

Prof. Dr.-Ing. Charlotte Thiel
M.Sc. Ing. (Univ.) Architektur Marlène Dorbach

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ERSTELLUNG EINER MISCHUNG AUS SELBSTVERDICHTENDEM BETON ZUM EINSATZ IN HOLZ-BETON-VERBUNDBAUTEILEN

Bachelorarbeit

Lara Alexandra Zapfe

Die Entwicklung ressourcenoptimierter Bauweisen ist ein wichtiger Bestandteil für die Reduktion umweltschädlicher Emissionen in der Baubranche. Diese Arbeit befasst sich mit der Untersuchung verschiedener Betonrezepturen für den Einsatz in Laubholz-Beton-Verbundbauteilen. Ziel der Untersuchung ist es, durch den Einsatz von Zusatzstoffen und -mitteln eine Optimierung der Frisch- und Festbetoneigenschaften zu erreichen sowie den CO₂-Ausstoß der Betonmischungen zu reduzieren. Hierfür wurden sieben Mischungen untersucht, welche Kalksteinmehl (KSM), Calciumsulfoaluminatzement (CSA-Zement) und Schwindreduzierer in unterschiedlicher Zusammensetzung enthalten. Eine Optimierung der Frisch- und Festbetoneigenschaften konnte durch den Einsatz von CSA-Zement erreicht werden. Durch Kombination von CSA-Zement und KSM und einen dadurch stark reduzierten Anteil an Portlandzement (PZ) ließ sich ein Beton mit deutlich verringertem Ausstoß umweltschädigender Emissionen herstellen, wobei diese Mischung hinsichtlich ihrer Festigkeit durch eine Reduktion des KSM-Anteils optimiert werden muss.

Keywords: Holz-Beton-Verbund, selbstverdichtender Beton, Nachhaltigkeit, Hybridbauweise

Hintergrund

In Anbetracht des Klimawandels und der dadurch verknappten Ressourcen ist es notwendig, neue Bauweisen zu entwickeln, bei denen der Ausstoß klimaschädigender Emissionen reduziert wird und gleichzeitig bisher weniger genutzte Materialien Verwendung finden. Das Forschungsprojekt „LaNaSYS“ befasst sich mit der Entwicklung modifizierter Brettsperrholzdeckenbauteile mit

und ohne Betonverbund. Ein Schwerpunkt liegt auf der Verwendung von bislang kaum im Bauwesen genutztem Holz wie Laubholz und Holz, das Holzfehler wie Insektenschäden aufweist [1].

In diesem Rahmen befasst sich diese Arbeit mit der Untersuchung von Betonen, die sich für den Einsatz in Laubholz-Beton-Verbundbauteilen (HBV) eignen. Hierbei gilt es, die Frischbetoneigenschaften so einzustellen, dass die

Mischungen eine angemessene Verarbeitungsdauer aufweisen, gleichzeitig aber schnellerhärtend und hochfließfähig sind, damit die Dauer des Kontaktes zwischen Holz und Frischbeton möglichst kurz ist.

Problemstellung

Die Problematik des Kontakts von Frischbeton und Holz liegt in der Auslösung organischer Holzbestandteile und der Hygroskopizität des Holzes. In der Kontaktzone kommt es zu einer Aufnahme des im Frischbeton enthaltenen Wassers, wodurch die Festigkeit des Holzes reduziert wird und der Zement nicht mehr vollständig hydratisieren kann. Durch das alkalische Milieu des Betons kommt es zu einer Auslösung der Holzzucker, wodurch die Zugfestigkeit des Holzes herabgesetzt und die Zementhydratation behindert wird [2]. Darüber hinaus werden organische Säuren wie Phenole und Gerbsäuren gelöst, welche den erhärteten Zementstein angreifen [2]. Nadelhölzer weisen eine bessere Verträglichkeit mit Beton auf, da sie weniger Gerbstoffe und Zellulosen enthalten als Laubholz [3].

Aufgrund der geometrischen Randbedingungen im Rahmen des Projekts ist eine externe Verdichtung nicht möglich, weshalb der Beton selbstverdichtende Eigenschaften aufweisen muss und keinen Grobzuschlag enthält [1]. Zusätzlich gilt es, die Schwindneigung des Betons zu reduzieren, da dieser ein höheres Schwindmaß als Holz aufweist und dadurch die Stabilität des Verbundes gefährdet wird [3].

Untersuchte Mischungen

Alle hier untersuchten Mischungen wurden als selbstverdichtende Betone (SVB) nach Okamura [4] konzipiert, da diese einen geringen w/z-Wert sowie eine geringe Neigung zum Bluten und Entmischen aufweisen. Darüber hinaus lassen sich mit SVB hohe Festigkeiten, eine hohe Dauerhaftigkeit sowie gute Verarbeitungseigenschaften erzielen [4].

Die Grundlage der sieben untersuchten Mischungen bildet eine Referenzmischung (REF) aus CEM I 52,5 R, Sand, Wasser sowie PCE-Fließmittel. Die Mischungen unterscheiden sich in der Zugabe von Schwindreduzierer sowie der Substitution des CEM I durch KSM und CSA-Zement, wodurch sich der Ausstoß umweltschädigender Emissionen der Mischungen deutlich verringern lässt [5,6]. Für Mischungen, die CSA-Zement enthalten, ist aufgrund einer schnellen Erstarrung die Zugabe eines Verzögerers erforderlich.

Neben der Referenzmischung wurden folgende Mischungen untersucht:

- SR-1,2; SR-2,0; SR-4,0: enthalten Schwindreduzierer in unterschiedlichen Dosierungen
- LSP: Substitution von 50 Vol.-% des CEM I durch KSM
- CSA: Substitution von 50 Vol.-% des CEM I durch CSA-Zement
- LSP+CSA: Substitution von 60 Vol.-% des CEM I durch KSM und 15 Vol.-% des CEM I durch CSA-Zement

Durchgeführte Frischbetonversuche

Die Frischbetoneigenschaften wurden über einen Zeitraum von 90 Minuten nach Beginn des Mischvorgangs untersucht. Die Einhaltung der Zielwerte wurde durch die Zugabe von Fließmittel und Verzögerer sichergestellt.

Ziel des Ausbreitfließmaßversuchs und der Messung der Trichterauslaufzeit in Anlehnung an die DAfStB-Richtlinie zu SVB war die Beurteilung der Viskosität, der Fließfähigkeit und der Füllfähigkeit des Frischbetons. Hieraus ließ sich auf die Verarbeitbarkeit der Mischung sowie die Eignung der Mischung als SVB schließen.

Der Luftporengehalt der Mischung gab Aufschluss über die Selbstverdichtungsfähigkeit des Betons. Dieser wurde mittels des Druckausgleichsverfahrens in Anlehnung an DIN EN 12350-7 ermittelt.

Der Erstarrungsbeginn sollte ca. 90 Minuten nach dem Mischbeginn einsetzen, um die Kontaktzeit von Frischbeton und Holz möglichst kurz zu halten, während eine ausreichend lange Verarbeitungszeit gewährleistet wird. Die Erstarrungszeiten wurden in Anlehnung an DIN EN 196-3 mithilfe eines Vicat-Nadel-Geräts ermittelt.

Durchgeführte Festbetonversuche

Die Druck- und Biegezugfestigkeiten wurden zu 5 Messzeitpunkten an jeweils 3 Normprismen über einen Zeitraum von 28 Tagen nach DIN EN 196-1 ermittelt.

Das Schwindverhalten der Mischungen wurde in Anlehnung an DAfStB-Heft 422 über einen Zeitraum von 29 Tagen untersucht.

Die Ausprägung des Verbundes zwischen Laubholz und Beton wurde mithilfe eines Abscherversuchs an Holz-Beton-Verbundbauteilen ohne weitere Verbindungsmittel überprüft.

Ergebnisse

Die Mischungen LSP sowie LSP+CSA nahmen innerhalb des Untersuchungszeitraumes stark an Viskosität zu, sodass eine ausreichende Verarbeitbarkeit nach 90 Minuten nicht mehr gewährleistet war. Die Mischung CSA zeigte eine Nachverflüssigung, welche allerdings keine weiteren Nachteile darstellte. Die Mischungen REF; SR-1,2; SR-2,0 und SR-4,0 wiesen eine geringfügige Zunahme der Viskosität innerhalb des Untersuchungszeitraumes auf. Alle Mischungen enthielten weniger als 2,0 Vol.-% Luftporen, weshalb sie als selbstverdichtende Betone klassifiziert werden konnten [4].

Die Erstarrungszeiten wurden stark von der Mischungszusammensetzung beeinflusst. Bei den Mischungen, welche KSM und CSA-Zement enthielten, setzten der Erstarrungsbeginn und das -ende deutlich früher ein. Die Zugabe von Schwindreduzierer verzögerte die Erstarrung mit

zunehmender Dosierung. Die ermittelten Erstarrungszeiten sind in Abbildung 1 zu sehen.

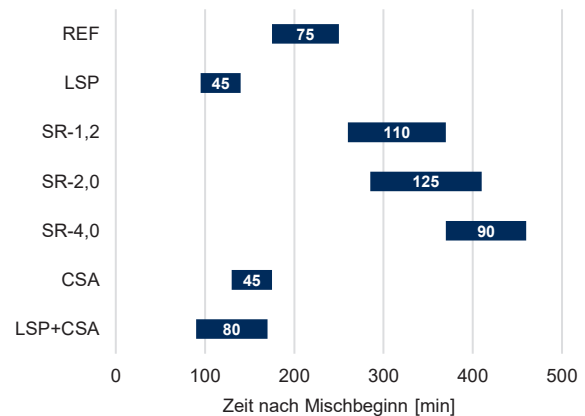


Abb. 1: Erstarrungsbeginn und -ende

Der Zielwert der Druck- und Biegezugfestigkeiten wurde entsprechend eines C30/37 festgelegt, wobei alle Mischungen, mit Ausnahme von LSP+CSA, diesen erfüllen. Die ermittelten Druckfestigkeiten sind in Abbildung 2 zu sehen.

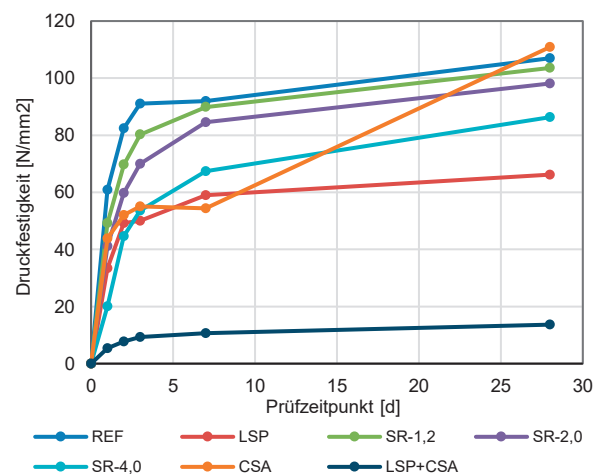


Abb. 2: Ergebnisse des Druckfestigkeitsversuchs

Die Ergebnisse der Schwindmessung (Abb. 3) zeigten, dass das Schwindmaß durch die Zugabe eines Schwindreduzierers mit zunehmender Dosierung deutlich verringert werden konnte. Die geringste Schwindneigung konnte bei den Mischungen, welche CSA-Zement enthielten, beobachtet werden [6]. Die Mischung LSP+CSA wies hierbei das geringste Schwindmaß auf, verglichen zur Referenzmischung ließ sich das Schwindmaß mit dieser Zusammensetzung um ca. 80 % reduzieren.

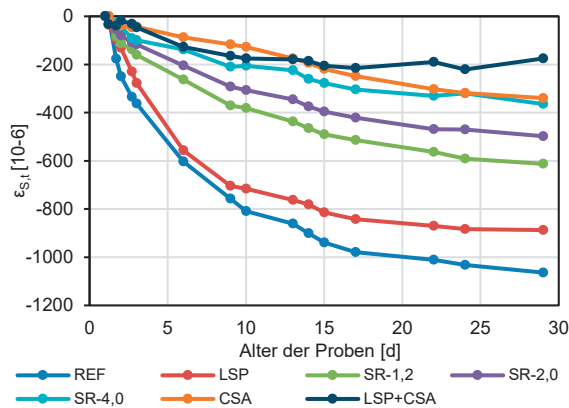


Abb. 3: Ergebnisse der Schwindmessung

Ergebnisse aus den Abscherversuchen konnten nur für die Mischungen CSA und LSP+CSA ermittelt werden, da sich bei den restlichen Probekörpern kein ausreichender Verbund zwischen Laubholz und Beton eingestellt hat. Hierbei versagten die Probekörper der Mischung CSA bei aufgetragenen Spannungen von 0,22 MPa und 0,30 MPa. Der Probekörper der Mischung LSP+CSA konnte mit 0,13 MPa belastet werden, bevor der Verbund versagt hat.

Bewertung und Fazit

Die Referenzmischung wies über 90 Minuten gute Verarbeitungseigenschaften auf. Jedoch erfüllt die Mischung aufgrund ihres hohen Gehalts an Portlandzement und der damit einhergehenden hohen Schwindneigung weder anwendungsbezogene noch ökologische Anforderungen [5].

Obwohl die Mischungen SR-1,2; SR-2,0 und SR-4,0 eine hervorragende Verarbeitbarkeit über den Untersuchungszeitraum sowie eine deutlich verringerte Schwindneigung aufwiesen, sind sie aufgrund der langen Erstarrungszeiten und ihres hohen PZ-Gehaltes ebenfalls nicht für einen Einsatz in HBV-Bauteilen geeignet.

Die Mischung LSP eignet sich aufgrund einer zu kurzen Verarbeitungsdauer nicht für die geplante Verwendung. Diese könnte durch den Einsatz eines Verzögerers optimiert werden. Die Schwindneigung ließ sich durch den Einsatz von KSM im Vergleich zur Referenzmischung um ca. 20 % reduzieren.

Aufgrund der kurzen Verarbeitungsdauer und der geringen Festigkeit ist auch die Mischung LSP+CSA für den Einsatz in HBV-Bauteilen ungeeignet [1]. Die Schwindneigung konnte durch diese Mischung jedoch deutlich reduziert und ein Verbund zwischen Holz und Beton erzielt werden.

Die Mischung CSA eignet sich von den hier untersuchten Mischungen am besten für den Einsatz in HBV-Bauteilen. Neben den hervorragenden Verarbeitungseigenschaften und einer kurzen Erstarrungszeit konnte die Schwindneigung deutlich verringert werden, wobei es keine Einbußen bei der Druckfestigkeit nach 28 Tagen gab [6]. Zudem konnte bei dieser Mischung auch der beste Verbund zwischen dem Holz und Beton nachgewiesen werden. Anhand der Versuchsergebnisse ist davon auszugehen, dass der Einsatz von CSA-Zement einen Verbund zwischen Laubholz und Beton aufgrund der kurzen Erstarrungszeit [6] und der Reduktion des Schwindmaßes begünstigt.

Eine Reduktion der umweltschädigenden Emissionen ließ sich durch den Einsatz von KSM am besten realisieren, wobei auch durch Substitution des PZ durch CSA-Zement bereits eine deutliche Verbesserung erzielt wurde [4,5].

Ausblick

Da die Mischung LSP+CSA von den hier untersuchten Mischungen die geringste CO₂-Bilanz aufwies [4,5], wäre es zielführend, diese Mischung hinsichtlich ihrer Festigkeit zu optimieren. Beispielweise könnte ein Teil des KSM durch CSA- oder Portlandzement ersetzt werden, um den Anteil an festigkeitsbildenden Bestandteilen zu erhöhen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: H. Kaufmann, „Entwicklung eines material- und energieeffizienten Holzbausystems aus Laub- und Nadelholz (LaNaSYS),“ 2019
- [2]: W. Sandermann und M. Brendel, „Studien über mineralgebundene Holzwerkstoffe—Zweite Mitteilung: Die „zementvergiftende“ Wirkung von Holzinhaltsstoffen und ihre Abhängigkeit von der chemischen Konstitution,“ Holz als Roh- und Werkstoff, Jg. 14, Nr. 8, S. 307–313, 1956. doi: 10.1007/BF02605217.
- [3]: R. C. Weatherwax, „Effect of wood on setting of Portland cement“ Jg. 14, S. 567– 570, 1964. [Online]. Verfügbar unter: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1571417124423435392>
- [4]: H. Okamura und K. Ozawa, „MIX DESIGN METHOD FOR SELF-COMPACTABLE CONCRETE,“ Doboku Gakkai Ronbunshu, Jg. 1994, Nr. 496, S. 1–8, 1994. doi: 10.2208/jscej.1994.496_1.
- [5]: C. Herget, A. Müller, T. Proske, M. Rezvani und C.-A. Graubner, „Kalksteinmehl als Betonzusatzstoff – Vorschlag für die Anrechenbarkeit auf den Zementgehalt und Potenzial zur CO₂-Reduktion im Betonbau,“ Beton und Stahlbetonbau, Jg. 117, Nr. 2, S. 109–118, 2022, doi: 10.1002/best.202100073.
- [6]: A. J. M. Cuberos et al., „Active iron-rich belite sulfoaluminate cements: clinkering and hydration,“ Environmental science & technology, Jg. 44, Nr. 17, S. 6855– 6862, 2010, doi: 10.1021/es101785n.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. R. Benedix, Bauchemie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
2. Bergmeister und J.-D. Wörner, Hg. Beton-Kalender 2007. D-69451 Weinheim, Germany: Wiley VCH Verlag GmbH, 2006.
3. DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton: (SVB-Richtlinie), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Sep. 2012

Autor, Coautoren

Lara Alexandra Zapfe

seit 04/2020	Werkstudentin, Mangerig und Zapfe Beratende Ingenieure GmbH, München
seit 10/2019	Bachelorstudium Bauingenieurwesen, Technische Universität München
2019	Allgemeine Hochschulreife, Nelson-Mandela-Berufsoberschule für Wirtschaft, München

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der TUM School of Engineering and Design, Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen, angefertigt. Die Betreuung erfolgte durch Benedikt Grimm, M. Eng. und Dr.-Ing. Thomas Kränkel.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNG ZUR VERBESSERUNG DER WASSERAUFNAHME REZYKLIERTER GESTEINSKÖRNUNG TYP 2 MITTELS BIOZEMENTIERUNG

Masterarbeit

Johanna Zentner

Der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung trägt zur Schonung natürlicher Ressourcen bei. Jedoch mindern die hohe Wasseraufnahme und Porosität, insbesondere von Typ 2 und feiner Körnung (< 2 mm), die Leistungsfähigkeit des Betons. Die Biozementierung wird als Methode untersucht, um die Eigenschaften der Körnung zu verbessern, indem Kalkablagerungen gebildet werden, die die Porosität und Wasseraufnahme reduzieren. Drei verschiedene Behandlungsmethoden - Sprühen, Tauchen und eine alternative Methode mit Unterdruck - werden hinsichtlich ihres Potenzials zur Verbesserung der Wasseraufnahme von feiner rezyklierter Körnung des Typs 2 verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass alle Behandlungsverfahren die Wasseraufnahme reduzieren konnten, wobei mehrere aufeinanderfolgende Behandlungen den Effekt verstärkten und eine Reduzierung um bis zu 60 % (von 16 % auf 6 %) erreicht werden konnte. Zudem benötigte die biozementierte Körnung weniger Wasser für die Mörtelherstellung und zeigte höhere Festigkeiten sowie geringeres kapillares Saugverhalten. Elementanalysen weisen auf mikrobiell ausgefällten Kalk hin, der durch die Biozementierung gebildet wird. Das Ziel ist es, Gesteinskörnungen mit ungünstigen Eigenschaften durch Biozementierung in der Praxis besser verarbeitbar zu machen und den Einsatz von rezykliertem Material, auch im feinen Bereich, zu erhöhen, indem die Porosität verbessert und die Wasseraufnahme reguliert wird.

Keywords: Rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2, Biozementierung, Wasseraufnahme

Rezyklierte Gesteinskörnung

Jährlich fallen deutschlandweit mehr als 200 Mio. t. mineralische Bauabfälle an, wobei etwa 30 % auf Bauschutt entfallen. Obwohl bereits 95 % davon wiederverwendet werden,

wird ein erheblicher Anteil nicht gleichwertig recycelt, sondern als Verfüllmaterial genutzt. Tatsächlich werden nur 1 % für die Herstellung von Beton verwendet, was einer Menge von weniger als 1 Mio. t. Gesteinskörnung entspricht. [1]

Bei der Herstellung von Recycling-Beton (RC-Beton) stellt besonders der Einsatz von feinen rezyklierten Gesteinskörnern (< 2 mm) sowie rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 2 mit hohen Ziegelanteilen eine Herausforderung dar. Diese führen aufgrund ihrer hohen Wasseraufnahme und Porosität zu negativen Auswirkungen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Daher ist es von Bedeutung, die Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung, insbesondere der feinen Fraktion, zu verbessern.

Biozementierung

Zur Verbesserung der Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung des Typs 2 im feinen Korngrößenbereich (0 – 2 mm) wurde die Methode der Biozementierung unter Verwendung der Bakterienkultur *Sporosarcina pasteurii* (DSM33) angewendet.

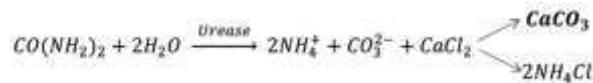


Abb. 1: Reaktion Biozementierung

Die Bakterienkulturlösung enthält das Enzym Urease. Durch die Zugabe einer sog. Zementierungslösung, bestehend aus Harnstoff ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) und Calciumsalz (CaCl_2), wird der Harnstoff gespalten und die Bakterien fällen Calciumcarbonat (CaCO_3), also Kalk aus. (Abb. 1) [2]

Der durch die Biozementierung entstandene Kalk füllt die schwachen Bereiche der Gesteinskörnung und stärkt die Kontaktzone (Abb. 2). Dies führt zu einer Reduzierung der Porosität und Wasseraufnahme der rezyklierten Gesteinskörnung und verbessert somit die Frisch- und Festbetoneigenschaften.

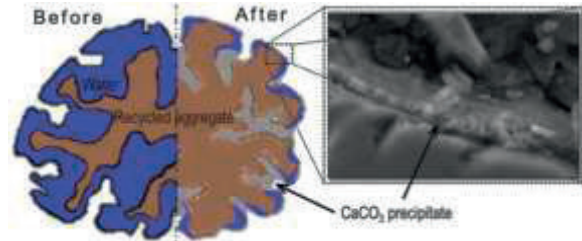


Abb. 2: Rezyklierte Gesteinskörnung verbessert durch Biozementierung [3]

Biozementierungs-Behandlungsmethoden

Die Behandlung der rezyklierten Gesteinskörnung umfasst drei verschiedene Beaufschlagungsmethoden der Biozementierung: Sprühen, Tauchen und eine alternativ entwickelte Methode unter Verwendung von Unterdruck. Diese Methoden wurden an derselben Körnung bis zu fünfmal wiederholt angewandt. (Abb. 3)



Abb. 3: Schematische Darstellung der Biozementierungs-Behandlungsmethoden

Versuchsergebnisse rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2

Um die Wirksamkeit der Biozementierungs-Behandlungsmethoden auf die rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 2 zu untersuchen, wurde die Wasseraufnahme vor und nach jeder Beaufschlagung durch die Prüfung der Wasseraufnahme des getrockneten Materials bestimmt. (Abb. 4).

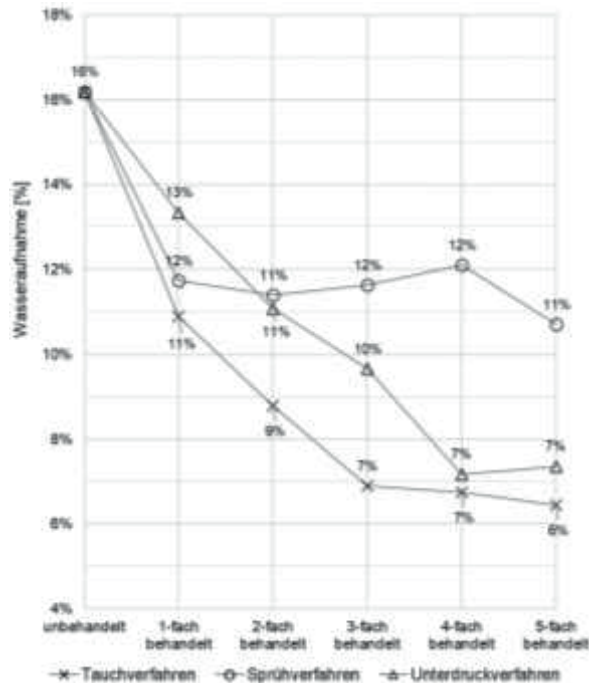


Abb. 4: Ergebnisse der Wasseraufnahme der rezyklierten Gesteinskörnung der Kornfraktion 0,125-0,250 mm vor und nach den verschiedenen Beaufschlagungsmethoden

Die Ergebnisse zeigen, dass alle drei Behandlungsmethoden bereits nach der ersten Anwendung zu einer deutlichen Verringerung der Wasseraufnahme der rezyklierten Körnung führen. Durch wiederholte Beaufschlagungen kann der Wasseranspruch weiter reduziert werden. Im Vergleich zur unbehandelten Körnung führt das Tauchverfahren zu der höchsten Reduktion der Wasseraufnahme von 16 % auf 6 %. Nach der dritten Beaufschlagung bleibt die Wasserabsorption nahezu konstant. Das Unterdruckverfahren zeigt eine kontinuierliche Abnahme nach jedem Behandlungsschritt, bis zur vierten Beaufschlagung auf 7 %. Die prozentuale Reduktion steigt hierbei mit jeder Anwendung am stärksten an. Bei der Sprühmethode hingegen zeigt sich keine signifikante Wirkung durch wiederholte Biozementierungsbehandlungen. Nach der ersten Anwendung bleibt die Wasserabsorption nahezu konstant zwischen 11-12 %.

Zur Analyse des durch die Biozementierung gebildeten Kalks wurde das unbehandelte und behandelte Material unter anderem mittels Röntgenbeugung (XRD) untersucht. Die XRD-Messergebnisse zeigen, dass alle drei

Behandlungsmethoden die prozentuale Zunahme des ausgefällten Calciumcarbonats positiv beeinflussen. Im Vergleich zu den anderen Biozementierungsmethoden zeigt das Unterdruckverfahren die größte prozentuale Zunahme des ausgefällten Kalks. Nach der vierten Beaufschlagung hat sich der CaCO_3 -Gehalt mehr als verdoppelt. Die prozentuale Zunahme steigt hierbei von Beaufschlagung zu Beaufschlagung am steilsten an. Ebenso verdoppelt sich beim Tauchverfahren der Kalk-Gehalt fast. Nach der fünften Anwendung kann eine prozentuale Zunahme von 96 % erreicht werden. Bei der Sprühmethode nimmt das Calciumcarbonat nur bis zur zweiten Behandlung zu, danach sinkt er.

Versuchsergebnisse Mörtelproben

Nach Bewertung der drei verschiedenen Beaufschlagungsmethoden an der losen rezyklierten Körnung wurden Mörtelproben aus 100 % rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 2 hergestellt. Dabei wurden sowohl Prismen mit unbehandelter Körnung als auch mit Körnung, die durch dreifache Biozementierung mittels des Unterdruckverfahrens behandelt wurde, hergestellt. Zur Beurteilung der Auswirkungen der Biozementierung auf die Mörtel Eigenschaften wurden sowohl Frisch- und Festbetonversuche durchgeführt und mit Referenzproben aus Normsand verglichen.

Zur Bewertung der Frischbetoneigenschaft wurden Konsistenzen anhand des Ausbreitmaßes bestimmt. Dabei fällt auf, dass der Mörtel, der mit der behandelten Körnung hergestellt wurde, bei gleicher Frischmörtelkonsistenz und gleichem Saugwasseranteil etwa 30 % weniger zusätzliches Wasser zur Vorbefeuchtung benötigt als der Mörtel mit unbehandelter rezyklierter Körnung.

Um die Verbesserungseffekte auf die Festmörteleigenschaften zu bewerten, wurden Druck- und Biegezugfestigkeiten sowie das kapillare Saugen untersucht. Die Mörtelproben aus der behandelten Körnung weisen im Vergleich zu den

unbehandelten Proben deutlich höhere Biegezugfestigkeiten auf. Die Druckfestigkeiten nahmen nur geringfügig zu. Dies deutet darauf hin, dass die Biozementierung keinen direkten Einfluss auf die Kornfestigkeit hat, jedoch die Kontaktzone zwischen den Körnern verbessert. Darüber hinaus reduzierte sich die kapillare Wasseraufnahme der behandelten Mörtelproben um 50 %, was zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit beitragen kann.

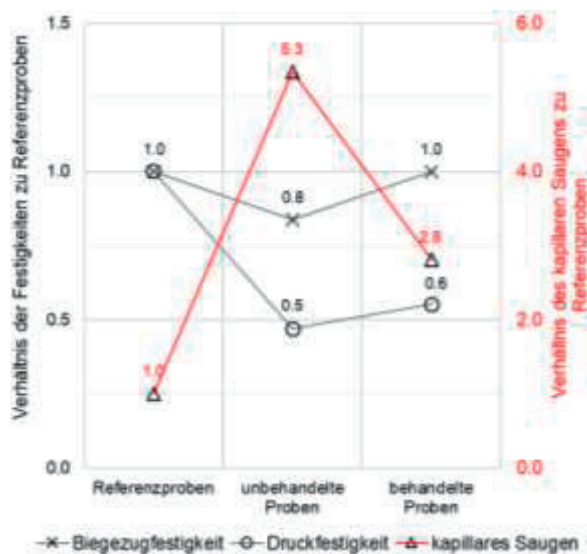


Abb. 5: Gegenüberstellung der Messergebnisse von Biegezug- und Druckfestigkeiten und der kapillaren Wasseraufnahme im Verhältnis zu den Referenzproben

Beim Vergleich der Festigkeiten im Verhältnis zu den Referenzproben in Bezug auf das kapillare Saugen (s. Abb. 5) zeigt sich, dass die Festigkeiten proportional zur kapillaren Wasseraufnahme abnehmen. Die Festigkeiten weisen einen ähnlichen Verlauf zueinander auf, und die kapillare Wasseraufnahme ist direkt proportional dazu. Im Vergleich zu den Referenzproben sinken die Festigkeiten der unbehandelten Proben, während die kapillare Wasseraufnahme steigt. Die behandelten Festmörtelproben weisen eine höhere Festigkeit im Vergleich zu den unbehandelten Proben auf, zudem verbessert sich das Saugverhalten. Das bedeutet, je höher die Festigkeit des Mörtels, desto geringer ist die kapillare Wasseraufnahme.

Zusammenfassung

Die Untersuchung der Auswirkungen der Biozementierung auf die rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 2 zeigt grundsätzlich eine Verbesserung der Eigenschaften sowohl im ungebundenen Zustand als auch im gebundenen Zustand. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass alle verwendeten Verfahren zur Behandlung der rezyklierten Körnung die Wasseraufnahme reduzieren konnten. Die wiederholte Anwendung der Beaufschlagung konnte diesen Effekt verstärken. Elementaranalysen der behandelten Körnung weisen bei allen Verfahren auf eine Zunahme von mikrobiell ausgefälltem Kalk hin.

Auch die Frisch- sowie Festbetoneigenschaften konnten durch die Biozementierung verbessert werden. Durch die Behandlung wurde weniger zusätzliches Saugwasser für die Vorbefeuchtung der Körnung benötigt, um eine ähnliche Verarbeitbarkeit des Mörtels zu erreichen. Vor allem die Biegezugfestigkeit sowie das kapillare Saugen konnten deutlich verbessert werden.

Der durch die Biozementierung ausgefällte Kalk verbessert die Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung. Dies eröffnet Möglichkeiten für den verstärkten Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung, insbesondere von feiner rezyklierter Gesteinskörnung (< 2 mm), in der Betonherstellung. Durch die erhöhte Nutzung und den hochwertigeren Einsatz von recyceltem Bauschutt kann die Betonherstellung effizienter und nachhaltiger gestaltet werden.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2022). Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien. <https://www.vdzonline.de/ressourcenschonung>.
- [2]: Van Paassen, L. A. (2009). Biogrout – Ground Improvement by Microbially Induced Carbonate Precipitation. Delft University of Technology.
- [3]: García-González, J. et al. (2017). Quality improvement of mixed and ceramic recycled aggregates by biodeposition of calcium carbonate. Construction and Building Materials 154, 1015-1023.

Autor

Johanna Zentner, Master of Engineering

Betreuer

Die Arbeit wurde veranlasst durch Frau Prof. Dr.-Ing. Charlotte Thiel der OTH Regensburg und in Kooperation des Lehrstuhls für Baustoffkunde und Bauchemie der Hochschule München durchgeführt und von Frau Prof. Dr.-Ing. Andrea Kustermann betreut.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.



ISBN 978-3-89650-565-1 // € (D)

