DAS BAYERISCHE BAUGEWERBE

HOCHSCHULPREIS
des Bayerischen Baugewerbes
2025

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

Korbinian Ableitner • Kai Dietmair • Josef Eichinger • Anna Fautz • Chiara Hauschulz • Lena Huber • Annika Karl • Manuel Kohl • Markus Meier • Johannes Paule • Erik Rechenberg• Julia Sinning • Matthias Staudinger • Leon Unewisse • Annica Wedekind

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 Mai 2025

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 sowie in nachvollziehbarer, verständlicher Darstellung werden ausgezeichnet. Der Preis wird 2025 zum 17. Mal vergeben.

In der vorliegenden Veröffentlichung werden die vom Wettbewerbsausschuss ausgezeichneten 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 sechsunddreißig Bachelor- und Masterarbeiten von

- der Technische Hochschule Augsburg,
- der Technischen Hochschule Deggendorf,
- der Technischen Universität München,
- der Hochschule für angewandte Wissenschaften München,
- der Universität der Bundeswehr München,
- der Technischen Hochschule Nürnberg Georg-Simon-Ohm,
- der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg und
- der Technischen Hochschule Würzburg-Schweinfurt.

eingereicht. Aus den sechsunddreißig Arbeiten hat der Wettbewerbsausschuss entschieden, drei Arbeiten mit einem Geldpreis und zwölf Arbeiten mit einer Teilnahmeurkunde auszuzeichnen.

Erstmalig beim Hochschulpreis 2024 und in diesem Jahr verstärkt werden von den Teilnehmern KI-Technologien zur sprachlichen Überprüfung sowie vereinzelt zur Quellenrecherche eingesetzt.

Mit dem **1. Preis** und einem Geldbetrag von 3.000,- Euro wird Herr Josef Eichinger für seine Masterarbeit „Untersuchung der Klima(wandel)-performanz von Mehrfamlienhäusern“ ausgezeichnet.

Den **2. Preis** und einen Geldbetrag von 2.000,- Euro erhält Frau Lena Huber für ihre Bachelorarbeit „Interaktion von calcinierten Tonen und Fließmitteln im Frischbeton“.

Den **3. Preis** und einen Geldbetrag von 1.000,- Euro erhält Frau Annika Karl für ihre Bachelorarbeit „Experimentelle Untersuchungen zur Schubtragfähigkeit von Lehmsteinmauerwerk“.

Der Wettbewerbsausschuss:
Benedikt Baumann
Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann
Brigitte Nagy
Prof. Dr.-Ing. Thomas Neidhart
Axel Neißer-Deiters
Klara Maria Santer
Thomas Schneider
Olaf Techmer
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel
Christopher Wening

Inhaltsverzeichnis

Korbinian **Ableitner**, Bachelorarbeit Seite 3
Tragfähigkeitsuntersuchung einer Sandwichplatte aus Carbonbeton und Schaumglas

Kai **Dietmair**, Bachelorarbeit Seite 8
Analyse der Kollaborationsplattform Speckle im Hinblick auf inkrementelle Updates von BIM-Modellen

Josef **Eichinger**, Masterarbeit Seite 13
Untersuchung der Klima(wandel)performanz von Mehrfamilienhäusern

Anna **Fautz**, Masterarbeit Seite 18
Optimierung offenporiger Asphalte für Geh- und Radwegbereiche unter dem Aspekt der Schwammstadt

Chiara **Hauschulz**, Masterarbeit, Seite 23
Reduktion des Treibhauspotenzials und Ressourcenverbrauchs von Hochbauprojekten durch den Einsatz von CO2-effizienten und R-Betonen in Bayern

Lena **Huber**, Bachelorarbeit, Seite 28
Interaktion von calcinierten Tonen und Fließmitteln im Frischbeton

Annika **Karl**, Bachelorarbeit Seite 33
Experimentelle Untersuchungen zur Schubtragfähigkeit von Lehmsteinmauerwerk

Manuel **Kohl**, Masterarbeit Seite 38
Ag/AgCl-Chloridsensoren für die Untersuchung des Chlorideindringverhaltens in Zementmörtel: Entwicklung und Anwendung im Diffusionsversuch und RCM-Test

Markus **Meier**, Masterarbeit Seite 43
Vertiefte Untersuchungen zum Verformungsverhalten von Gründungen auf verbesserten Böden mit CSV-Säulen

Johannes **Paule**, Masterarbeit Seite 48
Reaktivität von Zementmehl und Ziegelmehl
Vergleichende Untersuchung zur Reaktivität von rezykliertem Zementmehl und Ziegelmehl als reaktiven Baustoff in Beton/Mörtel

Erik **Rechenberg**, Bachelorarbeit Seite 53
Entwicklung eines Konzeptes zur Optimierung von Stoffströmen (ausgenommen: Bodenmaterial) zwischen Baustellen zur Abfallverringerung inkl. Umsetzung als Excel-Tool

Julia **Sinning**, Bachelorarbeit Seite 58
Nachhaltig Bauen mit Beton – Quantifizierung der ökologischen Optimierungspotentiale der Betonbauweise unter Berücksichtigung lokal verfügbarer (Sekundär-)Materialien

Matthias **Staudinger**, Bachelorarbeit Seite 63
Innovative Bestandserfassung, CAD-basierte Entwurfsplanung und energetische Bewertung für ein Bestandsgebäude mit Nutzungsänderung und Anbau

Leon **Unewisse**, Masterarbeit Seite 68
Untersuchung des Tragverhaltens von carbonfaserverstärktem Ultra-Hochleistung Beton (C-UHFB) unter Biegezugbeanspruchung

Annica **Wedekind**, Masterarbeit Seite 73
Anwendung von Building Information Modeling in der Straßenerhaltung

TRAGFÄHIGKEITSUNTERSUCHUNG EINER SANDWICH-PLATTE AUS CARBONBETON UND SCHAUMGLAS

Bachelorarbeit

Korbinian, Ableitner

Um alte Gebäude wärmetechnisch aufwerten zu können, wird häufig Polystyrol-Extruderschaum (XPS oder Styrodur) außenseitig angebracht. Dies ist ein sehr arbeitsaufwendiger Prozess. Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit war es, ein Sandwichelement aus Carbonbeton und Schaumglas versuchsbasiert zu untersuchen, welches in Zukunft einfach und schnell als Vorsatzschale an Bestandsgebäude angebracht werden kann. Hierfür wurden 4-Punkt-Biegeversuche durchgeführt, um die Realisierbarkeit dieses Aufbaus zu testen. Es stellte sich heraus, dass die Fertigung eines solchen Bauteils grundsätzlich möglich ist, jedoch Verbundanker zwischen den Bauteilschichten unvermeidbar sind. Zudem wurde der CO_2-Fußabdruck mit einem herkömmlichen Wandaufbau verglichen. Dabei zeigte sich, dass ein Aufbau aus Carbonbeton und Schaumglas ca. 61 Prozent weniger Emissionen verursacht. Das Ziel ist es, dieses Sandwichelement künftig als Dachelemente, Vorsatzschalen für Bestandsgebäude, Füllteile für die Skelettbauweise und selbsttragende Wände für den Hochbau genutzt werden kann.

Keywords: Fertigteile, Sandwichelement, Carbonbeton, Schaumglas, Wärmedämmung, schnelle Bauweise

Einführung

In Deutschland gibt es sehr viele alte Gebäude, die energetisch aufgewertet werden müssen. Dabei wird oft außenseitig an dem Gebäude Wärmedämmung angebracht. Dies ist jedoch ein sehr arbeitsintensiver, mehrschrittiger Vorgang. In dieser Bachelorarbeit wird ein Sandwichelement aus Carbonbeton und Schaumglas betrachtet, welches als Fertigteil hergestellt werden soll und als Vorsatzschale wärmedämmende sowie tragende Funktionen übernehmen kann. Es geht zunächst darum, ob solch ein Aufbau als Sandwichelement überhaupt realisierbar ist und wie das Verbundverhalten zwischen den beiden beschriebenen Materialien ausfällt.

Die Idee

Die Idee ist es, vorgefertigte Sandwichelemente in einem Fertigteilwerk herzustellen, die danach nur noch mittels passender Verbindungsmittel an einer bestehenden Wand
angebracht werden müssen. Das beschriebene Fertigteil soll alle bauphysikalischen Eigenschaften übernehmen, sodass die Fassade mit Anbringen des Fertigteils komplett fertig ist. Um innovative Baumaterialien zu verwenden, hat man sich dazu entschlossen, einen Aufbau aus Carbonbeton und Schaumglas zu untersuchen.

Die Deckschicht: Carbonbeton

Carbonbeton oder textil-bewehrter Beton ist ein Zusammenspiel aus Carbonbewehrung und Beton. Dabei nimmt das Carbon die Zugkräfte auf und der Beton die Druckkräfte, vergleichbar wie bei Stahlbeton, auf. Die Herstellung der Carbonbewehrung erfolgt in Maschinen, bei welchen die Anzahl der Filamente pro Faserstrang die Zugfestigkeit in verschiedene Richtungen festlegt. Daraus ergibt sich, dass Carbonbewehrung unterschiedliche Festigkeiten in unterschiedliche Richtungen, die sogenannte Kett- und Schussrichtung, hat. Diese Informationen wurden in einer Werksführung durch in einer Carbonbewehrungsfirma übermittelt und flossen dadurch in die Arbeit mit ein.

Vorteilhaft, die Deckschicht aus Carbonbeton herzustellen ist, dass man dadurch sehr viel Beton einsparen kann. Dies liegt daran, dass Carbon nicht korrodieren kann und man deshalb die Betondeckung nur für das Verbundverhalten benötigt, jedoch nicht für den Korrosionsschutz. Daher liegt die Mindestbetondeckung viel geringer als verglichen mit einem Aufbau aus Stahlbeton.

Die außenliegende Deckschicht muss im System die Momentenbelastung aufnehmen. Dabei ist es wichtig, dass ein guter Verbund mit dem Kern hergestellt wird [1].

Der Kern: Schaumglas

Die Kernschicht des Sandwichelementes besteht aus Schaumglas. Dies ist vorteilhaft, da es sich um einen sehr druckfesten Dämmstoff handelt, welcher außerdem schädlingsresistent und nicht brennbar ist. Diese Eigenschaften passen sehr gut für die Beanspruchungen einer Fassade. Zusätzlich ist positiv, dass Schaumglas aus Altglas hergestellt werden kann und man es nach der Nutzungsdauer auch wieder recyceln kann.

Die Kernschicht aus Schaumglas stellt in dem Sandwichelement die mittlere Schicht zwischen den beiden Deckschichten dar. Sie übernimmt die wärmedämmenden Eigenschaften und muss die Querkräfte im System abtragen [1]. Auch deshalb eignet sich Schaumglas sehr gut als Kernschicht, da es eine relativ hohe Schubfestigkeit hat.

Durchgeführte Versuche

Die Aufgabe war es festzustellen, ob ein Aufbau aus Schaumglas und Carbonbeton überhaupt sinnvoll und realisierbar ist. Dafür wurden 4 – Punkt – Biegeversuche durchgeführt um das Verbundverhalten und die Tragfähigkeit herauszufinden. In Abbildung 1 sieht man einen fertigen Probekörper mit den beiden Deckschichten und der Kernschicht. Die Kernschicht ist mit Beton verschmutzt, da bei dem Herstellen des Prüfkörpers etwas Beton an der Schalungsinnenseite heruntergelaufen ist.



Abb. 1: Beispielhafter Aufbau eines Probekörper während eines 4-Punkt-Biegeversuches

Der Testkörper besteht aus zwei drei Zentimeter dicken Deckschichten aus Carbonbeton und einem neun Zentimeter dicken Kern aus Schaumglas. Um die Vergleichbarkeit der Versuche sicherzustellen, haben alle Prüfkörper identische Abmessungen. Es wurden verschiedene Versuchskörper geprüft, abhängig von der Lagerung (z.B. unter Wasser) oder davon, ob Verbundmittel eingebaut wurden oder nicht. Diese Variation von Versuchen wurde gewählt, um mögliche Einflussfaktoren auf das Tragverhalten verifizieren zu können. Der Aufbau des geprüften Bauteils ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abb. 2: Ansicht und Abmessungen Prüfkörper für die Belastungsversuche

Es wurden insgesamt vier Biegeversuche mit den Sandwichelementen durchgeführt und zwei Biegeversuche mit nur einer drei Zentimeter dicken Carbonbetonplatte, um Vergleichswerte zu erhalten und die Ergebnisse einordnen zu können.

Versuchsauswertung

Aus allen Versuchswerten wurde ein zugehöriges Kraft-Verschiebungs-Diagramm aufgestellt.

Dabei kann man ganz deutlich sehen, dass das Verwenden von Verbundankern unabkömmlich ist. So ist die Tragfähigkeit im Vergleich von Verbundankern zu ohne Verbundanker ungefähr um das 2,5-Fache höher. Dies wird in Abbildung 3 deutlich. Dabei sind die unteren beiden Kurven (grün und braun) die Werte von Probekörpern ohne Verbundmittel und die obere Kurve (blau) ist die Last-Verschiebungskurve für einen Prüfkörper mit Verbundmittel.

Dabei sind drei markante Punkte (1, 2, 3) in Abbildung 3 erkennbar. In Punkt 1 ist eine enorme Lastspitze in Kombination mit einer geringen Durchbiegung zu erkennen. Der Lastabfall danach ist durch den ersten Querkraftriss im Schaumglas begründbar. Bis Punkt 2 wirkt das System als Sandwichelement, danach war der Verbund nicht mehr gegeben und das System wirkt bis Punkt 3 und dem einhergehenden Versagen als einzelne Platten.

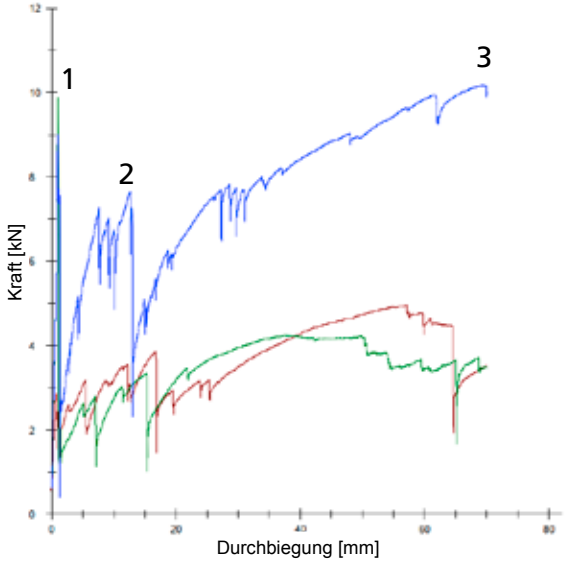


Abb. 3: Versuchsauswertung der 4-Punkt-Biegeversuche

Ökobilanzierung

Außerdem werden in der Arbeit die Auswirkungen auf die Umwelt eines herkömmlichen Aufbaus aus Stahlbeton und XPS-Dämmung und den Aufbau aus Carbonbeton und Schaumglas verglichen. Der zu vergleichende Aufbau ist in Abbildung 4 dargestellt.

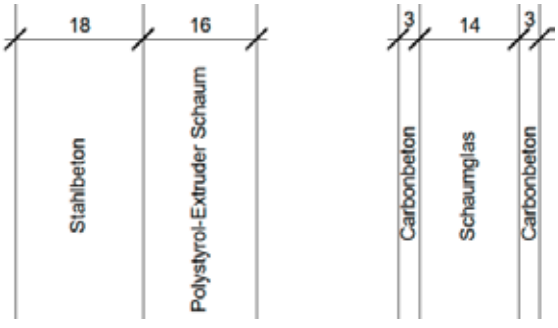


Abb. 4: links: Stahlbeton Aufbau, rechts: Sandwichaufbau; Gegenüberstellung für Ökobilanzierung

Um die Vergleichbarkeit der beiden Wandaufbauten sicherzustellen, weisen beide Aufbauten einen ähnlichen U-Wert auf.

Es hat sich herausgestellt, dass der Aufbau aus Carbonbeton und Schaumglas einen um 61 % besseren Wert aufweist, als der herkömmliche Aufbau aus Stahlbeton und XPS-Dämmung. Sehr positiv war hierbei die geringe Betondicke. Des Weiteren ist bei dem Sandwichelement positiv zu erwähnen, dass das Schaumglas wieder eingeschmolzen und aufbereitet werden kann und durch diesen Aufbau kein Sondermüll produziert wird. Eine Trennung der Deckschichten vom Kern ist einfach möglich.

Fazit/ Aussichten

Die Hoffnung ist, dass Sandwichelemente aus der Verbindung von Carbonbeton und Schaumglas als abschließende, vorgefertigte Elemente der Gebäudehülle dienen können. So ist vorstellbar, dass daraus Dachelemente, Vorsatzschalen für Bestandsgebäude, Füllteile für die Skelettbauweise und selbsttragende Wände für den Hochbau entstehen können. Vorteilhaft dabei ist der hohe Vorfertigungsgrad und die ökologischen Aspekte.

In den Versuchen hat sich jedoch herausgestellt, dass ohne Verbindungsmittel zwischen der Deck- und Kernschicht die Verbundbedingungen nicht ausreichend groß sind und deshalb das Verwenden von Verbundankern unverzichtbar ist.

Abschließend kann man sagen, dass ein Aufbau aus Carbonbeton und Schaumglas möglich ist. Um diese Art von Sandwichelement jedoch als Vorsatzschale oder als selbständig tragendes Bauteil verbauen zu können, muss noch weitere Forschung betrieben werden.

Literaturverzeichnis

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

[1] R. Koschade, Die Sandwichbauweise, Berlin: Ernst & Sohn, 2000.
[2] C. H. Kulas, Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile, Aachen: Fakultät für Bauingenieurwesen der RWTH Aachen, 2013.
[3] S. Rempel, Zur Zuverlässigkeit der Bemessung von biegebeanspruchten Betonbauteilen mit textiler Bewehrung, Aachen: Fakultät für Bauingenieurwesen der RWTH Aachen, 2018.
[4] HITEXBAU_GmbH, „hitexbau.com," 2022. [Online]. Available: https://www.hitexbau.com/men%C3%BC/anwendungen/. [Zugriff am 14. Januar 2023].
[5] A.-C. von der Heid, Zum Tragverhalten von Sandwichelementen aus Textilbeton mit schlaffer und vorgespannter Bewehrung, Aachen: Fakultät für Bauingenieurwesen der RWTH Aachen, 2021.

Autor

Ableitner, Korbinian, B. Eng., Bauingenieurwesen

Ausbildung:

Seit 10/2023	Master Studium Bauingenieurwesen TU München (inkl. Auslandssemester in Valencia/ Spanien)
10/2019 bis 09/2023	Bachelor Studium Bauingenieurwesen TH Augsburg (inkl. Auslandssemester in Horsens/ Dänemark)

Beruflicher Werdegang:

04/2023 – 12/2024	Praktikum und Werkstudent Bauleitung bei Josef Hebel GmbH
09/2021 – 01/2022	Praxissemester Tragwerksplanung bei Bollinger + Grohmann

Auszeichnungen:

10/2025	1. Platz bayerischer Ingenieurpreis: studentischer Projektleiter in Projekt „Surfwelle Augsburg"
10/2023	Adam-Keller-Preis der TH Augsburg für Bachelorarbeit

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Massivbau an der TH Augsburg.
Betreut wurde die Arbeit von Prof. Sergej Rempel und Dr. Thomas Reiß.

Die Arbeit wird mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ANALYSE DER KOLLABORATIONSPLATTFORM SPECKLE IM HINBLICK AUF INKREMENTELLE UPDATES VON BIM-MODELLEN

Bachelorarbeit

Kai Dietmair

In dieser Arbeit werden die Kollaborationsplattform Speckle und ihr Ansatz bei der Umsetzung inkrementeller Updates von BIM-Modellen untersucht. Hierfür werden Versuche mit den jeweiligen Speckle-Plug-ins für eine BIM-Autorensoftware und eine CAD-Autorensoftware durchgeführt. Im Rahmen dieser Tests wird jeweils ein Modell in der BIM- und der CAD-Software erstellt. Anschließend wird geprüft, inwiefern die Plug-ins in der Lage sind, die Abmessungen von Modellobjekten zu verändern sowie Modellobjekte zu verschieben, einzufügen und zu entfernen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass Speckles aktuelles Datenmodell noch gewisse Einschränkungen beim Entfernen von Objekten aufweist. Alle weiteren inkrementellen Modellupdates kann die Plattform jedoch weitestgehend effizient verarbeiten und dadurch sowohl die Fehleranfälligkeit als auch den Datenaufwand im Vergleich zum traditionellen Austausch von vollständigen Modellen reduzieren. Dies ermöglicht eine Optimierung digitaler Planungs- und Kooperationsprozesse sowie eine Steigerung der Effizienz bei der Umsetzung von Bauprojekten.

Keywords: Speckle, inkrementelle Modellupdates, Versionskontrolle, BIG Open BIM

Einführung und Problemstellung

Die Planung bebauter Umwelt zeichnet sich durch eine Vielzahl von Planern unterschiedlicher Disziplinen aus. Zusammenarbeit und Kommunikation sind hier unumgänglich. In den letzten zwei Jahrzehnten wurde dabei der traditionelle Informationsaustausch in Form ausgedruckter Pläne und Dokumente zunehmend durch modellbasierte Ansätze aus dem Bereich des Building Information Modeling (BIM) ersetzt [1]. Ein BIM-Modell enthält geometrische sowie semantische Informationen über ein Bauwerk und kann in verschiedenen Dateiformaten encodiert werden [2].

Aufgrund des iterativen Charakters von Planungsprozessen kommt es häufig zu Änderungen in Modellen, die möglicherweise bereits an andere Projektbeteiligte ausgetauscht

worden sind. Die gängige Praxis besteht heute darin, das veränderte Modell als neue monolithische Datei mit anderen Akteuren zu teilen. Diese müssen das neue Modell manuell auf Änderungen und Unstimmigkeiten mit ihrem eigenen domänenspezifischen Modell überprüfen, was arbeitsintensiv und fehleranfällig ist. Verbessert werden kann die Situation durch den Einsatz inkrementeller Update-Verfahren, in denen im Falle einer Änderung lediglich die Informationen über die modifizierten Bestandteile eines Modells übermittelt werden [3].

Die Kollaborationsplattform Speckle stellt eine moderne Lösung für den digitalen Datenaustausch im Bauwesen dar und bietet großes Potenzial für eine verbesserte Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren. Durch die Nutzung einer objektbasierten Datenstruktur überträgt Speckle nur relevante Änderungen an Modellen, wodurch der Datenaufwand erheblich reduziert wird.

Stand der Wissenschaft und Technik

Um das Potenzial von Speckle zu bewerten, wird zunächst der aktuelle Stand der Wissenschaft betrachtet. Neben grundlegenden Prinzipien der Informatik wie objektorientierter Programmierung, Transaktionen und Nebenläufigkeitskontrollen, werden auch Versionskontrollsysteme vorgestellt. Mithilfe von Versionskontrolle lassen sich ausgewählte Dateien oder ein gesamtes Projekt auf einen früheren Zustand zurücksetzen, Unterschiede zwischen Dateiversionen feststellen und Verantwortlichkeiten von Projektbeteiligten festhalten [4]. Auch Common Data Environments (CDEs) als zentrale Plattformen für die Verwaltung von BIM-Daten werden diskutiert. Diese bieten eine standardisierte Umgebung für den Datenaustausch, sind jedoch meist auf monolithische Modellstrukturen beschränkt [5]. Außerdem werden alternative Konzepte für inkrementelle Updates von BIM-Modellen erwähnt wie beispielsweise der in [3] ausgearbeitete graphenbasierte Ansatz.

Methodik

Zur Analyse von Speckle werden praktische Tests mit den Speckle-Plug-ins („Connectors“) für zwei unterschiedliche Softwareprodukte durchgeführt:

- Revit als BIM-Autorensoftware mit strukturierten Bauteilobjekten wie Wänden und Türen
- AutoCAD als CAD-Autorensoftware mit reinen Geometrieobjekten wie 3D-Volumenkörpern und Vielflächennetzen

Dabei werden verschiedene Modelländerungen vorgenommen und in Form sogenannter Commits an den Speckle-Server gesendet. Anschließend wird geprüft, inwiefern Speckle in der Lage ist, Modellobjekte zu modifizieren, zu verschieben, einzufügen und zu löschen, indem diese Commits in eine veraltete Modellversion empfangen werden. Die Ergebnisse werden anhand der in der JavaScript Object Notation (JSON) serialisierten Speckle-Objekte analysiert und miteinander verglichen.

Folgende Testfälle werden betrachtet:

- Verändern von Bauteilabmessungen
- Verschieben von Objekten innerhalb eines Modells
- Einfügen neuer Objekte in ein bestehendes Modell
- Löschen von Objekten aus einem bestehenden Modell
- Datenübertragung zwischen der BIM-Software Revit und der CAD-Software AutoCAD

Die gewählten Tests decken wesentliche Aspekte der inkrementellen Modellaktualisierung ab und ermöglichen eine detaillierte Bewertung der Plattform. Zusätzlich wird untersucht, inwiefern unterschiedliche Modellformate durch die Speckle-Architektur kompatibel bleiben und welche technischen Herausforderungen bei der Implementierung bestehen.

Versuchsergebnisse

Der Revit-Connector liefert in vielen Fällen die erwarteten Ergebnisse und setzt inkrementelle Updates von BIM-Modellen erfolgreich um. Besonders das Modifizieren, Verschieben und Einfügen von Objekten, die andere Modellobjekte beinhalten können (sogenannte „Host Objects“), funktioniert problemlos. Beispiele für Host Objects sind Wände und Böden. Das Löschen von Modellelementen gelingt nur unter bestimmten Bedingungen. Um ein Objekt aus einem BIM-Modell zu entfernen und diese Änderung als Inkrement an den Speckle-Server zu senden, kann kein intuitiver Löschbefehl erstellt werden. Stattdessen ist hierfür stets ein Commit mit mehreren Objekten erforderlich.

Auf Objekte, die hingegen Bestandteile anderer Modellobjekte sind und nicht ohne diese im Modell existieren können (sogenannte „Hosted Objects“), kann mittels des Revit-Connectors nur indirekt zugegriffen werden. Beispiele für Hosted Objects sind Fenster oder Türen. Solche Objekte können nur eingefügt, verändert oder gelöscht werden, wenn ein Umweg über deren jeweilige Host Objects genommen wird. Es reicht nicht aus, nur das veränderte Hosted Object als Inkrement an den Speckle-Server zu senden. Stattdessen muss zusätzlich immer noch dessen Host Object im Commit inkludiert werden. In Abb. 1 ist beispielsweise das notwendige Vorgehen dargestellt, um eine Tür mithilfe des Revit-Connectors in ein BIM-Modell einzufügen. Wird nur die Tür allein in das Modell empfangen, bleibt das Modell unverändert. Erst wenn die Tür zusammen mit ihrer Host-Wand vom Speckle-Server empfangen wird, wird die Tür erfolgreich in das Revit-Modell eingefügt.

Beim AutoCAD-Connector funktionieren das Verschieben, Einfügen und Modifizieren von 3D-Objekten grundsätzlich, jedoch konvertiert der Connector Volumenkörper in Vielflächennetze. Das zeigt, dass nicht alle Modellinformationen verlustfrei übertragen werden.

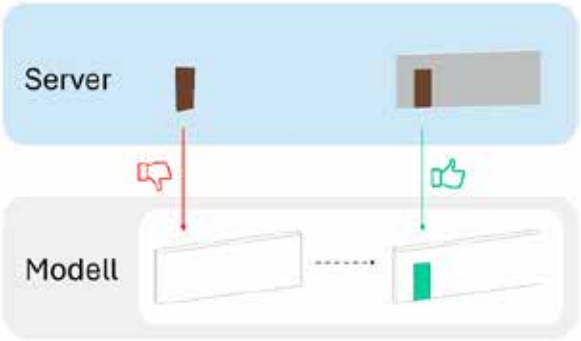


Abb. 1: Zunächst bleibt das Einfügen der Tür erfolglos, da die Tür allein empfangen wird. Anschließend wird sie mit ihrer Host-Wand empfangen und dadurch erfolgreich eingefügt. [6]

Diskussion

Zurückzuführen ist das Verhalten des Revit-Connectors auf den hierarchischen Aufbau der Speckle-Commits und deren strikte Trennung von Bauteilgruppen. Host Objects referenzieren zwar ihre Hosted Objects, jedoch findet keine Referenzierung in die umgekehrte Richtung statt. Eine Tür, die zusammen mit ihrer Host-Wand an den Server gesendet wird, gehört der „Wall-Collection“ an. Wird die Tür jedoch ohne ihre Host-Wand versendet, so gehört sie der „Door-Collection“ an und kann nicht mehr auf ihre Host-Wand zugreifen. In Abb. 2 sind zwei verschiedene Commits desselben Revit-Modells zu sehen. Das Modell besteht aus drei Wänden mit jeweils einer Tür. Während im Commit A die mittlere Wand zusammen mit ihrer Tür an den Server gesendet wird, wird im Commit B die mittlere Tür ohne ihre Host-Wand versendet. Somit kann die mittlere Tür ihre Host-Wand im Commit B nicht referenzieren und wird beim Empfangen von Commit B in eine alte Modellversion nicht in das Modell eingefügt.

Bei der Analyse der JSON-Daten, die die Connectors im Zuge der jeweiligen Versuche erstellen, fällt auf, dass der Datenaustausch stets mittels vollständiger Speckle-Objekte realisiert wird. Auch wenn sich nur ein einziger Attributwert eines Objekts ändert (z.B. die x-Koordinate beim Verschieben), erstellt und versendet der jeweilige Connector ein völlig neues Speckle-Objekt. Was Datenredundanz angeht, existiert hier also noch Optimierungspotenzial.

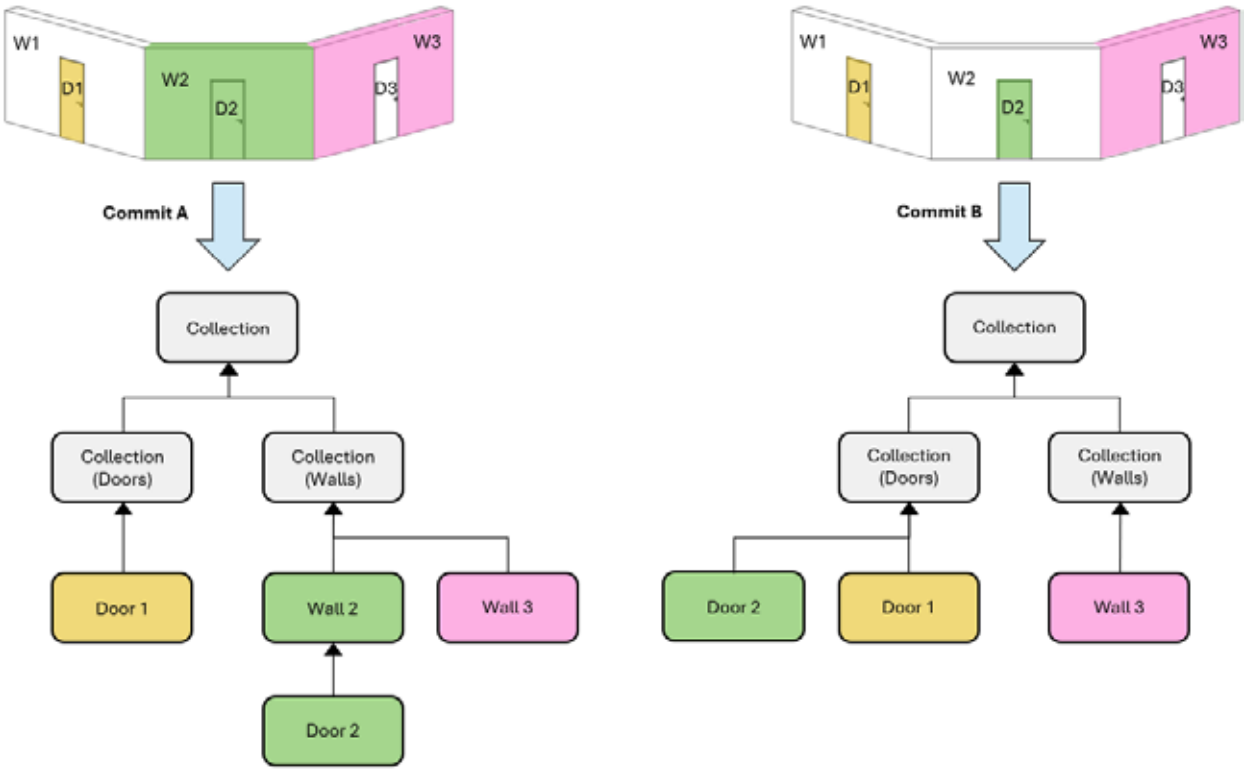


Abb. 2: Hier sind der hierarchische Aufbau der Commits und Speckles strikte Trennung in „Collections“ am Beispiel von zwei verschiedenen Commits desselben Revit-Modells dargestellt. Die in den Commits enthaltenen Objekte sind farblich markiert. [6]

Fazit und Ausblick

Speckle bietet großes Potential hinsichtlich Versionskontrolle und Datenmanagement von Gebäudemodellen und ist auf dem Weg, ein Versionskontrollsystem für BIM-Modelle zu werden. Inkremente, wie das Verschieben oder Einfügen von Host-Bauteilen, lassen sich intuitiv mittels Speckle von einem digitalen Gebäudemodell zum nächsten übertragen. Auch das Übermitteln veränderter Bauteilabmessungen funktioniert gut. Jedoch bestehen derzeit noch Limitationen beim Versenden von Inkrementen, die ausschließlich Hosted Objects wie Türen betreffen und nicht deren Host Objects. Zudem ist das Entfernen von Bauteilen aus einem Gebäudemodell bisweilen nicht intuitiv.

Um die derzeitigen Limitationen in Speckles Datenstruktur zu überwinden, könnten sich zukünftige Arbeiten mit dem hierarchischen Aufbau der Speckle-Commits und deren strikter Trennung von Bauteilgruppen befassen.

In [6] wurde basierend auf den Ergebnissen dieser Bachelorarbeit bereits ein verbessertes Datenmodell vorgestellt, das die stark vernetzte Natur von BIM-Modellen mithilfe von Labeled Property Graphs versucht abzubilden. Die einzelnen Objekte einer Bauteilgruppe sind hier nicht von Objekten anderer Gruppen getrennt, sondern können diese mithilfe von teils als virtuell markierten Kanten referenzieren.

Langfristig spielt Speckle möglicherweise eine wesentliche Rolle bei der Automatisierung von BIM-Prozessen, wenn die oben genannten Herausforderungen adressiert werden.

Einsatz von KI-Werkzeugen

Der Autor verwendete ChatGPT zur sprachlichen Überarbeitung dieser Kurzfassung. Anschließend überprüfte er den Textinhalt sorgfältig und übernimmt die volle Verantwortung dafür. Die Bachelorarbeit selbst wurde ohne den Einsatz von KI-Werkzeugen angefertigt.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1]: Schapke, S.-E., Beetz, J., König, M., Koch, C., & Borrmann, A. (2021). Prinzipien und Techniken der modellgestützten Zusammenarbeit. In A. Borrmann, M. König, C. Koch & J. Beetz (Hrsg.), Building Information Modeling, 309–333. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-33361-4_15

[2]: Oh, M., Lee, J., Hong, S. W., & Jeong, Y. (2015). Integrated system for BIM-based collaborative design. Automation in Construction, 58, 196–206. https://doi.org/10. 1016/j.autcon.2015.07.015

[3]: Esser, S., Vilgertshofer, S., & Borrmann, A. (2022). Graph-based version control for asynchronous BIM collaboration. Advanced Engineering Informatics, 53. https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101664

[4]: Firmenich, B., Koch, C., Richter, T., & Beer, D. (2005). Versioning structured object sets using text based Version Control Systems. Proceedings of the 22nd CIB-W78 Conference on Information Technology in Construction, 105–112.

[5]: Preidel, C., Borrmann, A., Exner, H., & König, M. (2021). Common Data Environment. In A. Borrmann, M. König, C. Koch & J. Beetz (Hrsg.), Building Information Modeling, 335–351. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-33361-4_16

[6]: Dietmair, K., Esser, S., Harder, B. (2024). Incremental model updates in BIM: a critical analysis of the collaboration platform Speckle. Tagungsband zum 35. Forum Bauinformatik 2024, 276–283. http://dx.doi.org/10.15480/882.13542

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (Hrsg.). (2021). Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-33361-4
2. Esser, S., Vilgertshofer, S., & Borrmann, A. (2022). Graph-based version control for asynchronous BIM collaboration. Advanced Engineering Informatics, 53. https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101664
3. Poinet, P., Stefanescu, D., & Papadonikolaki, E. (2020). Collaborative Workflows and Version Control Through Open-Source and Distributed Common Data Environment. Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, 228–247.

Autor

Seit 04/2024:	Masterstudium des Bauingenieurwesens, TUM
Seit 11/2021:	Studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Computing and Building Engineering, TUM
07/2024 – 12/2024:	Auslandssemester an der Universität Stellenbosch, Südafrika
10/2020 – 03/2023:	Bachelorstudium des Bauingenieurwesens, TUM
07/2020:	Allgemeine Hochschulreife, Gymnasium bei St. Anna Augsburg

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Computing and Building Engineering an der TUM School of Engineering and Design. Betreuer der Arbeit waren Prof. Dr.-Ing. André Borrmann und Dr.-Ing. Sebastian Esser.

Die Arbeit wird mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNG DER KLIMA(WANDEL)PERFORMANZ VON MEHRFAMILIENHÄUSERN

Masterarbeit

Josef Eichinger

In der Studie wird die nach Mayer [1] definierte Klima- und Klimawandelperformanz von Mehrfamilienhäusern anhand zweier Fallbeispiele untersucht, einem Altbau in Ziegelbauweise und einem Neubau in Holz-Beton-Hybridbauweise. Mithilfe thermisch-energetischer Gebäudesimulationen und Matlab-Berechnungen wird die jährliche Nutzungszeit mit behaglichen Innenraumtemperaturen ohne haustechnische Eingriffe (Klimaperformanz) untersucht. Außerdem werden Dauer und Intensität der Zeiträume außerhalb des Komfortbereichs analysiert. Die Ergebnisse verdeutlichen die Auswirkungen der globalen Erwärmung auf den Innenraumkomfort. Während der Heizbedarf im Winter signifikant sinkt, steigt das Risiko sommerlicher Überhitzung, insbesondere beim Neubau. Dabei wird der wesentliche Einfluss der Bauweise und der damit verbundenen thermischen Speicherkapazität deutlich. Um Gebäude in München langfristig behaglich und gesundheitlich unbedenklich zu erhalten, sind Anpassungsstrategien erforderlich. Im Bestand werden zusätzliche bauliche Maßnahmen wie ein verbesserter Sonnenschutz notwendig. Bei Neubauten muss als Design-Kriterium in der Entwurfsphase auf eine ausreichend hohe Wärmespeicherkapazität des Gebäudes geachtet werden.

Keywords: Klimagerechtes Bauen, Klimawandelanpassung, Wohnkomfort, Bauweisen

Einleitung

Gemeinnützige Wohnungsunternehmen leisten einen wichtigen Beitrag zur Sicherung bezahlbaren Wohnraums in München. Zugleich stellt sich die Frage, wie sich auch künftig bezahlbares und komfortables Wohnen ermöglichen lässt. Welche Auswirkungen hat der Klimawandel auf die Behaglichkeit der Wohnräume? Mit welchen konstruktiven Maßnahmen kann den Folgen des Klimawandels begegnet werden? Welche Strategien traditioneller und moderner Bauweisen eignen sich auch in Zukunft für nachhaltiges Wohnen?

Ausgehend von diesen Fragestellungen untersucht die Arbeit, wie sich die globale Erwärmung auf den thermischen Komfort in Wohnungen einer städtischen Wohnbaugesellschaft auswirkt. Im Fokus steht die sogenannte Klima- bzw. Klimawandelperformanz – definiert als jene Nutzungszeit, in der unter heutigen bzw. zukünftigen Klimabedingungen ohne den Einsatz aktiver Heiz- oder Kühltechnik ein behagliches Raumklima herrscht [1]. Konkret werden die Klima(wandel)performanzen repräsentativer Münchner Mehrfamilienhäuser untersucht: einem historischen Ziegelbau von 1928 (teilsanierter Altbau)

und einem Holz-Beton-Hybrid-Neubau von 2019. Zudem wird der Einfluss der Bauweise auf die Fähigkeit zur Klima(wandel)anpassung untersucht.

Methodik

In einem ersten Schritt werden thermisch-energetische Gebäudesimulationen mit der Software IDA ICE 5.0 durchgeführt. Jedes Fallbeispiel wird unter aktuellen und zukünftigen Klimabedingungen untersucht. Das aktuelle Klima wird anhand des Testreferenzjahres (TRY) 2015 [2] simuliert. Die zukünftigen Klimabedingungen mit Daten aus Meteonorm beziehen sich auf Prognosejahre im Emissionsszenario RCP 4.5 des Weltklimarates (IPCC) [3]. Bei diesem Szenario wird von einer mittleren Entwicklung der Emissionen ausgegangen, welche Hausfather et al. zufolge als am wahrscheinlichsten gilt [4]. Die thermisch-energetischen Simulationen liefern Zeitreihen der operativen Temperaturen für die untersuchten Klimaszenarien, die insbesondere einen Temperaturanstieg in zukünftigen Klimabedingungen aufzeigen.



Abb. 1: Links: Fallbeispiel 1, Altbau von 1928, Ziegelbau (Bildquelle: Google Maps); Rechts: Fallbeispiel 2, Neubau, Holz-Beton-Hybridbau (Bildquelle: Rapp Architekten)

Untersucht wird einerseits ein teilsanierter Ziegelbau von 1928 mit massiven Vollziegelwänden und Holzbalkendecken (Geb. 1, Abb. 1 links), bei dem aus Denkmalschutzgründen bisher nur die Fenster und Putzschichten erneuert wurden. Die Bauweise ist typisch für einen wesentlichen Teil des Münchner Gebäudebestands [5]. Das zweite untersuchte Gebäude repräsentiert eine moderne Holz-Beton-Hybridbauweise mit Verbunddecken und einer vorwiegend skelettartigen Tragstruktur mit leichten, nichttragenden Außen- und Innenwänden [6]. Der Neubau weist im Vergleich zum Altbau deutlich niedrigere U-Werte, eine geringere Kompaktheit und einen deutlich höheren Fensterflächenanteil auf. Um den Einfluss der Bauweise zu ermitteln, wird zusätzlich zu den Gebäudemollen der Fallbeispiele ein weiterer, hypothetischer Fall untersucht: Dabei wird das Modell des Neubaus mit Innenwänden in Ziegelbauweise aufgesetzt. Dadurch kann der Einfluss der Wärmespeicherkapazität als einzig veränderlicher Parameter analysiert werden. Bei der Konzeption der Innenwände in Ziegelbauweise ist die thermische Speicherkapazität in etwa anderthalbmal so groß wie bei den Leichtbauwänden der Holz-Beton-Hybridbauweise und variiert somit wesentlich.

Im zweiten Analyseschritt werden auf Grundlage der ermittelten Temperatur-Zeitreihen über Berechnungen in Matlab Klima(wandel)performanzen nach Mayer [1] sowie Unter- und Übertemperaturgradstunden berechnet. Die ermittelten Raumtemperaturen werden dabei mit definierten Komfortstandards abgeglichen. Zugrunde gelegt werden die DIN EN 16798-1:2022-03 und der ASHRAE Standard 55-2020, wobei nach ASHRAE deutlich größere Temperaturbereiche als komfortabel definiert sind als nach DIN.

Die Klimaperformanz (KLP) gibt den Anteil in [%] an der Nutzungsdauer an, in der die operative Raumtemperatur innerhalb der definierten Komfortgrenzen liegt, ohne dass haustechnische Eingriffe (Heizung, Kühlung) notwendig sind [1]. Die Klimawandelperformanz bezieht sich auf zukünftige Klimabedingungen. Die KLP wird mit nachfolgender Formel berechnet [1]:

$$KLP = \frac{\sum_i^{t_n} (t_{i,op=komf,op.})}{t_{n,ges}} \cdot 100\ [\%] \qquad (1)$$

KLP = Klimaperformanz [%]; 100 [%] als bestmöglicher Wert
$t_{i,op=komf,op.}$ = Nutzungsdauer, in der die vorhandene operative Innenraumtemperatur innerhalb der Komfortgrenzen liegt;
$t_{n,ges}$ = gesamte Nutzungsdauer.

Die ermittelten Unter- und Übertemperaturgradstunden mit der Einheit [Kh] berücksichtigen neben der Dauer in Stunden auch die Intensität einer Temperaturabweichung von Komfortgrenzen in Kelvin und werden über ein Jahr ermittelt [1].

Ergebnisse

Die KLP der Gebäude steigt in den zukünftigen Klimaszenarien insgesamt an. Der Neubau (Geb. 2, in Abb. 2-6 dunkelblau) weist höhere KLP-Werte auf als der Altbau (Geb. 1, in Abb. 2-6 hellblau). Signifikante Unterschiede ergeben sich zudem aus dem gewählten Komfortstandard. Abb. 2 stellt die KLP-Werte gegenüber.

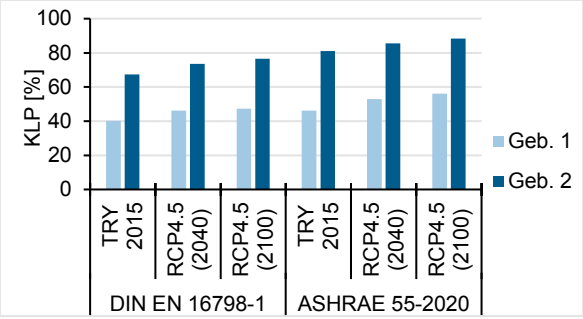


Abb. 2: Vergleich KLP nach Komfortstandard u. Klimaszenario

Betrachtet man den Jahresverlauf der KLP, so sind die Unterschiede zwischen Alt- und Neubau in den Wintermonaten besonders ausgeprägt: Im Gegensatz zum Altbau werden im Neubau im Zeitraum von November bis März noch teilweise behagliche Zustände erreicht (Abb. 3, Abb. 4). Im zukünftigen Szenario (Abb. 4) verkürzen bzw. verringern sich die Zeiten mit niedrigen KLP-Werten. In den Sommermonaten fällt auf, dass der Altbau höhere Performanzen erzielt als der Neubau.

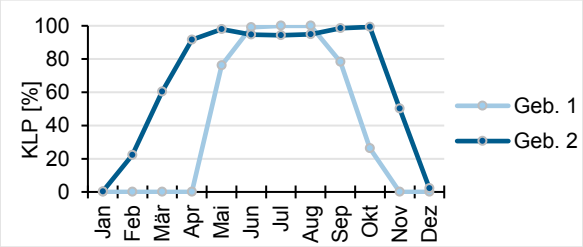


Abb. 3: Vergleich des KLP-Jahresverlaufs der Fallbeispiele für das Klimaszenario TRY 2015, Komfort DIN EN 16798-1

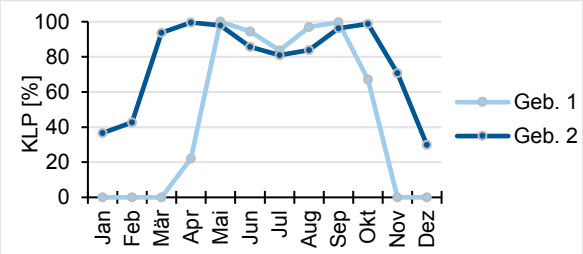


Abb. 4: Vergleich des KLP-Jahresverlaufs der Fallbeispiele für das Klimaszenario RCP4.5 (2100), Komfort DIN EN 16798-1

Die Reduktion der Untertemperaturgradstunden um bis zu 30% (Altbau) bzw. um über 50% (Neubau) deutet auf einen signifikant sinkenden Heizbedarf hin (Abb. 5). Im Sommer nehmen hingegen in beiden Gebäuden die Übertemperaturgradstunden zu (Abb. 6) und lassen auf verstärkte Raumüberhitzungen schließen. Beim Neubau ist dieser Anstieg und damit das Überhitzungsrisiko um ein Vielfaches stärker ausgeprägt.

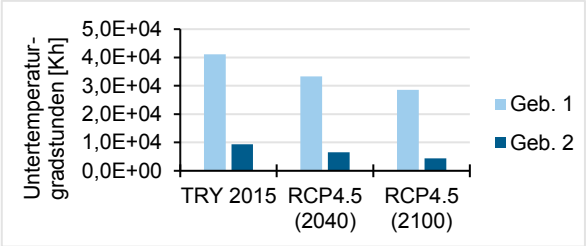


Abb. 5: Vergleich der Untertemperaturgradstunden (Indikator Heizbedarf) nach Klimaszenario, Komfort n. DIN EN 16798-1

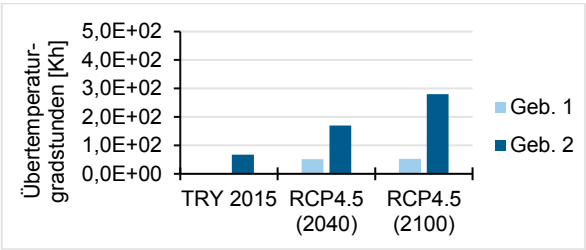


Abb. 6: Vergleich der Übertemperaturgradstunden (Indikator Überhitzung) n. Klimaszenario, Komfort n. DIN EN 16798-1

Der Einfluss der Bauweise ergibt sich aus dem Vergleich der Neubaumodelle mit unterschiedlicher Ausführung der Innenwände. s ist ein merklicher Einfluss der Bauweise auf die KLP erkennbar (Abb. 7). Die Ziegelbauweise (in Abb. 7-9 rot) führt zu geringeren Unter- und Übertemperaturgradstunden. Folglich ist sowohl der Heizbedarf als auch das Überhitzungsrisiko geringer als bei der Holz-Beton-Hybridbauweise (Abb. 8, Abb. 9), was auf die deutlich höhere Wärmespeicherkapazität der Ziegelbauweise zurückzuführen ist.

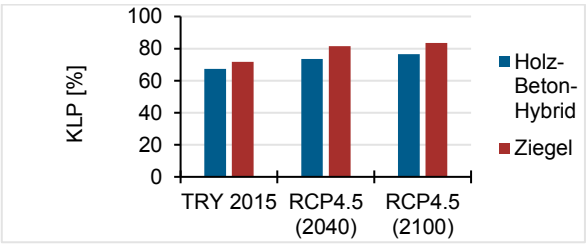


Abb. 7: Vergleich der KLP je Bauweise u. Klimaszenario, Komfort nach DIN EN 16798-1

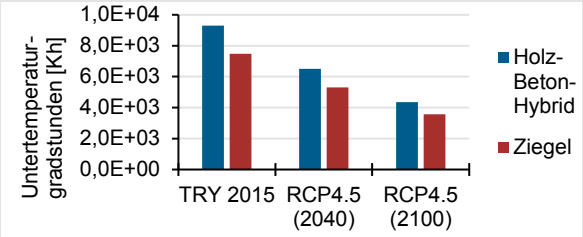


Abb. 8: Untertemperaturgradstunden (Indikator Heizbedarf) je Bauweise u. Klimaszenario, Komfort nach DIN EN 16798-1

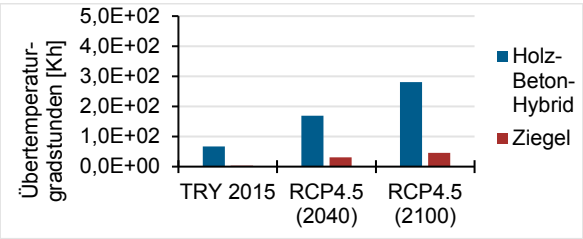


Abb. 9: Übertemperaturgradstunden (Indikator Überhitzung) je Bauweise und Klimaszenario, Komfort nach DIN EN 16798-1

Diskussion

Bei der Erstellung der Gebäudemodelle wurden für fehlende Informationen sowie für das Nutzerverhalten sinnvolle Annahmen getroffen. Daher ist eine Plausibilitätsprüfung der erstellten Modelle erforderlich. Diese erfolgte durch einen Abgleich mit Daten der Wohngebäudetypologie [7], wobei die Modelle anhand von Vergleichsrechnungen zum Energiebedarf validiert wurden. Auch bei den Klimaszenarien muss berücksichtigt werden, dass diese auf Annahmen über globale, politische, wirtschaftliche und soziale Entwicklungen beruhen.

Die KLP variiert in Abhängigkeit des berücksichtigten Behaglichkeitsstandards. Diese Normen spiegeln länder- und kulturspezifische Unterschiede wider, sodass sich die Ergebnisse nur bedingt auf andere Kulturkreise übertragen lassen.

Außerdem ist die untersuchte KLP nur ein Parameter für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäudearchitektur. Andere Aspekte, wie Ökologie, Baukultur, Nutzungsflexibilität, Dauerhaftigkeit oder Lebenszykluskosten, werden bei der KLP nicht berücksichtigt. Auch diese Aspekte müssen in eine gesamtheitliche Gebäudeplanung einfließen.

Fazit

Die Studie zeigt, dass sich die operativen Temperaturen und damit die Behaglichkeit sowie die KLP in den untersuchten Mehrfamilienhäusern in München infolge der globalen Erwärmung signifikant verändern.

Die KLP steigt in zukünftigen Klimaszenarien, d.h. für behagliche Innentemperaturen sind seltener aktive haustechnische Eingriffe notwendig. Dies ist primär auf mildere Winter- und Übergangsmonate sowie insgesamt steigende Durchschnittstemperaturen zurückzuführen. Sinkende Untertemperaturgradstunden weisen auf einen zukünftig reduzierten Heizbedarf hin. Gleichzeitig nehmen sommerliche Überhitzungen zu, wobei die Bauweise einen wesentlichen Einfluss hat. Die Untersuchungen zeigen, dass ein Holz-Beton-Hybridbau deutlich mehr überhitzt und damit unbehaglicher ist als ein teilsanierter Altbau in Ziegelbauweise oder ein vergleichbarer Neubau mit massiven Ziegelinnenwänden.

Die Arbeit verdeutlicht, dass im Bestand zusätzliche bauliche Maßnahmen wie verbesserte Sonnenschutzmaßnahmen oder Kühlmöglichkeiten unter zukünftigen klimatischen Bedingungen notwendig sein werden. Zudem sollte bei Neubauten auf eine ausreichende Wärmespeicherkapazität geachtet werden, welche es als Design-Kriterium in der Entwurfsphase durch die Wahl der Baustoffe und Bauweisen zu berücksichtigen gilt. Bereits heute müssen daher Strategien entwickelt werden, um bezahlbare Wohnungen in München langfristig behaglich und gesundheitlich unbedenklich zu erhalten.

An diese Arbeit anschließende Untersuchungen sollten sich mit weiterführenden Sanierungsmaßnahmen befassen, z.B. dem Einfluss weiterer Sonnenschutzmaßnahmen oder unterschiedlicher nachgerüsteter Außenwanddämmung, um den Gebäudebestand auf die sich verändernden Klimabedingungen anzupassen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1]: Mayer, A. (2022): Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Klima- und Kulturperformanz von Gebäuden unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit. Dissertation. TU München, München.

[2]: DWD (Hg.) (2017): Handbuch Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Offenbach.

[3]: Remund, J.; Müller, S.; Schmutz, M.; Barsotti, D.; Graf, P.; Cattin, R. (2023): Meteonorm 8. Handbook part I: Software, Version 8.2.

[4]: Hausfather, Z.; Peters, G. (2020): Emissions - the 'business as usual' story is misleading. In: Nature 577 (7792), S. 618–620.

[5]: Pfister, R.; Schön, M. (1930): Die fünf großen Siedlungen der Gemeinnützigen Wohnungsfürsorge AG München. In: Baukunst 6. Jahrgang, S. 163-203.

[6]: Hafner, A.; Seidel, A. (2020): Wohnquartier in Holz. Mustersiedlung in München. 1. Auflage. München: Detail Business Information (DBU Bauband, 4).

[7]: Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R. (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. 2., erw. Aufl. Darmstadt: IWU.

Autor

Josef Eichinger, M. Eng.

Laufbahn akademisch:

2013-2016	Duales Studium B. Eng. Bauwesen – Fassadentechnik, DHBW Mosbach
2017-2021	Berufsbegleitendes Studium M. Eng. Wirtschaftsingenieurwesen, AKAD Stuttgart
2022-2025	Masterstudium M. Sc. Bauingenieurwesen, TU München

Laufbahn beruflich:

2013-2016	Dual Studierender, Lindner Fassaden, Arnstorf
2016-2021	Konstrukteur/ Projektkoordinator, Lindner Fassaden, Arnstorf, Dubai, Dettelbach
2021-2024	Fachplaner Architektur, Coplan AG, Eggenfelden
Seit 2024	Wissenschaftlicher Mitarbeiter TU München (Teilzeit)
Seit 2025	Projektingenieur, BCI, Freising (Teilzeit)

Betreuerin

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Bauphysik, School of Engineering and Design, der TU München, Professor Sedlbauer, Betreuerin: Dr.-Ing. Anica Mayer

Die Arbeit wird mit dem 1. Preis ausgezeichnet.

OPTIMIERUNG OFFENPORIGER ASPHALTE FÜR GEH- UND RADWEGBEREICHE UNTER DEM ASPEKT DER SCHWAMMSTADT

Masterarbeit

Anna Fautz

Starkregen- und Hitzeereignisse stellen eine große Problematik in Städten dar. Um den Auswirkungen von Extremwetterereignissen entgegenzuwirken, wird in einigen Städten das Schwammstadtkonzept angewendet. Im Rahmen der Arbeit wurde untersucht, inwieweit auch Offenporige Asphalte einen Beitrag für die Umsetzung der Schwammstadt leisten können. Es wurde eine Empfehlung für die Anwendung von Offenporigen beziehungsweise Versickerungsfähigen Verkehrsflächen in Asphaltbauweise im Geh- und Radwegbereich unter Berücksichtigung des Schwammstadtkonzepts und der vorhandenen Randbedingungen erarbeitet. Dafür wurde im Asphaltlabor ein optimierter Offenporiger Asphalt entwickelt, welcher bestimmte Zielsetzungen erfüllt.

Keywords: Schwammstadt, Offenporiger Asphalt, Versickerungsfähige Verkehrsflächen, Starkregen, Nachhaltige Stadtentwicklung

Notwendigkeit von Schwammstädten

Die wichtigste Ursache für die extremen Auswirkungen des Klimawandels in Städten ist der hohe Versiegelungsgrad. Versiegelte Asphalt- und Betonflächen heizen sich stark auf und aufgrund fehlender Grünflächen entstehen keine Kühlungseffekte [1]. Durch die dichte Bebauung und wasserundurchlässige Flächen kann das Regenwasser weder zurückgehalten noch versickert werden. Zusätzlich werden Misch- und Regenwasserkanäle bei Starkregen überlastet. Dies führt zu innerstädtischen Sturzfluten, welche erhebliche Zerstörungen anrichten. Die Hitzeextreme und Überflutungskatastrophen in städtischen Gebieten sind zwei wichtige Gründe, warum ein Umdenken in der urbanen Planung notwendig ist. Ein möglicher Ansatz ist dabei das Schwammstadtkonzept [2]. Dabei werden neben der Entsiegelung von Flächen und der Förderung der dezentralen Versickerungen auch weitere Aspekte berücksichtigt, wie beispielsweise die ökologische Vielfalt in Städten und die Weiterverwendung von Abwasser.

Prinzipien der Schwammstadt

Zur Erklärung des Schwammstadtkonzepts kann das Bild eines Schwamms (vgl. Abb. 1) unter einer Stadt sehr wörtlich erklärt werden: Bei Regen saugt sich der Schwamm voll und bei Trockenheit und Hitze verdunstet das Wasser aus dem Schwamm wieder. Somit wird in Schwammstädten der natürliche Wasserkreislauf von Verdunstung, Versickerung und Abfluss erhalten.

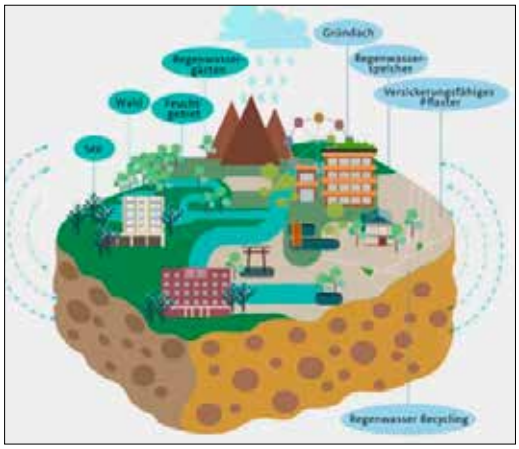


Abb. 1: Schwammstadt [3]

Dabei setzt sich das Konzept der Schwammstadt aus vielen Prinzipien zusammen. Zu den Prinzipien der Schwammstadt gehört die dezentrale Versickerung von anfallendem Regenwasser, sowie der Rückhalt von Wassermassen bei Starkregen, um den Oberflächenabfluss zu vermindern und Sturzfluten zu vermeiden. Darüber hinaus soll Niederschlagswasser gespeichert und vor Ort wiederverwendet werden. Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Schwammstadtkonzepts ist die Verdunstung des gespeicherten Wassers vor Ort.

Das Schwammstadtkonzept im Straßenraum

Die bereits genannten Aspekte des Schwammstadtkonzepts sind stark miteinander vernetzt und können nur in gegenseitiger Beziehung betrachtet werden [4]. Bezogen auf den Straßenraum führen Verkehrsflächen zu einer Versiegelung und widersprechen damit den Prinzipien der Schwammstadt. Dennoch sind Verkehrsflächen im städtischen Raum notwendig, um Verkehr und Mobilität zu ermöglichen. Um den Straßenraum möglichst gut in das Schwammstadtkonzept einzupassen, stellen Offenporige und Versickerungsfähige Verkehrsflächen, welche Straßenoberflächen-wasser versickern, rückhalten und verdunsten, eine vielversprechende Maßnahme dar.

Anwendungsschema

Im Rahmen der Arbeit wurden verschiedene Möglichkeiten untersucht und betrachtet inwieweit Offenporige und Versickerungsfähige Verkehrsflächen mit Offenporigem Asphalt in das Schwammstadtkonzept eingebunden werden können. Dabei werden folgende Bezeichnungen definiert und unterschieden: **Offenporige Verkehrsfläche** = Offenporige Asphaltbauweise auf einer Abdichtung; **Versickerungsfähige Verkehrsfläche** = Offenporige Asphaltbauweise mit Versickerung durch die Verkehrsfläche in den Untergrund. In einem Anwendungsschema werden in zwei Schritten verschiedene Randbedingungen berücksichtigt, um zu einem passenden Geh- bzw. Radweg-Aufbau zu gelangen. Zunächst werden die Auswirkungen des Boden- und Gewässerschutzes und die Versickerungsfähigkeit des Baugrunds berücksichtigt. Außerdem geht die Belastung der Verkehrsfläche mit in die Beurteilung ein. Im zweiten Schritt wird berücksichtigt, ob der Geh- und Radweg an eine weitere Bebauung angrenzt und somit eine Versickerung durch die Verkehrsfläche notwendig wird. Je nach Ausbildung des Wegeaufbaus kommen unterschiedliche Querschnitte zur Anwendung. In den Abbildungen 4 und 5 sind zwei mögliche Querschnitte für Geh- und Radwege abgebildet. Die verschiedenen Wegeaufbauten werden hinsichtlich der Umsetzung der bereits genannten Schwammstadt-Prinzipien bewertet. So ermöglicht beispielsweise der Offenporige Asphalt den Rückhalt und die Speicherung des Niederschlagswassers in der Asphaltschicht. Im Anschluss kann das gespeicherte Wasser bei

Hitze wieder aus der offenporigen Asphaltstruktur verdunsten. Bei Versickerungsfähigen Verkehrsflächen kann Niederschlagswasser unter der Verkehrsfläche versickern. Es zeigt sich, dass durch die verschiedenen Anwendungen die Schwammstadt-Prinzipien jeweils unterschiedlich effektiv umgesetzt werden. Insbesondere die Prinzipien Versickerung, Rückhalt und Verdunstung können durch die Anwendung von Offenporigen oder Versickerungsfähigen Verkehrsflächen besser realisiert werden als mit dichten Verkehrsflächen, da die Verkehrsflächen selbst zur Umsetzung des Schwammstadt-konzepts herangezogen werden.

Asphaltkonzeption

Mithilfe von Prüfungen im Asphaltlabor wurde ein Mischgut ermittelt, welches für den optimierten Einsatz in Offenporigen und in Versickerungsfähigen Verkehrsflächen im Geh- und Radwegbereich geeignet ist. Das Asphaltmischgut soll gleichermaßen auf Offenporigen und Versickerungsfähigen Verkehrsflächen eingesetzt werden. Meist sind die Anforderungen nach dem Merkblatt für Versickerungsfähige Verkehrsflächen [5] als Zielwerte maßgebend.





Abb. 2 und 3: Offenporiger Asphalt für Offenporige bzw. Versickerungsfähige Verkehrsflächen

Das Mischgut soll folgende Zielsetzungen erfüllen:

- Möglichst einfache und kostengünstige Bauweise
- Angemessene Oberflächenbeschaffenheit für den Einsatz in Geh- und Radwegen
- Verwendung möglichst kostengünstiger Materialien
- Ausreichende Dauerhaftigkeit für den Einsatz in Geh- und Radwegen
- Möglichst großer Hohlraumgehalt, um die Wasserdurchlässigkeit und den Wasser-rückhalt im Asphalt zu ermöglichen
- Möglichst ressourcenschonende Bauweise durch den Einsatz von Recycling-Material

Um die jeweiligen Zielsetzungen zu prüfen, wurden verschiedene Laborprüfungen mit möglichen Asphaltmischungen durchgeführt. So wurde unter anderem der Kornverlust, der Hohlraumgehalt und die Wasserdurchlässigkeit geprüft. Es wurden insgesamt fünf Mischgutvarianten erstellt, welche unterschiedliche Sieblinien, Bindemittel und Asphaltgranulate enthalten. Nach der Erstellung der jeweiligen Mischgutvariante wurden Laborprüfungen durchgeführt, um zu überprüfen, ob die Zielsetzungen erreicht werden. Je nach Ergebnissen der Laborprüfungen wurden das weitere Vorgehen und die weiteren Mischgutvarianten angepasst. Die Mischgutvariante, welche die Zielsetzungen am besten abbildet, stellt ein optimiertes Asphaltmischgut in Anlehnung an den PA 11 TD WDA mit Asphaltgranulat dar.

Fazit

Es ist zu berücksichtigen, dass bisher keine Bewertungen der Langzeitauswirkungen auf das Asphaltmischgut stattgefunden haben und dass der Asphalt nicht im Baustellenbetrieb eingesetzt wurde. Dennoch wird das Fazit getroffen, dass Offenporige und Versickerungsfähige Verkehrsflächen in Asphaltbauweise als mögliche Maßnahmen zur Umsetzung des Schwammstadtkonzepts berücksichtigt werden sollten. Die Offenporige Asphaltstruktur und die Versickerung unter der Verkehrsfläche ermöglichen zusätzliche Verdunstung, Rückhalt und Versickerung, sodass städtische Hitze- und Starkregenereignisse abgeschwächt werden können.

Je nach Randbedingungen müssen verschiedene Ausbildungen der Offenporigen beziehungsweise Versickerungsfähigen Verkehrsflächen im Geh-

und Radwegbereich eingesetzt werden. Dabei stellt die Verwendung des optimierten Asphaltmischguts PA 11 TD WDA mit SBB 70/100 und 15 M.-% Asphaltgranulat eine effektive Möglichkeit dar, um die Schwammstadt-Prinzipien auf Offenporigen oder Versickerungsfähigen Verkehrsflächen umzusetzen.

Beim Bau von Offenporigen und Versickerungsfähigen Verkehrsflächen muss jedoch berücksichtigt werden, dass Reinigung, Winterdienst und Instandhaltung angepasst stattfinden müssen. Durch die Offenporige Bauweise können langfristig durchaus Kosten gespart werden, indem Kosten für die Entwässerung verringert werden und hohe Kosten durch Schäden infolge von Starkregen und Hitze vermindert werden können.

Es ist eine Tatsache, dass Hitze und Starkregen große urbane Probleme darstellen, welche aufgrund des Klimawandels in den nächsten Jahren an Häufigkeit und Ausmaß zunehmen werden [2]. Um den Folgen dieser Klimaextreme in Städten entgegenzuwirken, wird es unumgänglich das Schwammstadtkonzept anzuwenden. Aufgrund der Verknüpfungen und Zusammenhänge der einzelnen Schwammstadt-Prinzipien untereinander, müssen alle möglichen Maßnahmen berücksichtigt werden. Deshalb soll im Straßenraum, insbesondere im Geh- und Radwegbereich, die Anwendung Offenporiger und Versickerungsfähiger Verkehrsflächen mit optimiertem Offenporigem Asphalt berücksichtigt werden. Im Rahmen der Arbeit wurden Anwendungsmöglichkeiten erarbeitet und eine mögliches Asphaltmischgut konzipiert und untersucht. Für die Baupraxis ist es im Folgenden relevant, dass die Ergebnisse der Arbeit weiter untersucht werden und durch den Einbau des Asphaltmischguts auch die praktische Umsetzbarkeit der erarbeiteten Konzepte untersucht wird.

Alle Disziplinen der Stadtplanung müssen ihren Beitrag dazu leisten, dass die Auswirkungen von Hitze- und Starkregenereignisse begrenzt werden. Nur so können Städte auch in Zukunft lebenswert bleiben.

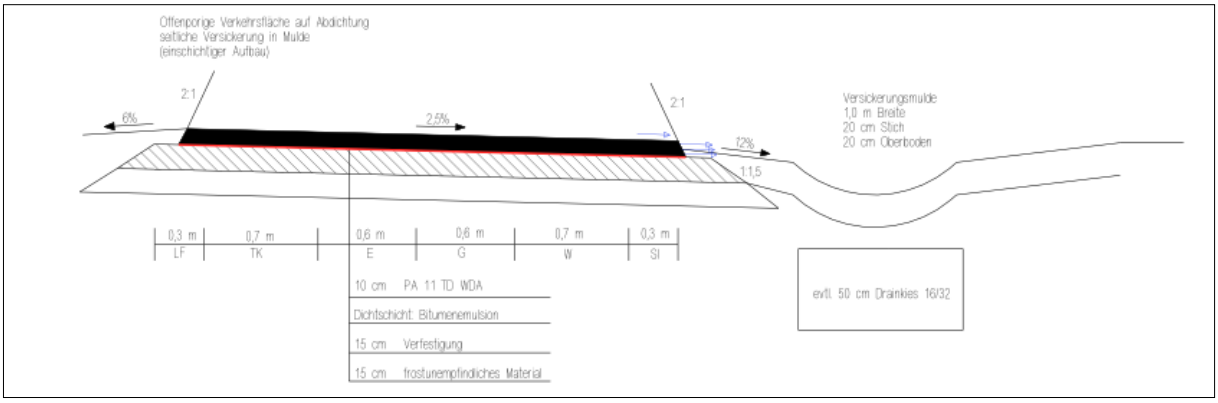


Abb. 4: Offenporige Verkehrsfläche auf einer Abdichtung mit seitlicher Versickerung in eine Mulde

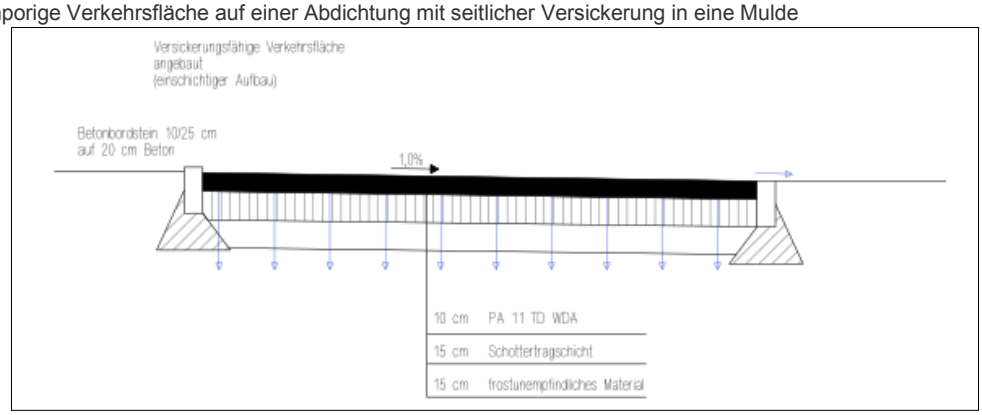


Abb. 5: Versickerungsfähige Verkehrsfläche, angebaut

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1]: Scheub, U. & Schwarzer, S. (2023). Aufbäumen gegen die Dürre. Wie uns die Natur helfen kann, den Wassernotstand zu beenden. München: oekom verlag.

[2]: Sustainable Bavaria (2024). Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr. Referat Öffentlichkeitsarbeit (Hrsg.). Sustainable Bavaria. Unsere Handlungsfelder. München: Abteilung 2: Recht, Planung und Bautechnik.

[3]: Das Erste (2021). Wissen vor acht. Die Schwammstadt. Verfügbar unter: *https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/klima/schwammstadt-klimawandel-regenwasser-104.html#footer_list_pkt1*.

[4]: Stricker, M., Schmid, C. & Bätz, N. (2022). Starkregenereignisse in der wissenschaftlichen Forschung. In: H. Runge (Hrsg.). Herausforderungen Regenwasser 2021-2022 (S. 28-32). Essen: Vulkan-Verlag GmbH.

[5]: M VV (2013). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Kommission „Kommunale Straßen“ (Hrsg.). Merkblatt für Versickerungsfähige Verkehrsflächen. Köln: FGSV Verlag.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Borgwardt, S., Gerlach, A. & Köhler, M. (2000). Versickerungsfähige Verkehrsflächen. Anforderungen, Einsatz und Bemessung. Berlin: Springer-Verlag.
2. M VV (2013). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Kommission „Kommunale Straßen“ (Hrsg.). Merkblatt für Versickerungsfähige Verkehrsflächen. Köln: FGSV Verlag.
3. Tippmann, T. (2019). Raincycling. Transformation der Barker Kaserne zu einem Schwammstadt Quartier. München: Technische Universität München.

Autorin

Studium:

Oktober 2018 – Juli 2022:	Bachelorstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg
Oktober 2022 – Juni 2024:	Masterstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg

Berufserfahrung:

März 2022 – Juli 2022:	Werkstudententätigkeit im Ingenieurbüro Stegbauer
Oktober 2020 – Juli 2023:	Studentische Hilfskraft im Fach Ingenieurgeologie und Bodenmechanik an der OTH Regensburg
Seit Oktober 2024:	Ingenieurin bei der Institut Dr.-Ing. Gauer Ingenieurgesellschaft mbH

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät Bauingenieurwesen im Labor für Straßenbau und Asphalttechnologie an der OTH Regensburg.
Betreuer der Arbeit ist Prof. Dipl.-Ing. Andreas Appelt und Zweitprüfer ist Prof. Dipl.-Ing. Andreas Ottl.

Die Arbeit wird mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

REDUKTION DES TREIBHAUSPOTENTIALS UND RESSOURCENVERBRAUCHS VON HOCHBAUPROJEKTEN DURCH DEN EINSATZ VON CO_2-EFFIZIENTEN UND R-BETONEN IN BAYERN

Verfügbarkeit, Einsparpotential, Auswirkungen auf Bauablauf und -kosten

Masterarbeit

Chiara Hauschulz

In Bayern bieten zum Zeitpunkt der Recherche über 40 Hersteller CO_2-effizienten und ressourcenschonenden Beton aus mehr als 160 Werken an. Die verfügbaren Produkte bieten gegenüber herkömmlichen Betonsorten mit gleichen Festbetoneigenschaften variierende Treibhausgas-Einsparpotentiale (meist CO_2-Klasse Level 1 und 2) bzw. Ressourceneinsparpotentiale (meist 20 bis 25 Volumen-Prozent der Gesteinskörnung). Innerhalb der normativen Grenzen kann ca. 20 Volumen-Prozent der primären Gesteinskörnung im Tragwerk des untersuchten Beispielprojekts durch Sekundärmaterial substituiert werden. Der Variantenvergleich zeigt, dass verfügbare CO_2-effiziente Betonsorten die Reduktion des Treibhauspotentials dieses Tragwerks um ein Drittel ermöglichen. Die Preise für ökologisch-nachhaltige Betonsorten liegen zwischen 2 und 20 Prozent über denen für äquivalente herkömmliche Transportbetone. Jedoch resultiert der größere Anteil der Mehrkosten aus den Auswirkungen auf den Bauablauf. Deswegen sollten die Betonzusammensetzung und der Bauablauf gemeinsam optimiert werden. Dazu ist eine projektspezifische und frühzeitige Ermittlung der regionalen Verfügbarkeit von CO_2-effizientem und R-Beton unerlässlich.

Keywords: CO_2-effizienter Beton, R-Beton, Nachhaltiges Bauen, Hochbau, Transportbeton, Ressourcenschonung, Treibhauspotential

Hintergrund

Der Bausektor hat einen erheblichen Anteil am Ressourcenaufwand in Deutschland. Während ca. 90 Prozent der mineralischen Rohstoffe in der Herstellung von Baustoffen eingesetzt werden, stammen mehr als die Hälfte des Abfallaufkommens in Deutschland aus dem Bausektor [1]. Dies verdeutlicht nicht nur die Notwendigkeit von Veränderungen, sondern auch den großen Einfluss des Sektors. In Anbetracht

des begrenzten Rohstoffaufkommens und Deponieraums sowie des Klimawandels und seiner Auswirkungen beschäftigen sich Unternehmen der Baubranche zunehmend mit dem Thema Nachhaltigkeit [2]. So auch die Ed. Züblin AG. Die Arbeit wurde am Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München und in Kooperation mit der Ed. Züblin AG angefertigt. Da Beton sowohl in großen Mengen verbaut wird als auch besonders ressourcen- und emissionsintensiv ist, betrachtet die Arbeit zwei ökologisch-nachhaltige Alternativen zu herkömmlichem Beton - R-Beton und CO_2-effizienten Beton. Der Einflussbereich einer bauausführenden Firma wird untersucht.

Fragestellung

Die zugrundeliegenden Fragestellungen sind, wie groß die Einsparpotentiale von in Bayern erhältlichen CO_2-effizienten und R-Betonen für den Hochbau auf Produkt- und Tragwerksebene sind, und welche Besonderheiten sich im Vergleich zu konventionellem Beton für die Bauausführung ergeben.

Methodik

Zur Beantwortung wurden umfassende Literatur- und Internetrecherchen, eine an Transportbetonhersteller adressierte Umfrage und ein Variantenvergleich hinsichtlich Ressourcenverbrauch und Treibhauspotential des Betons bzw. Tragwerks eines Beispielprojekts durchgeführt. Als Beispielprojekt wurde der Neubau eines Bürogebäudes in Stahlbetonbauweise in Ingolstadt verwendet. Eine Methode zur Ermittlung der aktuellen, regionalen Verfügbarkeit wurde entwickelt. Die Auswirkungen des CO_2-effizienten Betons auf die Ausführung des Beispielprojekts wurden anhand projektspezifischer Unterlagen und einem Interview mit der Bauleitung erarbeitet, um normative und baupraktische Besonderheiten gemeinsam darzustellen.

Grundlagen

CO_2-effizienter Beton wird hinsichtlich des Treibhauspotentials (engl.: GWP = Global Warming Potential) der Herstellung verbessert. Ziel ist es die gleichen Festbetoneigenschaften mit geringerer Emission von Treibhausgasen (THG) zu erreichen. Meist werden zu diesem Zweck klinkereffiziente Zemente eingesetzt. CO_2-effizienter Beton kann nach dem System des Concrete Sustainablilty Councils (CSC) in „CO_2-Klassen“ eingeteilt werden. Für die Level 1 bis 4 wird die Reduktion von 30 bis 60 Prozent des Treibhauspotentials der Betonherstellung gegenüber einem Branchenreferenzwert vorgeschrieben. Dabei handelt es sich nicht um einen Durchschnittswert, weil die Treibhausgas-Emissionen eines Portlandzements angesetzt sind. Die Reduktion gegenüber aktuellen deutschen Durchschnittswerten ist deutlich geringer als gegenüber den CSC-Branchenreferenzwerten (siehe Abb. 1) [3].

Bei R-Beton wird ein anderes Ziel verfolgt: den Ressourcenverbrauch durch die Betonherstellung zu verringern. Das „R“ steht dabei für „Ressourcenschonend“. Mindestens ein Teil der primären Gesteinskörnung wird durch rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt. Zur Nutzung des Begriffs ist kein Mindestanteil von Sekundärmaterial vorgeschrieben.

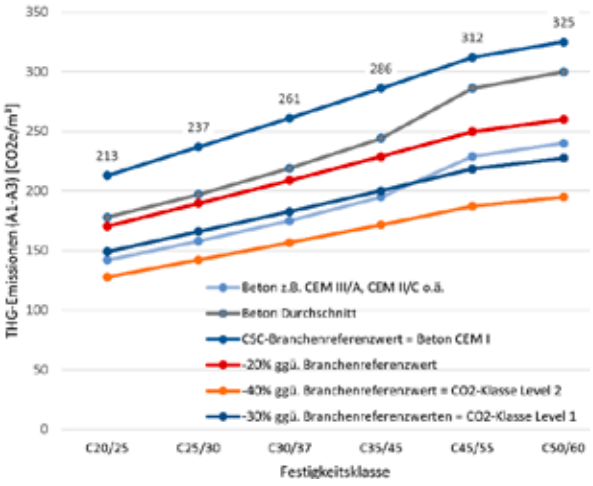


Abb. 1: Einordnung der THG-Einsparpotentiale in Bezug auf Branchenreferenz- und Durchschnittswerte; erstellt nach [2,4].

Verfügbarkeit in Bayern

R-Beton und CO_2-effizienter Beton werden zum Zeitpunkt der Recherche von jeweils über 40 Transportbetonherstellern aus mehr als 160 Werken in Bayern angeboten. Die Voraussetzung für R-Beton ist die Verfügbarkeit von rezyklierter Gesteinskörnung in ausreichender Qualität und Menge [5]. Der Vergleich der Ergebnisse der Online-Recherche und der Umfrage zeigt, dass auf Anfrage mehr ökologisch-nachhaltige Betonsorten erhältlich sind, als aus den öffentlichen Preislisten hervorgeht. Transportbetonhersteller entwickeln ihr Angebot stetig weiter und die Verfügbarkeit von rezyklierter Gesteinskörnung schwankt. Daher ist es sinnvoll, die aktuelle regionale Verfügbarkeit projektspezifisch zu ermitteln. Dazu ist der im Rahmen dieser Arbeit erstellte Fragebogen gut geeignet.

Einsparpotentiale

Die Ressourceneinsparpotentiale der erhältlichen R-Betonsorten liegen meist zwischen 20 und 25 Volumen-Prozent der Gesteinskörnung. Der Einsatz von R-Beton und der zulässige Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung werden durch die Umweltbedingungen begrenzt [6, 7]. Innerhalb der normativen Grenzen ist der Ersatz von ca. 20 Volumen-Prozent der primären Gesteinskörnung im Tragwerk des Beispielprojekts durch Sekundärmaterial möglich.

Erhältliche CO_2-effiziente Betonsorten sind meist der CO_2-Klasse Level 1 oder Level 2 zuzuordnen (vgl. Abb. 1). Der Einsatz von Hochofenzement CEM III mit Hüttensand als Klinkerersatzstoff ist üblich, während Portlandkompositzement CEM II/C-M mit Kalkstein als Klinkerersatzstoff selten verwendet wird.

Das Treibhauspotential auf Tragwerksebene wurde für 10 Varianten ermittelt und verglichen (siehe Abb. 2). Das betrachtete Tragwerk besteht aus 11.930 m³ Stahlbeton mit 2.140 t Bewehrungsstahl bei einer Brutto-Grundfläche von 20.160 m². Die Varianten 4 und 5 nutzen generische ländertypische Daten für Deutschland [8]. Variante 4 wird als Referenz verwendet. Die Varianten 7 bis 10 wurden hinsichtlich des Treibhauspotentials oder Ressourcenverbrauchs unter Berücksichtigung der Eignung der Produkte für die jeweiligen Festigkeits-, Expositions- und Feuchteklassen optimiert. Hier wurden ausschließlich verfügbare Betonsorten verwendet. In den Varianten 2, 3, 9 und 10 wurde Beton mit Hochofenzement CEM III/A verwendet. Die Daten stammen aus Selbstdeklarationen der Hersteller nach ISO 14025 und EN 15804.

Auf Tragwerksebene ermöglichen die verfügbaren CO_2-effizienten Transportbetone eine Reduktion des Treibhauspotentials um bis zu einem Drittel (vgl. Abb. 2). In Bezug auf das gesamte Gebäude und seine Nutzung entspricht das einer Reduktion um ca. neun Prozent.

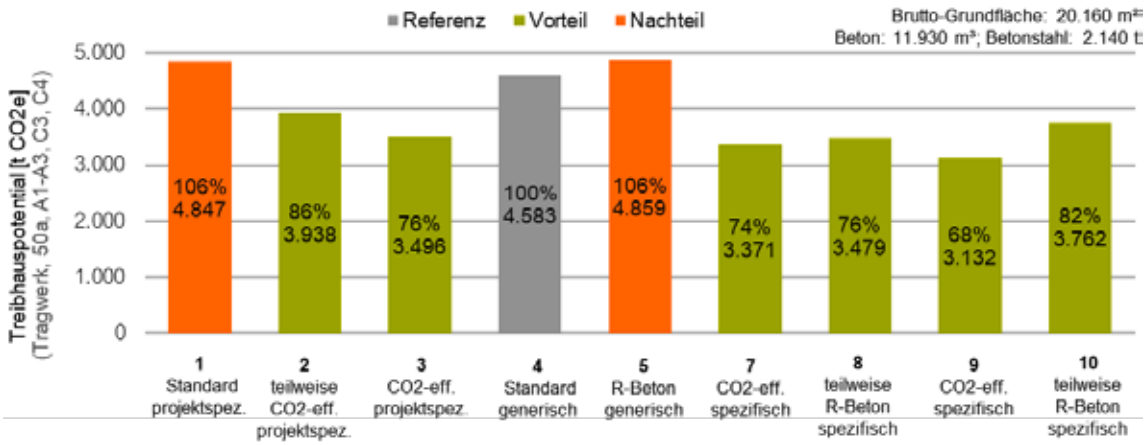


Abb. 2: Treibhauspotential der Varianten des Tragwerks (Beton und Bewehrung) in Bezug auf Variante 4.

Wechselwirkungen

Im Fall von R-Beton werden durch die Begrenzung des Anteils der rezyklierten Gesteinskörnung negative Wechselwirkungen der Ressourcenschonung mit dem Treibhauspotential vermieden. Der Einsatz von R-Beton ist im Sinne der Nachhaltigkeit, wenn kurze Transportdistanzen zwischen dem Abbruch, der Aufbereitung und dem Einsatzort liegen.

Kosten

Die Preise für die ökologisch-nachhaltigen Betonsorten liegen zum Zeitpunkt der Recherchen zwischen 2 und 20 Prozent über denen für äquivalenten konventionellen Transportbeton. Jedoch ist zu erwarten, dass der größere Anteil der Mehrkosten aus den Auswirkungen auf den Bauablauf resultiert.

Auswirkungen auf die Bauausführung

Aufgrund der Verwendung von klinkereffizienten Zementen, ist eine langsamere Festigkeitsentwicklung typisch für CO_2-effizienten Beton und verursacht die Verlängerung der Nachbehandlungsdauer, Ausschal- und Ausrüstfristen [9]. Bei R-Beton ist mit weniger robusten Frischbetoneigenschaften und einer intensiveren Nachbehandlung zu rechnen [5].

Anreizsysteme zur Verwendung

Bisher werden Transportbetone pauschal und unabhängig vom Treibhauspotential ihrer Herstellung mit einem „CO_2-Zuschlag“ je Kubikmeter bepreist. Auch im Gebäude-zertifizierungssystem der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen für Neubauten spiegeln die durch den Einsatz von CO_2-effizienten oder R-Betonen erreichbaren Punkte kaum die tatsächlichen THG- bzw. Ressourcen-einsparpotentiale wider [10]. Die Treibhausgas-Minderungsklassen der DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton […]“ können als Anreiz zur THG-Emissionsminderung im Betonbau dienen [11].

Fazit

CO_2-effiziente und R-Betonsorten mit relevanten Treibhausgas- bzw. Ressourceneinspar-potentialen sind für den Einsatz in Hochbauprojekten in Bayern bereits von vielen Transportbetonherstellern erhältlich. Technologisch und normativ ist jedoch eine weitere Reduktion des Treibhauspotentials bzw. Ressourcen-verbrauchs möglich.

Bei der Ausführung von Betonbauteilen mit CO_2-effizientem und R-Beton sind bestimmte Auswirkungen auf den Bauablauf und die Baukosten zu berücksichtigen, um Mehrkosten und Bauzeitverlängerungen zu verringern. Die aktuelle regionale Verfügbarkeit ist projektspezifisch und frühzeitig abzufragen. Die Betonzusammensetzung und der Bauablauf sollten gemeinsam optimiert werden. Dabei darf die Dauerhaftigkeit als entscheidender Vorteil des Baustoffs nicht gefährdet werden.

Ausblick

Bisher wird die Treibhausgas-Reduktion meist durch den Einsatz von Hochofenzementen erreicht. Aufgrund der Dekarbonisierung anderer Industrien, insbesondere der Stahlindustrie, ist eine deutlich Veränderung des Markts von Zementklinkerersatzstoffen, insbesondere die Verknappung von Hüttensand und Flugasche, zu erwarten.

Um die Umweltwirkung des Betonbaus zu verringern, müssen die in dieser Arbeit betrachteten Maßnahmen umgesetzt und mit weiteren kombiniert werden. Dazu gehören beispielweise Tragwerksoptimierungen hin-sichtlich des Materialeinsatzes und Verfahren zur CO_2-Abscheidung, -Nutzung und -Speicherung in der Zementherstellung.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1]: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). (2020). *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023, Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen* [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/ Pools/Broschueren/ressourceneffizienz_programm_2020_2023.pdf

[2]: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb). (29. Oktober 2021). *Nachhaltig bauen mit Beton - Planungshilfe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb).* (DAfStb, Hrsg.) Von DAfStb:

[3]: Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (8. Dezember 2021). *Concrete Sustainability Council - Hintergrundbericht CO2-Modul*. Abgerufen am 25. Oktober 2023 von www.csc-zertifizierung.de

[4]: Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (10. Januar 2022). *Concrete Sustainability Council - Technisches Handbuch - CO2-Modul*. Abgerufen am 12. Juni 2023 von www.csc-zertifizierung.de

[5]: Kiltz, D., & Voland, K. (2022). R-Beton: Hinweise für die Bauausführung. *DBV Rundschreiben, 272*, 7-9.

[6]: Deutsches Institut für Normung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. (2010). *DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[7]: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2023). *DIN 1045-2 - Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[8]: Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. (15. Juni 2023). *ÖKOBAUDAT - Informationsportal Nachhaltiges Bauen*. (S. u. Deutsche Bundesministerium für Wohnen, Herausgeber) Von ÖKOBAUDAT gemäß EN 15804+A2: https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche/daten/db1.html#bereich1 abgerufen

[9]: Kiltz, D., & Meyer, L. (2022). Beton: Auswirkungen klinkereffizienter Zemente auf die Bauausführung. In *DBV-Heft 50: Nachhaltiges Bauen mit Beton - Band 2: Quick Wins für den Klimaschutz* (S. 11-16)

[10]: DGNB GmbH. (1. Juli 2023). *DGNB System - Kriterienkatalog Gebäude Neubau - Version 2023 - 2.Auflage.* Von DGNB: https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/das-wichtigste-zur-dgnb-zertifizierung/nutzungsprofile abgerufen

[11]: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb). (2024). *DAfStb-Richtlinie - Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton.* (DAfStb, Hrsg.) Berlin.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

[2], [6], [7], [8], DBV-Heft 50 – Band 2 (siehe [9])

Autor

Chiara Hauschulz M.Sc.

Ausbildung:

2021-2024 Masterstudium Bauingenieurwesen (Technische Universität München); seit 2023 DGNB Registered Professional; 2016-2021 Verbundstudium Bachelor Bauingenieurwesen / Bauzeichnerin IHK (Hochschule für angewandte Wissenschaften München / Zilch + Müller Ingenieure GmbH)

Berufserfahrung:

seit 09/2024 Junior Projektingenieurin in der Bauwerkserhaltung mit Schnittstelle zum Nachhaltigen Bauen (ZM-I München GmbH); 2023 – 2024 Werkstudententätigkeit (Technischen Dienste, Ed. Züblin AG); 2021 – 2023 Werkstudententätigkeit (Tragwerksplanung, Zilch + Müller Ingenieure GmbH)

Betreuer

Die Arbeit wurde am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München angefertigt und durch Prof. Dr.-Ing. Werner Lang und M.Sc. Leander Präger betreut. Seitens der Ed. Züblin AG – Direktion Bayern wurde die Arbeit durch Dr.-Ing. Jutta Gehrmann betreut.

Die Arbeit wird mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

INTERAKTION VON CALCINIERTEN TONEN UND FLIESSMITTELN IM FRISCHBETON

Bachelorarbeit

Lena Huber

Calcinierte Tone (CTs) stellen eine gut verfügbare und ökologische Alternative zu bisherigen Zementersatzstoffen dar. Die Verwendung von Fließmitteln ist dabei in zementären Systemen mit CTs ein elementarer Bestandteil, um eine adäquate Verarbeitbarkeit zu erreichen. In dieser Arbeit werden Kombinationen aus drei 2:1 dominierten CTs und zwei industriell hergestellten Fließmitteln (ein konventionelles PCE und ein PCE mit intelligentem Cluster System (ICS)) im Beton analysiert. Hierfür wurde der Fließmittelbedarf für ein Ausbreitmaß von 51 ± 2 cm bestimmt und dieses über die Zeit beobachtet. Mit einem Rotationsrheometer wurden Viskosität und Fließgrenze bestimmt. Die Konsistenzhaltung nach 30 min war bei einem fein gemahlenen illitischen Ton, welcher auch die höchsten Viskositäten und Fließgrenzen zeigte, nicht möglich. Das PCE-Fließmittel erzielte eine längere Konsistenzhaltung als das ICS. Nicht alle bekannten Zusammenhänge aus Bindemittelleim und Mörtel, wie z.B. eine Korrelation zwischen BET-Oberfläche und Fließmittelanspruch, spiegeln sich im Frischbeton wieder. Weitere Untersuchungen im Frischbeton sind notwendig, um die Interaktion zwischen CTs und Fließmitteln zu verstehen und so kritische Parameter wie die Verarbeitbarkeit und Konsistenzhaltung zu verbessern, welche elementar für eine nutzerorientierte Anwendung sind.

Keywords: Calcinierte Tone, Fließmittel, Frischbeton, Rotationsrheometer, Konsistenzhaltung

Zielstellung und Literatur

Durch den Einsatz von emissionsarmen Zementersatzstoffen (SCM) kann Zementklinker als einer der Hauptverursacher von klimaschädlichen CO_2 im Baubereich reduziert werden. Im Gegensatz zu einigen etablierten SCMs sind calcinierte Tone (CTs) auch zukünftig nahezu weltweit verfügbar [1] und können als zukunftsorientierter Zementersatzstoff in Betonen eingesetzt werden [2].

Da CTs jedoch insbesondere in der Rheologie herausfordernd sind, ist ein verbessertes Verständnis der Frischbetoneigenschaften notwendig, um CTs zukünftig auch in hohen Substitutionsraten einsetzen zu können. Ziel dieser Arbeit war es, erstmals die Interaktion von Fließmitteln mit calcinierten Tonen (CTs) im Frischbeton (mit Größtkorn 8 mm) zu untersuchen.

CTs können aufgrund ihrer geschichteten Struktur in 1:1, 2:1 und 2:1:1 Schichtsilicate unterteilt werden. In der Forschung wurde bislang mehr Fokus auf 1:1 Schichtsilicate wie Kaolinit gelegt, die Tonvorkommen in Deutschland enthalten jedoch eher 2:1 Schichtsilicate [3]. Die Literatur zeigt außerdem, dass bislang ein Großteil der rheologischen Untersuchungen zu CTs im Bindemittelleim und Mörtel durchgeführt und auch die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf Frischbeton nur selten betrachtet wurde. Um CTs in Zukunft noch effektiver als SCMs nutzen zu können, ist es elementar, die Anwendung von Fließmitteln nicht nur im Bindemittelleim und Mörtel, sondern auch im Frischbeton zu verifizieren und ein Fließmittel mit adäquater Konsistenzhaltung zu finden.

In dieser Arbeit wurden drei unterschiedliche Tone (zwei illitische Tone unterschiedlicher Feinheit, cIIIA sowie cIIIA$_{fein}$, und ein smectitischer Ton, cSmk) mit je zwei industriell hergestellten Fließmitteln (ein PCE-Fließmittel FM-S und ein Fließmittel der intelligenten Cluster Systeme (ICS) FM-C) kombiniert. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die Konsistenzhaltung und die rheologischen Parameter im Frischbeton. Die Substitutionsrate von CTs im Zement betrug 30 Vol.-% bei einem w/b-Wert von 0,5. Der in den Fließmitteln enthaltene Flüssiganteil wurde bei der Wasserzugabe berücksichtigt. Die Prozentangaben der Fließmittel werden als %bwob (M.-% bezogen auf das Bindemittel/ by weight of binder) angegeben.

Tabelle 1: Nomenklatur der Versuchskombinationen mit Fließmittel (FM)

Calcinierte Tone	**FM-C (ICS)**	**FM-S (PCE)**
cIIIA (Illit)	VI.C	VI.S
cSmk (Smectit)	VS.C	VS.S
cIIIA$_{fein}$ (Illit)	VF.C	VF.S

Ergebnisse des Rotationsrheometers

Die rheologischen Eigenschaften Viskosität und Fließgrenze, welche in der Forschung mittels Rheometer ermittelt werden können, geben Aufschlüsse über das zeit- und belastungsabhängige Verhalten der untersuchten Betone. Diese Erkenntnisse sind wichtig für eine erfolgreiche Anpassung der Fließmittel an CTs.
Bei der Untersuchung der Betone mit dem verwendeten Rotationsrheometer kam es sowohl zu Mess- als auch zu Auswerteschwierigkeiten. Einer der Gründe hierfür war die scherverursachte Partikelmigration, bei welcher die grobe Gesteinskörnung nach oben ausgestoßen wurde. Diese Art der Entmischung wurde bereits in anderen Arbeiten [4], [5] beobachtet und führt dazu, dass die gemessene Probe nicht mehr homogen ist. Andere, gerätespezifische Schwierigkeiten könnten durch den Einsatz verschiedener Rheometer und Rheometer-einsätze minimiert werden.

Die Viskosität und Fließgrenze zeigten bei den Kombinationen mit cIIIA$_{fein}$ mit Abstand die höchsten Werte, wobei die Fließgrenze bei FM-C nochmal deutlich höher lag als bei FM-S.

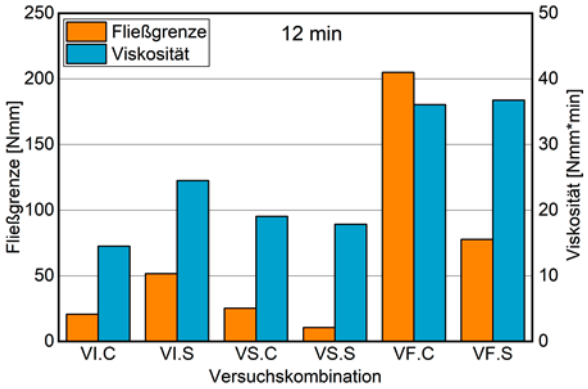


Abb. 1: Viskosität und Fließgrenze aller Kombinationen nach 12 min

Es kam bei beiden Messreihen mit diesem Ton zu einem frühzeitigen Abbruch der Messungen durch das Rheometer. Dieser wurde durch ein schnelles Erstarren der Proben verursacht. Bei den übrigen Mischungen ließ sich kein klarer Trend für die Fließmittel FM-C und FM-S in Bezug auf rheologische Parameter erkennen. Zukünftig

müssten hier umfangreichere Versuchsreihen durchgeführt werden, um eventuell fehlerhafte Messungen als Ausreißer definieren zu können. Des Weiteren kann die Zugabe von z. B. Verzögerern in Betracht gezogen werden, um auch bei schnell erstarrenden Mischungen genug Messdaten ermitteln zu können.

Fließmittelanspruch und Konsistenzhaltung

Bis auf die Kombination aus cIIIA mit FM-S lassen sich alle Mischungen auf ein Ausbreitmaß von 51 ± 2 cm einstellen. cIIIA$_{fein}$ hat hierbei den geringsten Fließmittelanspruch, gefolgt von cSmk und cIIIA, wobei in allen Kombinationen mehr FM-S als FM-C benötigt wurde. Im Allgemeinen sind die Fließmitteldosierungen mit Werten zwischen 2,8 %bwob und 4,5 %bwob eher als hoch einzustufen. Mit FM-S war eine längere Konsistenzhaltung erkennbar als mit FM-C. Für den Einsatz in der Baupraxis ist also die Abstimmung des verwendeten CTs mit dem Fließmittel essentiell.

Eine ausreichende Konsistenzhaltung konnte bei beiden Mischungen mit cIIIA$_{fein}$ nicht erreicht werden. Diese Beobachtung bestätigt die Ergebnisse vorangegangener Arbeiten mit diesem Ton [6]. In Abbildung 2 ist das Ausbreitmaß der Kombination von cIIIA$_{fein}$ mit FM-S als Fotodokumentation dargestellt.

Im Frischbeton lässt sich keine eindeutige Korrelation zwischen Fließmittelanspruch und Konsistenzhaltung erkennen (Abbildung 3).

Abgesehen von der geringen Konsistenzhaltung bei cIIIA$_{fein}$ lässt sich auch bei einer nach Tonen oder Fließmitteln getrennten Betrachtung, kein klarer Trend feststellen.

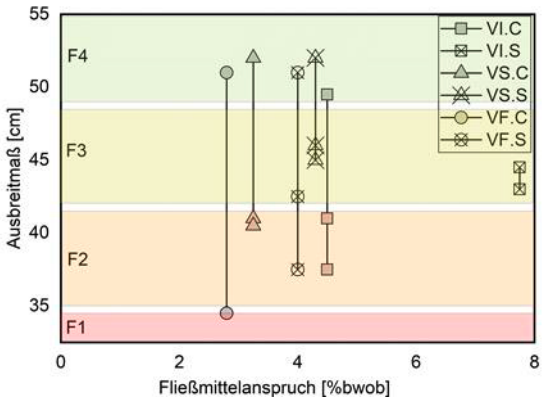


Abb. 3: Konsistenzhaltung aller Kombinationen, dargestellt als Ausbreitmaß (6, 30, 60 min) über den Fließmittelanspruch

FM-C gehört zur neuartigen Fließmittelgruppe der intelligenten Cluster Systeme. Bei diesen soll durch eine zeitabhängige, schrittweise Abgabe von Polymeren aus größeren Polymerclustern eine verbesserte Konsistenzhaltung erzielt werden. Diese konnte bei den untersuchten Tonen nicht beobachtet werden, obwohl die angestrebte Anfangsverflüssigung und damit Wirksamkeit erreicht wurde.

Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die zur Verflüssigung notwendigen Dosierungen im Frischbeton bestätigen nicht den in der Literatur bislang hauptsächlich am Bindemittelleim und Mörtel festgestellten Trend, dass illitische Tone mehr Fließmittel benötigen als smectitische [6].



Abb. 2: Ausbreitmaß von VF.S nach 6, 30 und 60 min

Ebenso konnte die bisher festgestellte Korrelation zwischen BET-Oberfläche und Fließmittelanspruch im Bindemittelleim nicht für Frischbeton nachgewiesen werden.

Dies zeigt, dass nicht alle Ergebnisse aus Bindemittelleim und Mörtel in den Frischbeton übertragen werden können, wie veranschaulicht in Tabelle 2 dargestellt, und daher Versuche im Frischbeton unerlässlich sind.

Untersuchungen von [6] im Bindemittelleim zeigten, dass der Einfluss des Tongemisches gegenüber der Fließmittelart dominiert. Die Fließmaße nach 45 min liegen in [6] für ein Tongemisch, unabhängig vom verwendeten Fließmittel, nah zusammen. Ein vergleichbar enger Zusammenhang der Ausbreitmaße konnte in den durchgeführten Untersuchungen am Frischbeton nicht bestätigt werden. Allerdings zeigt sich bei den Messungen, dass Kombinationen mit verschiedenen Fließmitteln und demselben Ton bspw. beide stark Bluten. Daraus lässt sich ableiten, dass der Ton eine prominentere Rolle für den Zusammenhalt und die Konsistenzhaltung einer Mischung spielt als das Fließmittel.

Um die Übertragbarkeit verschiedener Paramater von Bindemittelleim und Mörtel auf Frischbeton zu bestätigen oder ausschließen zu können, sind in der Zukunft noch weitere Untersuchungen nötig. Verlässliche Aussagen zur Übertragbarkeit können Kosten und Aufwand zukünftiger Forschungen reduzieren, da Versuche im Bindemittelleim und Mörtel weniger Ressourcen benötigen als im Frischbeton. Eine Möglichkeit wäre, für alle drei Medien dieselben Tone und Fließmittel zu verwenden und Viskosität sowie Fließgrenze auch schon im Bindemittelleim und Mörtel mit dem Viskomat XL zu bestimmen, um gezielte Aussagen über die Übertragbarkeit treffen zu können.

Fazit

Letztendlich sind die Eigenschaften von Frischbeton für einen umfassenden, nutzerorientierten Einsatz in der Praxis entscheidend. Um eine adäquate Konsistenzhaltung und Verarbeitbarkeit gewährleisten zu können, ist ein besseres Verständnis der Fließmittel-CT-Interaktion im Frischbeton unerlässlich und daher sind eingehendere Untersuchungen in genau diesem Medium notwendig. Dadurch können effizientere Lösungen für verschiedene calcinierte Tone gefunden werden, die CTs als nachhaltige SCM universeller nutzbar machen und so einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der CO_2-Emission im Baubereich leisten.

Tabelle 2: Übertragbarkeit der Ergebnisse

Parameter	Bindemittelleim → Mörtel	Bindemittelleim → Frischbeton	Mörtel → Frischbeton
Fließmittelanspruch	mittel	gering	gering
Konsistenzhaltung	hoch	hoch	hoch
Zusammenhang BET-Oberfläche und Fließmittel-Anspruch	mittel	gering	gering

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1] A. Ito und R. Wagai, „Global distribution of clay-size minerals on land surface for biogeochemical and climatological studies“, *Scientific Data*, Bd. 4, Nr. 1, S. 170103, 22 2017, doi: https://doi.org/10.1038/sdata.2017.103.

[2] R. Sposito, „Investigations on the impact of metaphyllosilicates and calcined common clays on the rheology and early hydration of cements admixed with different superplasticizer“, Cummulative thesis, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2022.

[3] K.-C. Thienel, S. Scherb, N. Beuntner, M. Maier, und R. Sposito, „1:1 or 2:1 - Does it matter for calcined clay as supplementary cementitious material?“, in *ce/papers*, Bd. 6, 2023, S. 363–372.

[4] C. Baumert und H. Garrecht, „About the Influence of Shear-Induced Particle Migration and Sedimentation on the Measurement Results of Concrete Rheometers“, in *Rheology and Processing of Construction Materials*, V. Mechtcherine, K. Khayat, und E. Secrieru, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 168–173.

[5] O. H. Wallevik, D. Feys, J. E. Wallevik, und K. H. Khayat, „Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials“, *Cement Concrete Res*, Bd. 78, S. 100–109, Dez. 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.003.

[6] A. Mainzer, „Untersuchungen zur zeitabhängigen Wirksamkeit von Fliessmitteln in Zement-Metaclay-Bindemitteln“. 2024.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. R. Sposito, „Investigations on the impact of metaphyllosilicates and calcined common clays on the rheology and early hydration of cements admixed with different superplasticizer“, Cummulative thesis, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2022.

2. R. Li, L. Lei, T. Sui, und J. Plank, „Effectiveness of PCE superplasticizers in calcined clay blended cements“, *Cement Concrete Res*, Bd. 141, S. 106334, März 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106334.

3. A. Mainzer, „Untersuchungen zur zeitabhängigen Wirksamkeit von Fliessmitteln in Zement-Metaclay-Bindemitteln“. 2024., Masterarbeit an der Universität der Bundeswehr

Autor

Lena Huber

Studium:

10/2022 – 12/2024:	Bachelorstudium Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, Universität der Bundeswehr München
01/2025 – heute:	Masterstudium Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, Universität der Bundeswehr München

Praxiserfahrung:

10/2023 – heute:	Studentische Hilfskraft am Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München. Betreut wurde die Arbeit durch Hauptmann M.Sc. A. Neißer-Deiters und Frau Dr.-Ing. N. Beuntner unter der Institutsleitung von Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel.

Die Arbeit wird mit dem 2. Preis ausgezeichnet.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR SCHUBTRAGFÄHIGKEIT VON LEHMSTEINMAUERWERK

Bachelorarbeit

Annika Karl

Lehmsteine gelten als ressourcenschonendes Baumaterial, das durch lokale Verfügbarkeit, geringen Energiebedarf in der Herstellung und Wiederverwendbarkeit eine nachhaltige Alternative zu künstlichen Mauersteinen darstellt. Mit der Einführung der Norm DIN 18940 [1] im April 2023 wurde erstmals die Grundlage für eine normgerechte Bemessung von tragendem Lehmsteinmauerwerk geschaffen. Dabei bleibt für die Bemessung der Schubtragfähigkeit jedoch unklar, ab welchem Grad der Steifigkeit ein Lehmsteinmauerwerk als ausreichend tragfähig gilt. Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, mithilfe von drei Schubwandversuchen unter normativen Klimabedingungen und statisch-monotoner Belastung die Schubtragfähigkeit geschosshoher Lehmsteinmauerwerkswände experimentell zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass die rechnerisch zu erwartende Horizontalkraft gemäß DIN EN 1996-1-1/NA Anhang K [2] um ca. 40 % übertroffen wurde, was einer Ausnutzung von über 140 % entspricht. Diese Versuche belegen, dass Lehmsteinmauerwerk unter normativen Klimabedingungen eine hohe Schubtragfähigkeit besitzt und die Bemessung nach Eurocode 6 [2] als konservative Grundlage verwendet werden kann. Damit wird eine ingenieurmäßige Bemessung von tragendem Lehmsteinmauerwerk möglich, was zur Förderung nachhaltiger Bauweisen beitragen kann.

Keywords: Lehmsteinmauerwerk, Schubtragfähigkeit, Schubwandversuch, Bemessung

Problemstellung

In Zeiten des fortschreitenden Klimawandels wird auch in der Baubranche der Fokus auf klimafreundliche und ressourcenschonende Bauweisen gelegt. Daher rückt Lehmsteinmauerwerk, aufgrund einer Vielzahl an ökologischen Vorteilen wie der lokalen Verfügbarkeit, dem geringen Energiebedarf bei der Herstellung und dem Recyclingpotenzial, zunehmend wieder in den Vordergrund. Mit der Einführung der DIN 18940 [1] im April 2023 wurde erstmals die Möglichkeit geschaffen tragendes Lehmsteinmauerwerk bis zu einer Höhe von 13 m normgerecht zu bemessen. Mit den zuvor geltenden Lehmbauregeln war dies nur mit einer Zustimmung im Einzelfall möglich, was die praktische Anwendung erheblich einschränkte.

Für die Bemessung der Schubtragfähigkeit regelt die neue Norm, dass auf einen gesonderten Aussteifungsnachweis verzichtet werden kann, sofern das Gebäude als ausreichend steif gilt. Jedoch ist unklar, wie der Begriff „ausreichend steif“ in der Praxis konkret definiert ist. Die bisher vorhandenen Bemessungsansätze für die Schubtragfähigkeit gemäß Eurocode 6 [2] sind lediglich auf die klassischen Mauerwerksarten ausgelegt.

Um die Schubtragfähigkeit von Lehmsteinmauerwerk zu untersuchen und einzuordnen, wurden drei Schubwandversuche an geschosshohen Aussteifungswänden durchgeführt. Ziel dieser Arbeit ist es, die Tragfähigkeit auf Schub zu analysieren und die Versuchsergebnisse mit theoretischen Berechnungen nach DIN EN 1996-1-1/NA Anhang K [2] zu vergleichen. Dadurch soll überprüft werden, inwiefern das bestehende Bemessungskonzept auf tragendes Lehmsteinmauerwerk anwendbar ist.

Versuchsdurchführung

Die Schubwandversuche wurden am Prüfstand des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau der OTH Regensburg durchgeführt. Die kombinierte N-M-V-Beanspruchung wird in Anlehnung an [3] mithilfe von drei Hydraulikzylindern auf die Wand aufgebracht. Die Einspannwirkung der aufliegenden Decke wird durch den Momentenverteilungsfaktor ψ berücksichtigt, der über zwei vertikale Kräfte softwaregesteuert reguliert werden kann. Durch die Interaktion der Hydraulikzylinder bleiben sowohl die Auflast als auch der Momentenverlauf in der Wand über die gesamte Versuchszeit konstant.

Prüf-körper	l_{Wand} [m]	ψ [-]	Auflast [kN]
PK1	2,60	0,5	214
PK2	2,60	1,0	309
PK3	1,07	0,5	128

Tab. 1: Versuchsparameter der Prüfkörper

Es wurden drei Prüfkörper mit unterschiedlichen Parametern untersucht, welche in Tabelle 1 dargestellt sind. Während PK1 eine typische Wand eines zweigeschossigen Gebäudes darstellt, repräsentieren PK2 und PK3 Wände eines dreigeschossigen Bauwerks. Das Versuchsprogramm sah bei allen drei Prüfkörpern eine statisch-monotone Belastung vor. Dabei wurde durch den horizontalen Hydraulikzylinder eine Verschiebung auf die Wand aufgebracht und diese stufenweise erhöht. Dadurch konnte die maximal aufnehmbare Horizontalkraft im Bruchzustand der Wand ermittelt werden. Zusätzlich zu den gemessenen Kräften erfasste ein optisches Messsystem die Dehnungen und Stauchungen über die gesamte Versuchszeit.

Konditionierung

Lehmsteine besitzen besondere hygrische Eigenschaften, die ihr Materialverhalten und damit ihre mechanischen Kennwerte wesentlich beeinflussen. Diese Eigenschaften beruhen auf der mineralischen Zusammensetzung des Lehms und werden insbesondere durch den Anteil an Tonmineralen bestimmt. Durch Aufnahme oder Abgabe von Feuchtigkeit aus der Umgebung kommt es zu Quell- und Schwindvorgänge im Material, die zu Veränderungen im Korngerüst des Baustoffes führen und sich direkt auf die mechanischen Eigenschaften auswirken. [4] Ergebnisse von Forschungen [4, 5] haben gezeigt, dass sowohl die Steindruck- als auch die Steinzugfestigkeit von Lehmsteinen stark von der Umgebungsfeuchte abhängen und mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit deutlich abnehmen.

Die feuchteabhängigen Festigkeitswerte sind bei Lehmsteinen sowohl bei Prüfungen als auch für die Bemessung von großer Bedeutung. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden die Prüfungen nach Konditionierung der Lehmsteine bzw. des Lehmsteinmauerwerks im Normklima bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte durchgeführt.

Bemessung nach EC 6

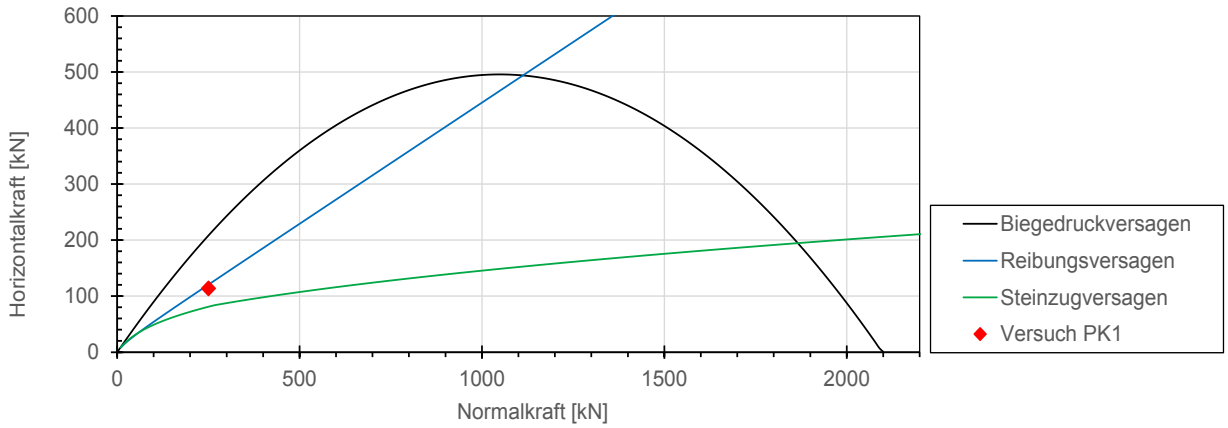
Zur Einordnung der Schubtragfähigkeit wurden die Versuchsergebnisse mit den Berechnungen nach dem Bemessungskonzept gemäß DIN EN 1996-1-1/NA Anhang K [2] verglichen. Die Bemessung unterscheidet zwischen Reibungs-, Steinzug- und Biegedruckversagen. Die rechnerische Schubtragfähigkeit wird aus den Materialkennwerten der Haftscherfestigkeit des Mörtels, der Mauerwerksdruckfestigkeit und der Steindruck- und Steinzugfestigkeit abgeleitet. Die Materialkennwerte werden dabei entweder durch experimentelle Untersuchungen ermittelt oder durch normative Empfehlungen festgelegt und sind für den Nachweis auf Mittelwertniveau umgerechnet. Mit diesen Kennwerten und den entsprechenden Gleichungen gemäß EC 6 [2] lassen sich für jeden Prüfkörper die Versagenshüllkurven in Abhängigkeit der einwirkenden Normal- und Horizontalkraft berechnen. Die Kurven der drei Versagensarten, welche eine Ausnutzung von 100 % beschreiben, sind in Abbildung 1 beispielhaft für den ersten Prüfkörper dargestellt.

Auswertung der Schubtragfähigkeit

Die experimentellen Ergebnisse der drei Schubwandversuche zeigen die maximal erreichte Horizontalkraft unter der gewählten Auflast und den Versuchsparametern und sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Der erste Prüfkörper erreichte eine maximale Horizontalkraft von 114,0 kN bei einer Normalkraft von 250,3 kN. In der Versagenshüllkurve (Abb. 1) liegt das Ergebnis deutlich oberhalb der grünen Linie für Steinzugversagen. Auch bei den anderen Prüfkörpern lagen die erreichten Horizontalkräfte im jeweiligen Diagramm deutlich oberhalb der Linie für Steinzugversagen, was die erwartete Versagensart gemäß den normativen Berechnungen darstellt.

Der Nachweis gemäß EC 6 [2] wurde für alle drei Versuche am Wandfuß als maßgebende Nachweisstelle geführt, wobei das Eigengewicht der Wand mitberücksichtigt wurde. Wie in Tabelle 2 dargestellt, lagen die experimentell bestimmten Schubtragfähigkeiten zwischen 141 und 155 % der nach EC 6 [2] berechneten Werte.

Abb. 1: Versagenshüllkurve mit Versuchsergebnis (PK1)



Tab. 2: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

PK	Wand-länge	ψ	erwartete Horizontalkraft $V_{EC6,mean}$	max. Horizontalkraft $V_{experimentell}$	zugehörige Auflast $N_{experimentell}$	Ausnutzung $\frac{V_{experimentell}}{V_{EC6,mean}}$
[-]	[m]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]
1	2,60	0,5	81,1	114,0	250,3	141
2	2,60	1,0	80,1	114,5	338,7	143
3	1,067	0,5	28,9	44,9	143,8	155

Des Weiteren kann auch in den Rissbildern der Prüfkörper das erwartete Steinzugversagen nicht eindeutig bestätigt werden. In Abbildung 2 ist das endgültige Versagensbild des ersten Prüfkörpers als Hauptformänderungen aus dem optischen Messsystem dargestellt.

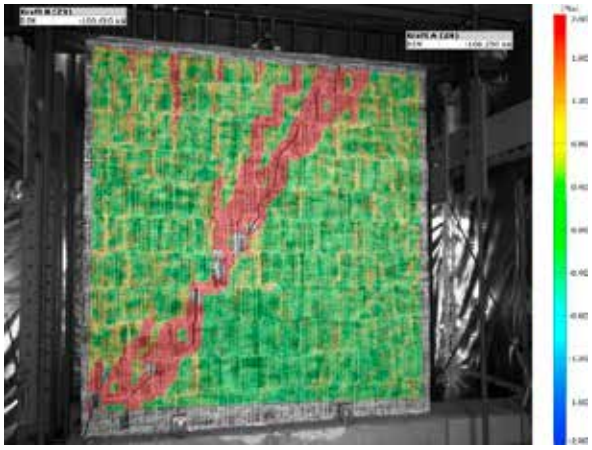


Abb. 2: endgültiges Versagensbild (PK1)

Der schräge Riss, welcher die Resultierende abbildet, verläuft sowohl durch die Lehmsteine als auch durch die Stoß- und Lagerfugen. Ähnliche Versagensbilder sind auch bei PK2 und PK3 aufgetreten. Dieses Rissbild deutet auf eine Mischform des Versagens hin, sodass keine eindeutige Zuordnung zu einer spezifischen Versagensart möglich ist.

Die Versuche zeigten, dass Lehmsteinmauerwerk eine gute Versagensankündigung besitzt und eine Resttragfähigkeit nach Erreichen der maximalen Horizontalkraft aufweist. Des Weiteren legt die Überschreitung des Steinzugversagens in allen drei Versuchen nahe, dass die normativ angesetzte Steinzugfestigkeit für Hochlochziegel von 2,6 % der Steindruckfestigkeit möglicherweise nicht optimal auf Lehmsteine übertragbar ist. Eine Anpassung dieses Werts könnte zu einer besseren Übereinstimmung zwischen der experimentell bestimmten Schubtragfähigkeit und dem Nachweis nach Eurocode 6 [2] führen. Zudem zeigten Ergebnisse von Forschungen [5] bereits, dass Lehmvollsteine im Vergleich zu herkömmlichen Mauerwerkssteinen höhere Zugfestigkeiten aufweisen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die experimentellen Untersuchungen am geschosshohen Lehmsteinmauerwerk in Bezug auf die Schubtragfähigkeit ergaben sehr gute Ergebnisse, welche die Erwartungen gemäß der Berechnungen nach dem Eurocode 6 [2] übertrafen. Die erreichten Schubtragfähigkeiten lagen in allen drei Versuchen mehr als 40 % über den theoretisch bestimmten Werten, was darauf hinweist, dass das bestehende Bemessungskonzept konservativ ist und zusätzliche Sicherheiten enthält.

Diese Arbeit stellt eine erste experimentelle Grundlage zur Bewertung der Schubtragfähigkeit von Lehmsteinmauerwerk dar und zeigt, dass das bisherige Bemessungskonzept des Eurocode 6 [2] grundsätzlich anwendbar ist. Gleichzeitig deuten die Ergebnisse darauf hin, dass Anpassungen der Materialkennwerte, insbesondere der Steinzugfestigkeit von Lehmhochlochziegel, zu einer besseren Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis führen könnten. Deshalb sollten weitere Untersuchungen in diesem Bereich durchgeführt werden, um diese Annahme zu überprüfen.

Obwohl die Untersuchungen vielversprechende Ergebnisse lieferten, ist zu beachten, dass es sich um Kurzzeitversuche unter Normklima handelt. Der Einfluss von Feuchtigkeit sowie mögliche Langzeiteffekte wurden nicht untersucht. Wie in anderer Literatur [4, 5] bereits festgestellt wurde, führt eine zunehmende relative Luftfeuchtigkeit zu einem deutlichen Abfall der Steindruck- und Steinzugfestigkeit der Lehmsteine. Dies legt nahe, dass auch die Schubtragfähigkeit, welche durch diese Materialkennwerte bestimmt wird, mit steigender Luftfeuchtigkeit abnimmt. Weitere Forschungen sollten sich daher insbesondere mit dem Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Schubtragfähigkeit von Lehmsteinmauerwerk befassen, um diesen Faktor auch in den Bemessungsansätzen mit zu berücksichtigen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1]: DIN 18940: tragendes Lehmsteinmauerwerk - Konstruktion, Bemessung und Ausführung

[2]: DIN EN 1996-1-1/NA: Nationaler Anhang - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk.

[3]: Schermer, D.; Fehling, E.; Stürz, J.: Schubprüfungen an geschosshohen Wänden – Grundlagen und Durchführung. In: Mauerwerk 12 (2008), Heft 1, S. 13-18.

[4]: Brinkmann Maximilian: Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehmmauerwerks unter Berücksichtigung nichtlinearer Feuchteprofile. Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 2023

[5]: Becker, A.; Zeitler, N.; Bujotzek, L. et al.: Material properties for the shear design of earth masonry under the influence of relative humidity, 2024

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Kranzler, T.: Tragfähigkeit überwiegend horizontal beanspruchter Aussteifungsscheiben aus unbewehrtem Mauerwerk, 2008
2. Graubner, C.-A.; Schmitt, M.: Tragfähigkeit unbewehrter Mauerwerksscheiben nach DIN EN 1996-1-1/NA. In: Mauerwerk (2013), Heft 5, S. 296-306.
3. Mann, W.; Müller, H.: Schubtragfähigkeit von gemauerten Wänden und Voraussetzungen für das Entfallen des Windnachweises. In: Mauerwerk-Kalender (1985), S. 95 114.

Autor

Annika Karl, B. Eng

Studium:

Seit März 2025	Masterstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg
Oktober 2021 – Februar 2025	Bachelorstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg

Berufserfahrung:

Seit März 2025	Studentische Hilfskraft im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau, OTH Regensburg
Seit März 2024	Werkstudentin bei ZM-I Regensburg
September 2022 – November 2022	Werkstudentin bei SSF Ingenieure in Regensburg

Betreuer

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

Die Arbeit wird mit dem 3. Preis ausgezeichnet.

AG/AGCL-CHLORIDSENSOREN FÜR DIE UNTERSUCHUNG DES CHLORIDEINDRINGVERHALTENS IN ZEMENTMÖRTEL ENTWICKLUNG UND ANWENDUNG IM DIFFUSIONSVERSUCH UND RCM-TEST

Masterarbeit

Manuel Kohl

Seit den frühen 1990er Jahren wird der Einsatz ionenselektiver Elektroden (Ag/AgCl-Elektroden) zur Bestimmung des Chloridgehalts in Zementmörteln über elektrochemische Potentialmessung untersucht. Im Zuge dieser Arbeit wurden Ag/AgCl-Elektroden selbst hergestellt und in Mörtelproben getestet. Dabei wurde untersucht, wie sich die chloridfreie Trockenlagerung im Mörtel, wie sie auch in der Praxis in Betonstrukturen vorkommt, auf die Performance der Elektroden auswirkt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Ag/AgCl Elektroden auch nach längerer Trockenlagerung und ohne Chloridvorkommen funktionsfähig sein können. Darüber hinaus wurde die Eignung von selbst hergestellten Chloridsensoren im Diffusionsversuch sowie erstmals im Rahmen eines Rapid Chloride Migration Tests (RCM-Test) aufgezeigt und bewertet. Im Rahmen der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit konnten Chloridprofile in Abhängigkeit der Zeit auch für den RCM-Test erstellt werden, wodurch die zugrunde liegenden Prozesse dieser Chloriduntersuchungen besser verstanden und bestehende Untersuchungsmethoden zur Messung der Chloridverteilung weiter optimiert und um einen zeitlichen Aspekt erweitert werden.

Keywords: Chloridinduzierte Korrosion, Chloridsensoren, RCM-Test, Ag/AgCl-Elektroden

Funktionsweise von Ag/AgCl-Elektroden

Die Messung der Chloridionenkonzentration durch Ag/AgCl-Sensoren basiert auf der elektrochemischen Reaktion zwischen Silber (Ag) und Silberchlorid (AgCl) des Ag/AgCl-Sensors und den Chloridionen (Cl^-) aus der zu untersuchenden Lösung. Die elektrochemische Reaktion führt zu einer Änderung des elektrischen Potentials, das gemessen und mit der Chloridionenkonzentration in Beziehung gesetzt werden kann.

Die Funktionsweise eines Ag/AgCl-Sensors lässt sich auf Grundlage der Nernst-Gleichung beschreiben. Die Nernst-Gleichung stellt eine Beziehung zwischen dem elektrochemischen Potential einer Elektrode und der Konzentration der beteiligten Ionen dar. Bezogen auf den Fall der Ag/AgCl-Elektrode in einer chloridhaltigen Lösung lautet die Nernst-Gleichung folgendermaßen [1]:

$$E_{Ag/AgCl} = E^0_{Ag/AgCl} - \frac{RT}{F}\ln(a_{Cl^-})$$

mit:

$E_{Ag/AgCl}$	=	Elektrodenpotential der Ag/AgCl-Elektrode
E^0	=	Normalpotential der Elektrode
R	=	Universelle Gaskonstante
T	=	Absolute Temperatur
F	=	Faraday-Konstante
a_{Cl^-}	=	Aktivität der Chloridionen

Für die Untersuchungen zu dieser Arbeit wurden Ag/AgCl-Elektroden hergestellt, getestet und validiert. Da Diffusionspotentiale einen bedeutsamen Einfluss auf die Messung und deren Auswertung haben, müssen die Fehler aus dem sog. junction potential beachtet und herausgerechnet werden. Zudem muss die Tatsache beachtet werden, dass die Umrechnung der Potentialdifferenzen mittels der Nernst-Gleichung zu einer Angabe der Chloridionenaktivität führt. Die Chloridionenkonzentration ergibt sich daher über eine weitere Umrechnung mittels des Aktivitätskoeffizienten der Chloride.

Ag/AgCl-Elektroden im Mörtel nach Trockenlagerung

Die Literatur beschreibt, dass das Potential der Ag/AgCl-Elektroden in alkalischer Umgebung bei gleichzeitiger Abwesenheit von Chloriden nicht definiert ist, da sich an der Elektrodenoberfläche Silberhydroxid oder Silberoxid bildet. Hierdurch können die Ag/AgCl-Elektroden untauglich hinsichtlich ihrer chloridsensitiven Eigenschaften werden. Langzeituntersuchungen zur Zuverlässigkeit in Mörtel bzw. Beton liegen jedoch nicht vor.

Im Rahmen der Untersuchungen zu dieser Arbeit wurden Ag/AgCl-Elektroden hergestellt und in Probekörper eingemörtelt, welche sieben Monate trocken gelagert und anschließend einer chloridhaltigen Lösung ausgesetzt wurden. Die ermittelten zeitlichen Verläufe der Chloridkonzentrationen sind in Abb.1 dargestellt.

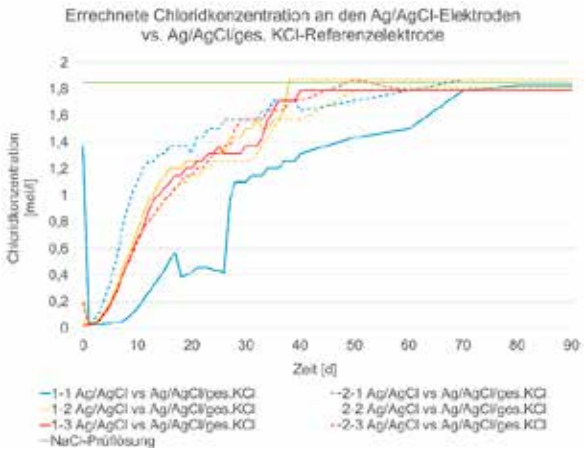


Abb. 1: Verlauf der Chloridkonzentration freier Chloride in der Porenlösung über 90 Tage.

Der Großteil der Ag/AgCl-Elektroden zeigt bereits in der ersten Stunde plausible, vergleichbare Potentiale und funktioniert offensichtlich auch nach sieben Monaten der Trockenlagerung, d.h. in dem Fall ohne die Lagerung in chloridhaltiger Lösung, wie sie prinzipiell für Ag/AgCl-Elektroden in der Literatur empfohlen wird.

Diffusionsversuch

Für das Monitoring des Chlorideindringens im Zuge eines Diffusionsversuches wurden Chloridsensoren auf Basis von Ag/AgCl-Elektroden hergestellt und in Mörtelproben untersucht. Abbildung 2 zeigt einen Chloridsensor vor dem Einbau in die Probekörper.



Abb. 2: Chloridsensor vor dem Einbau.

Die aus der Messung der Potentialdifferenz der Ag/AgCl-Elektroden zur Referenzelektrode errechneten Chloridkonzentrationen sind in nachfolgender Abbildung 3 über die Versuchsdauer von 73 Tagen dargestellt.

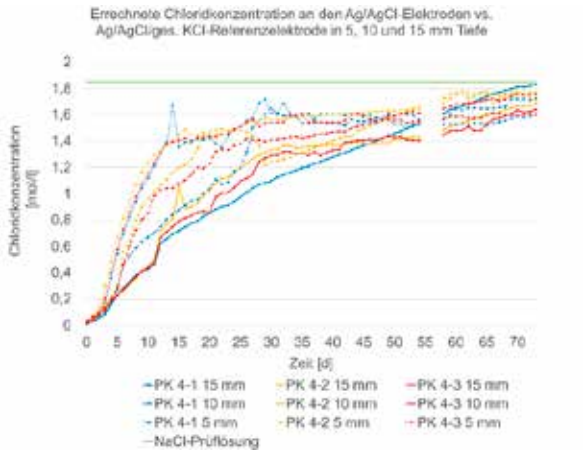


Abb. 3: Verlauf der Konzentration freier Chloride während des Diffusionsversuchs über die Zeit.

Die Chloridkonzentrationen des Gesamtchloridgehalts wurden mittels potentiometrischer Titration des Bohrmehls nach dem Diffusionsversuch in Masseprozent bezogen auf den Zement ermittelt. Durch weitere Umrechnungen konnte ein Vergleich der Chloridprofile aus den Chloridsensoren und den Bohrmehlproben vorgenommen werden.

Anwendung im RCM-Test

Der Rapid Chloride Migration Test, kurz RCM, dient der Ermittlung des Chloridmigrationskoeffizienten, welcher den Widerstand des geprüften Materials gegenüber dem Eindringen von Chloriden beschreibt und trotz der wesentlich kürzeren Versuchszeit gut mit Chloriddiffusionskoeffizienten übereinstimmt. Grund dafür ist die Beschleunigung des Ionentransports durch das beim RCM-Test angelegte elektrische Feld. Nach Ende der Spannungsbeaufschlagung wird der Probekörper gespalten und mittels Indikatorlösungen die Eindringtiefe der Front der freien Chloridionen ermittelt. Aus der untersuchten Eindringtiefe sowie weiteren Parametern wird der Chloridmigrationskoeffizient berechnet.

Im Rahmen dieser Forschungen wurde neben einem Diffusionsversuch ein RCM-Test durchgeführt, um die Möglichkeit des Monitorings eines solchen Versuchs zu evaluieren und so die Forschungsmethoden und -möglichkeiten bezüglich des Eindringens von Chloridionen in zementgebundene Baustoffe um einen zeitlichen Aspekt zu erweitern.

Die Abbildung 4 zeigt die Probekörper vor dem RCM-Test.



Abb. 4: Probekörper für den RCM-Test.

Die Chloridsensoren wurden bereits vor dem Mörtelvorgang in der Schalung so positioniert, dass ihre genaue Tiefenlage und der zugehörige Abstand zur Eindringfläche in den Mörtelproben bekannt waren. Diese exakte Positionierung ermöglichte es, die Chloridionenkonzentration über die Zeit in drei unterschiedlichen Tiefen zu monitoren. Ziel war es, das Eindringen der Chloride während des Tests sowie deren vertikale Verteilung im Mörtel zu verfolgen und zu quantifizieren.

Der RCM-Test wurde entsprechend den Vorgaben des „BAW Merkblatt Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC)“ von 2019 durchgeführt [2]. Eine Abweichung vom Standardverfahren des BAW-Merkblatts bestand in der periodischen Unterbrechung der

Stromzufuhr, da diese die Messungen der Potentialdifferenzen unmöglich machet und zu unverwertbaren Mischpotentialen führt. Im Rahmen dieses Versuchs wurde der Strom über die Versuchsdauer von 24 Stunden alle 30 Minuten für fünf Minuten abgeschaltet, um die Potentialdifferenzen der integrierten Chlorid-sensoren zu messen. Diese Messungen erfolgten im Abstand von 30 Sekunden.

Die Messungen der Potentiale der Chloridsensoren im Zuge des RCM-Tests wurden anschließend in Chloridkonzentrationen umgerechnet und sind über die Versuchsdauer von 24 Stunden in nachfolgender Abbildung 5 dargestellt.

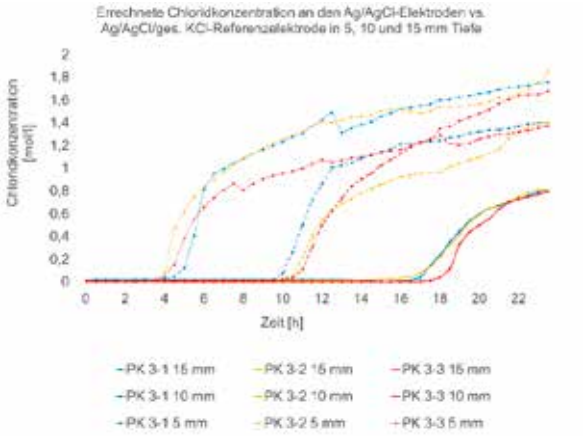


Abb. 5: Verlauf der Konzentration freier Chloride während des RCM-Tests über die Zeit.

Dabei ist deutlich zu erkennen, wie die Chloridfront im Rahmen des RCM-Tests zeitlich voranschreitet. Die Steigung jeder Kurve kann als Eindringgeschwindigkeit der freien Chloride in die Tiefenebenen der Mörtelproben betrachtet werden. Während diese Geschwindigkeit der Zu-nahme der freien Chloride in der Ebene bei 5 mm schnell und nahezu sprunghaft ansteigt, geht sie mit zunehmender Tiefe zurück.

In der Regel werden die Probekörper nach einem RCM-Test gespalten, die Eindringtiefe mittels Indikatorlösung ermittelt und anschließend Chloridprofile auf Grundlage von Bohrmehlanalysen erstellt. Über die mittlere Eindringtiefe wird dann der Chloridmigrationskoeffizient errechnet, welcher als Vergleichsgröße verschiedener Probekörper herangezogen wird. Dies stellt allerdings nur eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt am Testende dar. Die Komponente des zeitlichen Verlaufs ist eine gänzliche Neuerung in der RCM-Methodik. Daher sind in der Literatur keine Daten, die einen direkten Vergleich über das Eindringverhalten der Chloride im Zusammenhang mit dem zeitlichen Verlauf zulassen würden, verfügbar.

Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit bietet weitere, die Literatur ergänzende Einblicke in die Potentiale von einmörtelbaren Chloridsensoren auf Basis von Ag/AgCl-Elektroden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Ag/AgCl-Elektroden auch nach längerer Trockenlagerung und ohne Chloridvorkommen weiterhin funktionsfähig sein können, was das allgemeine Verständnis der Reaktionen und der Dauerhaftigkeit dieser Elektroden unter realen Bedingungen erweitert. Die Untersuchung der Chloridfront sowie der Chloridprofile im RCM-Test zeigte interessante Ergebnisse, insbesondere die Veränderung der Eindringgeschwindigkeit der freien Chloride mit zunehmender Tiefe. Außerdem besteht die Hauptfehlerquelle solcher Potentialmessungen im Einsatz von externen Referenzelektroden, wodurch es zu deutlichen Messfehlern durch sog. Diffusionspotentiale kommt. Daher zeigen diese Untersuchungen einen Versuch der Herstellung einer einmörtelbaren Referenzelektrode auf, wodurch der Abstand zwischen Chloridsensoren und Referenzelektrode deutlich reduziert werden kann. Insgesamt stellt diese Arbeit einen weiteren Schritt in die detaillierte Erforschung zum Einsatz von Ag/AgCl-Elektroden im Rahmen von Chlorideindringversuchen im Beton dar, wobei weitere Studien unter den verschiedensten Bedingungen erforderlich sind, um die langfristige Funktionalität und die Einflussfaktoren auf das Verhalten der Elektroden sowie die Eignung für Chloriduntersuchungen wie den RCM-Test zu evaluieren.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1]: Femenias, Y. S., Angst, U., Caruso, F., & Elsener, B. (2016). Ag/AgCl ion-selective electrodes in neutral and alkaline environments containing interfering ions. Materials and Structures, 49(7), 2637–2651. https://doi.org/10.1617/s11527-015-0673-8.

[2]: Bundesanstalt für Wasserbau. (2019). BAWMerkblatt Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC).

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Femenias, Y. S., Angst, U., Caruso, F., & Elsener, B. (2016). Ag/AgCl ion-selective electrodes in neutral and alkaline environments containing interfering ions. Materials and Structures, 49(7), 2637–2651. https://doi.org/10.1617/s11527-015-0673-8.
2. Tang, L. (1996). Chloride Transport in Concrete - Measurement and Prediction [Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Building Materials]. https://research.chalmers.se/en/publication/1267.
3. Elsener, B., Zimmermann, L., & Böhni, H. (2003). Non destructive determination of the free chloride content in cement based materials. Materials and Corrosion, 54, 440–446. https://doi.org/10.1002/maco.200390095.
4. Drenkard, H., & Fischer, C. (2023). Untersuchungen zur Ladungsmessung als Prüfmethode zur Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton. Ce/Papers, 6(6), 1230–1236. https://doi.org/10.1002/cepa.2973.

Autor

Manuel Kohl

2023 – 2025 Technische Hochschule Würzburg - Schweinfurt
Master Integrales Planen und Bauen – Schwerpunkt Forschung

2018 – 2022 Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg - Schweinfurt
Bachelor Bauingenieurwesen

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen der Technischen Hochschule Würzburg - Schweinfurt an der Professur für Werkstoffe im Bauwesen unter der Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Christian Fischer.

Die Arbeit wird mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

VERTIEFTE UNTERSUCHUNGEN ZUM VERFORMUNGS-VERHALTEN VON GRÜNDUNGEN AUF VERBESSERTEN BÖDEN MIT CSV-SÄULEN

Masterarbeit

Markus Meier

Das CSV-Verfahren ist ein Bodenverbesserungsverfahren, welches die Ausführung von Flachgründungen auf geringtragfähigen fein- und gemischtkörnigen Böden ermöglicht. Hierbei ist eine verlässliche Setzungsprognose von besonderer Bedeutung, um die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks sicherzustellen. Im Rahmen der Arbeit sind dazu Setzungsberechnungen nach DIN 4019 und der Methode der finiten Elemente durchgeführt worden. Die FEM-Berechnung bietet den großen Vorteil, dass das Bodenverhalten durch höherwertige Materialmodelle besser nachgebildet werden kann, wodurch eine genauere Setzungsberechnung ermöglicht wird. Die Ergebnisse zeigen dabei, dass eine FEM-Modellierung einer Berechnung nach DIN 4019 vorgezogen werden sollte. Zudem wurde der Einfluss der Fundamentgröße auf die zu erwartenden Setzungen untersucht. Die Ergebnisse der Parameterstudie erlauben, anhand einer Berechnung nach DIN 4019 auf die Setzungen einer genaueren FEM-Berechnung zu schließen. Somit kann auch ohne eine aufwendige FEM-Modellierung, eine wirtschaftliche Optimierung der Gründung vorgenommen werden.

Keywords: CSV-Verfahren, Baugrundverbesserung, FEM, DIN 4019, Setzungsberechnung, Dehnungsabhängigkeit Steifemodul

1 CSV-Verfahren

Bodenverbesserungsmaßnahmen erlauben den Einsatz von Flachgründungen auch auf geringtragfähigen Böden und stellen damit eine wirtschaftliche Alternative zu Pfahlgründungen dar.

Beim CSV-Verfahren werden Stabilisierungssäulen im Verdrängungsverfahren hergestellt. Neben Kalksäulen (Typ A), welche lediglich der Bodenverbesserung dienen, kommen auch Säulen des Typs B, die hydraulische Bindemittel enthalten zum Einsatz. Die Masterarbeit befasst sich hierbei lediglich mit letzteren. Neben der bodenverbessernden Wirkung durch Verdrängung und Verdichtung sowie Wasserentzug, können diese Säulen auch selbst Lasten abtragen [1].

Das Einsatzgebiet der CSV-Säulen umfasst weiche bis steife feinkörnige Böden. In gemischtkörnigen Böden ist die Herstellung möglich, sofern der grobkörnige Anteil verdrängt werden kann. Bei einer flüssigen bis weichen Konsistenz ist die Herstellungstechnik anzupassen [1].

2 Ziel der Arbeit

Im Rahmen der Masterarbeit ist das Verformungsverhalten von Flachgründungen auf mit CSV-Säulen verbesserten Böden untersucht worden. Ziel der Arbeit ist die verlässliche Prognose der Setzungen einer schwimmenden Gründung. Hierzu wird eine Berechnung nach DIN 4019 mit den Ergebnissen einer numerischen Berechnung nach der Finite-Elemente-Methode verglichen.

Die Berechnungen wurden für die Gründung eines Funkturms in Lauben durchgeführt. Das quadratische Fundament weist eine Größe von 7,4 m × 7,4 m auf, und wurde auf 112 CSV-Säulen gegründet. Bei dem in einem bindigen Boden ausgeführten System handelt es sich um eine schwimmende Gründung, da die CSV-Säulen in keinen tragfähigen Boden einbinden.

3 Materialmodelle und -parameter

Bei der numerischen Modellierung von Gründungen ist die Wahl des verwendeten Stoffmodells von besonderer Bedeutung. Dieses muss in der Lage sein das nichtlineare Spannungs-Dehnungsverhalten in der Erstbelastung abzubilden. Zudem muss es die Zunahme des Steifemoduls mit der Tiefe berücksichtigen [2].

Für die Setzungsberechnungen sind das linear elastische Materialmodell, das Mohr-Coulomb'sche Materialmodell und das Hardening Soil Modell verwendet worden.

Die für diese Stoffmodelle benötigten Materialparameter sind aus einer Drucksondierung nach DIN EN 1997-2:2010-10 abgeleitet worden. Sofern dies nicht möglich war, wurden die Bodenparameter der Literatur entnommen.

Da die Bestimmung des Steifemoduls für eine realistische Setzungsprognose von großer Bedeutung ist, wurde neben der Spannungsabhängigkeit des Steifemoduls $E_s(\sigma)$ auch seine Dehnungsabhängigkeit berücksichtigt. Reitmeier [3] hat für einen vergleichbaren Boden dehnungsabhängige Steifebeiwerte $\nu(\delta)$ und Steifeexponenten $\omega(\delta)$ publiziert, welche für die Bestimmung des spannungs- und dehnungsabhängigen Steifemoduls $E_s(\sigma, \delta)$ herangezogen wurden.

4 Berechnung nach DIN 4019

Die Berechnung nach DIN 4019 erfolgte in Verbindung mit dem „Merkblatt für die Herstellung, Bemessung und Qualitätssicherung von Stabilisierungssäulen zur Untergrundverbesserung" [1] der DGGT gemäß der Ersatzflächenmethode.

Die Zunahme des Steifemoduls mit der Tiefe ist durch schichtweise konstante Steifemoduln approximiert worden. Die Gesamtsetzungen setzen sich aus der Zusammendrückung des als homogener Bodenblock betrachteten Bereichs oberhalb der Ersatzfläche und der Setzung eines fiktiven Fundaments in der Ersatzfläche zusammen. Da das Fundament des Funkturms als starres Fundament betrachtet werden kann, sind nur die Setzungen im kennzeichnenden Punkt zu ermitteln.

5 Berechnung nach der Methode der finiten Elemente

Die Setzungsberechnungen nach der Methode der finiten Elemente sind an zwei- und dreidimensionalen Modellen durchgeführt worden. Die zweidimensionale Modellierung wurde an einem rotationssymmetrischen Ersatzsystem mit dem Programm PLAXIS

vorgenommen. Dabei handelt es sich um ein flächengleiches Kreisfundament. Für die dreidimensionalen Modelle war es aufgrund der Symmetrie ausreichend, ein Viertel der Gründung nachzubilden. Die Berechnungen wurden mit dem Programm Ansys ausgeführt.

Bei den numerischen Berechnungen in PLAXIS sind höherwertige Stoffmodelle mit Erfolg eingesetzt worden. In Ansys lieferte jedoch nur das linear elastische Materialmodell brauchbare Ergebnisse, da eine geeignete Nachbildung der Bauphasen, wie in PLAXIS, fehlgeschlagen ist. Die FEM-Berechnungen umfassen die Varianten Ersatzflächenmethode, Modellierung des verbesserten Bereichs als homogener Bodenblock (vgl. Abb. 1) und die Modellierung der einzelnen CSV-Säulen. Letztere Variante ist nur im Dreidimensionalen möglich.

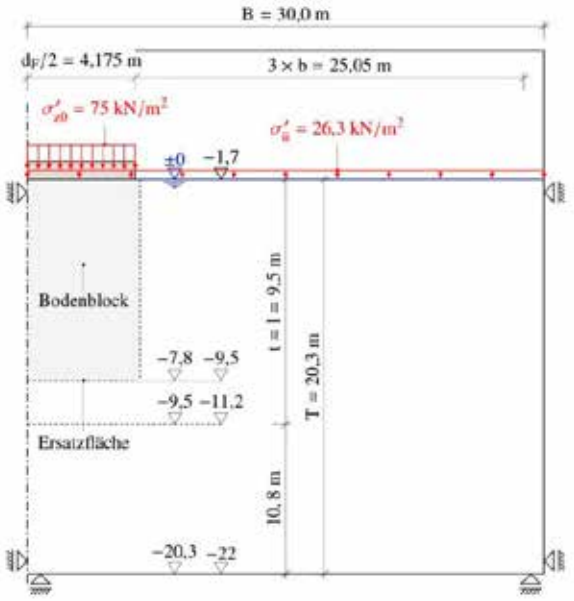


Abb. 1: Rotationssymmetrisches Modell der Gründung bei einer Modellierung des verbesserten Bodenbereichs als homogener Bodenblock

Der zeitliche Verlauf der Errichtung wurde durch drei Bauphasen nachgebildet. Zunächst ist der Ausgangsspannungszustand ermittelt worden. Daran anschließend erfolgte der Einbau der CSV-Säulen. Als letztes ist die Bauwerkslast aufgebracht worden.

6 Bewertung der Ergebnisse

Im Vergleich zu einer herkömmlichen Flachgründung ohne Bodenverbesserung lassen sich die zu erwartenden Setzungen durch die CSV-Säulen um rund 60 % verringern. Dabei handelt es sich um eine signifikante Verbesserung, durch welche die Gebrauchstauglichkeit des Funkturms gewährleistet werden kann.

Die dreidimensionalen numerischen Berechnungen zeigen, dass sich die Setzungen bei einer Modellierung als homogener Bodenblock und der einzelnen CSV-Säulen kaum unterscheiden. Zudem belegt die Modellierung der einzelnen CSV-Säulen, dass sich tatsächlich ein Bodenblock ausbildet. Somit eignet sich zur Setzungsprognose das deutlich einfachere Modell des homogenen Bodenblocks, wenngleich dessen Ausbildung aufgrund der schlechteren geometrischen Nachbildung überschätzt wird. Ferner lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass sich der Bodenblock relativ zum umliegenden Boden stärker setzt (vgl. Abb. 2).

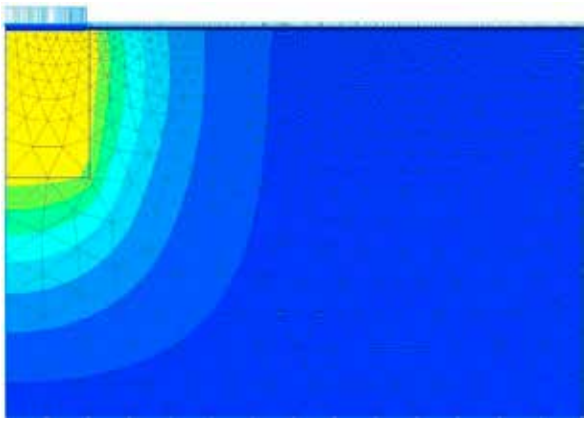


Abb. 2: Verformungen der Gründung bei einer rotationssymmetrischen Modellierung des homogenen Bodenblocks

Des Weiteren weisen die rotationssymmetrischen Modellierungen höhere Verformungen als die zugehörigen dreidimensionalen Modelle auf. Sofern eine zweidimensionale Berechnung bauwerksverträgliche Setzungen liefert, kann dieses Ergebnis somit auch auf das tatsächliche Fundament übertragen werden.

Der Einsatz von höherwertigen Stoffmodellen, insbesondere des Hardening Soil Modells ist grundsätzlich vorteilhaft. Da im vorliegenden Fall jedoch einige Materialparameter dieser Modelle abgeschätzt werden mussten, konnte durch diese gegenüber dem linear elastischen Materialmodell kein signifikanter Genauigkeitsgewinn erzielt werden.

Die zweidimensionalen Modellierungen des Bodenblocks zeigen, dass bei der vorliegenden Gründungskonfiguration kaum plastische Verformungen infolge Bodenversagens auftreten.

Durch die Berücksichtigung der Dehnungsabhängigkeit des Steifemoduls sind Setzungen berechnet worden, die um ca. 25 % bis 30 % geringer sind, als jene, welche lediglich mit dem spannungsabhängigen Steifemodul bestimmt wurden. Dies zeigt, dass die Berücksichtigung der Dehnungsabhängigkeit zu einer signifikanten Verbesserung in der Setzungsprognose führt und damit, sofern möglich, immer bei Setzungsberechnungen beachtet werden sollte. Dies erlaubt es andere Gründungsmaßnahmen in Betracht zu ziehen, z. B. statt einer Pfahlgründung eine Baugrundverbesserungsmaßnahme.

7 Parameterstudie

Im Rahmen der Masterarbeit ist zudem eine Parameterstudie, in welcher der Einfluss der Fundamentgröße auf die zu erwartenden Setzungen im kennzeichnenden Punkt untersucht wurde (vgl. Abb. 3), durchgeführt worden. Die Abbildung erlaubt anhand einer Berechnung nach DIN 4019 auf die genaueren Ergebnisse einer Berechnung nach der Methode der finiten Elemente zu schließen.

8 Zusammenfassung

In der Arbeit sind verschiedene Varianten der Setzungsprognose von Flachgründungen auf mit CSV-Säulen verbesserten Böden verglichen worden. Dabei konnte gezeigt werden, dass sowohl eine einfache und schnell auszuführende Berechnung gemäß der Ersatzflächenmethode und der DIN 4019, als auch aufwendigere aber genauere Berechnungen nach der Methode der finiten Elemente für die Praxis von Bedeutung sind. Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass eine dreidimensionale FEM-Modellierung im Vergleich zu einer zweidimensionalen Modellierung des flächengleichen Kreisfundaments keine signifikante Verbesserung in der Setzungsberechnung liefert, weshalb eine zweidimensionale Modellierung, auch aufgrund des geringeren Modellierungsaufwands, praxistauglicher ist. Sofern die Anwendungsgrenzen es zulassen, bietet sich jedoch auch eine Berechnung nach DIN 4019 und der Ersatzflächenmethode in Verbindung mit Abbildung 3 an.

Auch wenn die genaueren Setzungsprognosen nach der Methode der finiten Elemente im Planungsstadium mit einem höheren Aufwand einhergehen, weisen diese den Vorteil der wirtschaftlichen Optimierung des Gründungssystems auf, da eine Überbemessung vermieden werden kann. Mögliche Optimierungen umfassen geringere Säulenlängen oder größere Säulenabstände, wodurch der Ressourceneinsatz verringert wird.

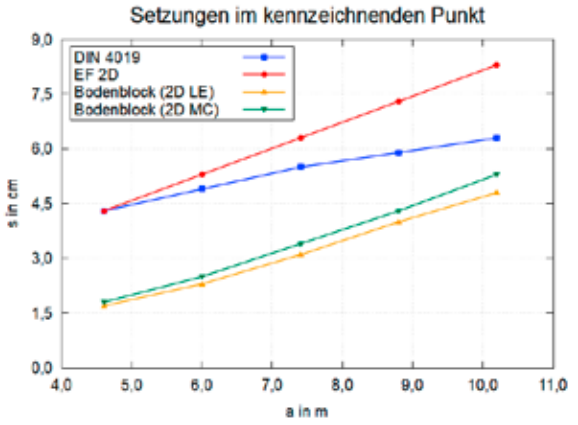


Abb. 3: Setzung s im kennzeichnenden Punkt in Abhängigkeit der Fundamentbreite a verschiedener Berechnungsvarianten

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1]: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. Hrsg. (o. J.): *Merkblatt für die Herstellung, Bemessung und Qualitätssicherung von Stabilisierungssäulen zur Untergrundverbesserung, Teil I – CSV-Verfahren*, 1. Nachdruck Januar 2005. Essen.

[2]: EANG (2014): *Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik – EANG*, Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. Berlin: Ernst, ISBN: 978-3-433-03080-6.

[3]: Reitmeier, W. (2018): *Spannungs- und dehnungsabhängiger Steifemodul $E_s(\sigma,\delta)$ bei bindigen Böden*, Hrsg. Von Laumer GmbH & Co. CSV Bodenstabilisierung KG. Brasov.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Boley, C. Hrsg. (2019): *Handbuch Geotechnik, Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen*, 2. vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-03055-1.
2. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. Hrsg. (o. J.): *Merkblatt für die Herstellung, Bemessung und Qualitätssicherung von Stabilisierungssäulen zur Untergrundverbesserung, Teil I – CSV-Verfahren*, 1. Nachdruck Januar 2005. Essen.
3. DIN 4019:2015-05 (2015): *Baugrund – Setzungsberechnung*. Berlin: Beuth Verlag.
4. DIN EN 1997-2:2010-10 (2010): *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds; Deutsche Fassung EN 1997-2:2007 + AC:2010*. Berlin: Beuth Verlag.
5. EANG (2014): *Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik – EANG*, Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. Berlin: Ernst, ISBN: 978-3-433-03080-6.
6. Reitmeier, W. (2018): *Spannungs- und dehnungsabhängiger Steifemodul $E_s(\sigma,\delta)$ bei bindigen Böden*, Hrsg. Von Laumer GmbH & Co. CSV Bodenstabilisierung KG. Brasov.

Autor

Markus Meier, M.Eng.

Studium:	
März 2023 – September 2024	Master Bau- und Umweltingenieurwesen, TH Deggendorf
Oktober 2019 – März 2023	Bachelor Umweltingenieurwesen, TH Deggendorf
Berufserfahrung:	
Seit Oktober 2024	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Universität der Bundeswehr München
März 2022 – Januar 2024	Tutor im Fach Thermodynamik, TH Deggendorf
Oktober 2020 – Juli 2021	Tutor im Fach Mathematik, TH Deggendorf

Betreuer

Die Masterarbeit wurde angefertigt an der Fakultät Bauingenieurwesen und Umwelttechnik der TH Deggendorf, Professor Dr.-Ing. Parviz Sadegh-Azar, Fachbereich Geotechnik
Weiterer Betreuer: Professor Dr.-Ing. Wolfgang Reitmeier

Die Arbeit wird mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

REAKTIVITÄT VON ZEMENTMEHL UND ZIEGELMEHL VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNG ZUR REAKTIVITÄT VON REZYKLIERTEM ZEMENTMEHL UND ZIEGELMEHL ALS REAKTIVEN ZUSATZSTOFF IN BETON/MÖRTEL

Masterarbeit

Johannes Paule

Ungebranntes, bei 750°C und 800°C reaktiviertes Zementmehl, sowie Ziegelmehl wurden für die Eignung als Betonzusatzstoff in Anteilen von 10, 20, 30 und 40 M.-% untersucht. Ziel ist es, durch auf dem Markt vorhandene RC-Baustoffe den Anteil an Neuzement im Beton zu reduzieren. Sowohl Mörtel- als auch Betonmischungen wurden auf Chlorideindringwiderstand, sowie Biegezug- und Druckfestigkeit getestet. Nach dem Brennen verändern sich die physikalischen Eigenschaften, was auf chemische Umwandlungen hinweist. Die Festigkeiten wurden nach 2, 7, 28 und 90 Tagen untersucht. Ungebranntes Zementmehl zeigte keinen positiven Einfluss, während gebranntes Zementmehl bei 10 und 20 M.-% Ersatzrate hohe Festigkeitswerte erreichte. Ziegelmehl zeigte hohe Festigkeitswerte bei geringeren Ersatzraten, sowie nach 90 Tagen auch bei 30 M.-%. Betonmischungen mit 10 und 20 M.-% RC-Mehl erreichten Druckfestigkeitswerte im Bereich der Referenz oder darüber. Die Ergebnisse des Chlorideindringwiderstandes zeigten den geringsten Wert bei ungebranntem Zementmehl, der mit der Substitutionsrate anstieg. Mischungen mit den gebrannten Zementmehlen und dem Ziegelmehl lagen nah beieinander, verschlechterten sich jedoch mit zunehmender Zementersatzrate. Nach 90 Tagen verbesserte sich der Chloridwiderstand der Ziegelmehlmischungen deutlich. Der Einsatz der RC-Baustoffe erwies sich insgesamt als vielversprechend im Hinblick auf mechanische Kennwerte und die Dauerhaftigkeit.

Keywords: Zementmehl, Ziegelmehl, RC-Mehl, Zementzusatzstoff, SCM, Beton

Betonzusatzstoff Zement- und Ziegelmehl

Gemäß aktuellem Stand der Normung ist ein Einsatz von Zement- und Ziegelmehl als Zementzusatzstoff nicht erlaubt. Ein Einsatz in der Betonherstellung wäre allerdings sinnvoll, um im Sinne der Stoffkreisläufe zu handeln sowie Neuzement und damit CO_2 einzusparen. Ein möglicher Einsatzbereich soll in dieser Masterarbeit untersucht werden. Gemahlener

RC-Beton, hier Zementmehl genannt, enthält große Mengen an Zementstein, nicht hydratisiertem Zement, Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) und Calciumcarbonat ($CaCO_3$), sowie quarzitische und carbonatische Gesteinsmehl- und Sandanteile. [1, 2] Wird das Zementmehl hohen Temperaturen ausgesetzt, kann die Zementhydratation teilweise reversibel gemacht und die ursprünglichen Klinkerphasen reaktiviert werden. Ab 400 °C beginnt die Dehydratation der C-S-H-Phasen, was das Lösen des chemisch gebundenen Wassers beschreibt. Zwischen 430 °C und 550 °C wird Portlandit ($Ca(OH)_2$) zu Calciumoxid (CaO) und Wasser (H_2O) zersetzt. Die für die Reaktivität wichtigen C_2S-Phasen werden ab 650 °C bis 900 °C neu gebildet. Decarbonatisierungsprozesse beginnen bei 600 °C und erreichen ihren Höhepunkt bei höheren Temperaturen. [3, 4, 5] Das Hauptziel der thermischen Aufbereitung ist die Wiederherstellung der C_2S-Verbindungen, da diese bei vergleichsweise moderaten Temperaturen wiederhergestellt werden können. Durch den Ersatz von Zement mit diesen rezyklierten Betonmehlen kann in der Baupraxis Zement eingespart und die Umweltbilanz verbessert werden, die sich aus kurzen Transportwegen, der Mahlbarkeit und der Brenntemperatur zusammensetzt.

Ziegelmehl zeigt in verschiedenen Studien als Betonzusatzstoff puzzolanische Aktivität, die mit der Feinheit und damit auch mit der spezifischen Oberfläche des Materials steigt. Diese Aktivität verbessert die Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit von Betonen langfristig. Die spezifische Oberfläche von Ziegelmehl beeinflusst die Verarbeitbarkeit, Fließfähigkeit und Druckfestigkeit der Zementmischungen.

Versuchsprogramm

In dieser Masterarbeit wurden Ziegelmehl sowie ungebranntes und bei 750 °C und 800 °C gebranntes Zementmehl hinsichtlich ihrer Eignung als Zementzusatzstoff untersucht. Rezyklierter Betonsand (0/2) wurde in einer Kugelmühle für 10 Minuten bei 300 U/Min zu Mehl gemahlen. Die anschließende thermische Behandlung erfolgte in einem Muffelofen. Nach einem Aufheizvorgang von ca. 1,5 Stunden wurden die gewünschten Temperaturen von 750 °C und 800 °C für 2 Stunden gehalten. Um eine möglichst hohe Reaktivität zu erreichen, wurde das Mehl unverzüglich aus dem Ofen geholt.

Die Reindichten der verschiedenen Mehle wurden mithilfe eines He-Gaspyknometers gemessen. Die Bestimmung der spezifischen Oberfläche erfolgte durch das Luftdurchlässigkeitsverfahren nach Blaine. Für die Mörtel- /Betonmischungen wurden jeweils 10, 20, 30 und 40 M.-% des Zementes (CEM I 42,5 N) mit dem jeweiligen Stoff substituiert und mit einer Referenz verglichen. Es wurden Mörtel mit den o.g. Substitutionsraten mit einem w/b-Wert von 0,5 hergestellt. Die verschiedenen Mischungen wurden auf ihre Druck- und Biegezugfestigkeit nach 2, 7 und 28 Tagen untersucht. Für die Referenz als auch das Ziegelmehl wurden zusätzlich die Festigkeiten nach 90 Tagen geprüft. Mit den beiden gebrannten Zementmehlen wurden zusätzlich Betonprüfkörper zur Druck- und Zugfestigkeitsprüfung nach 28 Tagen hergestellt. Des Weiteren wurden die Mörtelmischungen auf ihren Chloridwiderstand geprüft. Dies erfolgte nach 28 Tagen mit allen Proben und erneut nach 90 Tagen mit der Referenzmischung und dem Ziegelmehl. Die Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel wie auch die Konsistenz des Frischbetons wurde mithilfe von Ausbreitversuchen dokumentiert. Der Luftgehalt der Mischungen wurde mit einem Luftgehaltprüfgerät (LP-Topf) gemessen.

Die Bezeichnung der Proben erfolgte nach dem Schema „Kurzbezeichnung_Ersatzmenge_Probenalter“, beispielsweise „SCM800_30_7d“, was die Mischung mit 800 °C gebrannten Zementmehl in 30 M.-% Zementersatz nach 7 Tagen beschreibt. Bei den unterschiedlichen Substitutionsraten wurde der Zement durch RC-Mehle ersetzt. Alle Probekörper wurden bis zur Prüfung Unterwasser gelagert. Die Festmörteldichte wurde mithilfe des

archimedischen Prinzips (Tauchwägung) bestimmt. Die Bestimmung der Biegezug- sowie Druckfestigkeit erfolgte für die Mörtelmischungen gemäß DIN EN 196-1. Die Betonproben wurden auf Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 untersucht.

Der Rapid Chloride Migration (RCM)-Versuch wurde nach dem BAW-Merkblatt „Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC)“ durchgeführt, wie in Abb. 1 dargestellt ist.

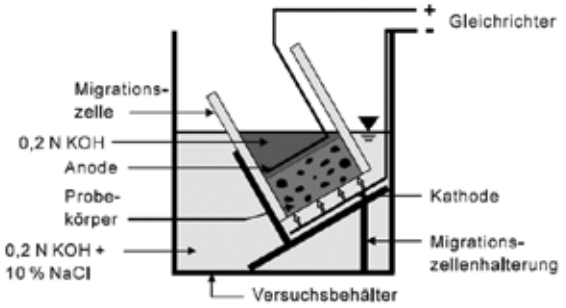


Abb. 6: Schematischer Versuchsaufbau des RCM-Versuchs

Die Proben wurden in eine spezielle Zelle eingesetzt, die so konstruiert war, dass die Probe als Trennung zwischen einer anodischen (Natriumhydroxid) und einer kathodischen (Natriumchlorid) Lösung fungiert. Ein elektrisches Feld wurde erzeugt, indem eine Spannung von 30 V über die Probe angelegt wurde. Nach Abschluss des Versuchs wurden die Proben aus der Zelle entnommen und gespalten. Mithilfe eines Indikators konnte die Eindringtiefe der Chloridionen bestimmt werden.

Ergebnisse und Auswertung

Bei Verwendung von ungebranntem Zementmehl nahm die Biegezugfestigkeit bei Mörtelmischungen mit steigender Ersatzrate ab. Nach 2 Tagen lagen die Werte bei einer Zementersatzrate von 10 M.-% noch nahe an der Referenz. Die Biegezugwerte unter Verwendung von SCM750 nach 2 und 7 Tagen bei einer Ersatzrate von 10 M.-% überstiegen die Referenzwerte. Nach 28 Tagen lagen jedoch alle Rezepte mit Substitution unter den Referenzwerten. Die ermittelte Dichte der Mischungen mit 20 M.-% Ersatz war deutlich geringer als die der 7 Tage alten Probe. Dadurch war auch der Festigkeitsverlust erklärbar. Vergleiche der Aushärtezeiten zeigten, dass die größten Veränderungen im Zeitraum zwischen 2 und 7 Tagen auftraten. Verglichen mit der Literatur sind die Festigkeiten nach 28 Tagen besonders bei den beiden geringeren Ersatzraten als hoch einzustufen. Rezepte mit SCM800 zeigten ein ähnliches Verhalten wie SCM750. Zwischen 2 und 7 Tagen waren die meisten Reaktionen festzustellen, welche die Biegezugfestigkeit beeinflussen. Eine höhere Ersatzrate von 30 M.-% zeigte die besten Ergebnisse, was möglicherweise durch die Dichte der Probe erklärt werden kann. Die Biegezugfestigkeiten der Mörtelmischungen mit Ziegelmehl zeigten zunächst geringere Werte als die Referenz, aber eine positive Festigkeitsentwicklung über die Aushärtungszeit, was auf die puzzolanische Wirkung des Mehls zurückzuführen ist. Auch eine höhere spezifische Oberfläche des Ziegelmehls und daraus folgende Verdichtung der Porenstruktur hat einen positiven Einfluss. Nach 90 Tagen lag die Mischung mit 10 M.-% über dem Wert der Referenz. Die Mischung mit 40 M.-% Zementersatz wies nach 90 Tagen knapp 90 % der Biegezugfestigkeit des Referenzmörtels auf was auf die positiven Einwirkungen des Ziegelmehls und die Puzzolanität hinweist, da sie nach 2 Tagen noch bei etwa 50 % liegt. Nach 28 Tagen wiesen Mischungen mit Ziegelmehl bei allen Substitutionsraten die höchsten Werte auf. Nach 2 und 7 Tagen zeigte das bei 750 °C gebrannte RC-Mehl bessere Eigenschaften bei geringeren Ersatzraten, während bei höheren Raten über 20 M.-% das mit 800 °C behandelte überlegen war. Das ungebrannte Mehl hat keinen positiven Einfluss auf die Biegezugfestigkeit.

Dies bestätigte sich auch in den Ergebnissen der Druckfestigkeitsprüfung der Mörtelmischungen, was auf einen hohen inerten Anteil (Füllerwirkung) hinweist. Hohe Festigkeiten wurden bei 10 und 20

M.-% Ersatz erreicht, wobei der größte Festigkeitszuwachs zwischen 2 und 7 Tagen erfolgt. Rezepte mit 800 °C gebranntem Mehl erreichten nach 7 Tagen mit 10 M.-% Ersatz fast die Referenzfestigkeit, lagen bei höheren Substitutionsraten darunter. Bei Einsatz von Ziegelmehl sank die Druckfestigkeit ebenfalls, was durch einen hohen Referenzwert relativiert wurde. Die Werte waren im Vergleich zu anderen Studien hoch, was auf die hohe spezifische Oberfläche zurückzuführen ist. Der puzzolanische Effekt war besonders bei Mischungen mit hohem Ziegelmehlanteil erkennbar, wobei die Festigkeit bei einer Substitutionsmenge von 40 M.-% von ca. 40 % nach 2 Tagen auf ca. 70 % nach 90 Tagen steigt. Nach 90 Tagen übertrafen alle Mischungen den Wert von 42,5 N/mm², was der Normfestigkeit für Zement CEM I 42,5 N entspricht. Im Vergleich aller Mischungen zeigten die Rezepte mit thermisch behandeltem RC-Mehl nach 2 und 7 Tagen die höchsten Druckfestigkeiten unter den modifizierten Mischungen, teilweise übertrafen sie sogar die starke Referenz. Nach 28 Tagen wiesen die Rezepturen mit Ziegelmehl die höchsten Festigkeiten auf. Die Betonmischungen wiesen bei einer Zementsubstitution von 10 und 20 M.-% ähnliche Werte wie die Referenz auf, teilweise wurde diese übertroffen. Dies lässt sich durch ein dichteres Korngefüge erklären, da die Füllereigenschaften durch den Einsatz des Mehls verbessert werden.

In der Untersuchung des Chlorideindringwiderstands wiesen die Proben mit ungebranntem Zementmehl nach 28 Tagen die höchste Chloridmigration auf. Proben mit Ziegelmehl und temperaturbehandeltem Zementmehl zeigten zwar bessere Werte, aber mit steigender Substitutionsrate erhöhte sich der Chlorideintrag im Vergleich zu den Referenzen. Ziegelmehlmischungen wurden aufgrund des möglichen puzzolanischen Effekts zusätzlich nach 90 Tagen untersucht. Es zeigte sich eine puzzolane Wirkung und die Werte nach 90 Tagen lagen, unabhängig von der Substitutionsmenge, etwa gleichauf oder waren besser als die der Referenz. Der Al_2O_3-Gehalt, welcher für die Bindungskapazität der Chloridionen entscheidend ist, ist beim Ziegelmehl am höchsten. Dies könnte erklären, warum Mischungen mit Ziegelmehl am chloridwiderstandsfähigsten sind.

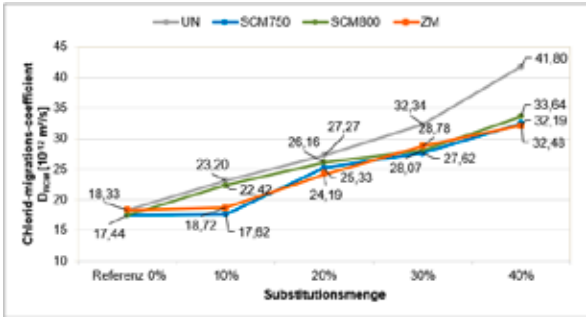


Abb. 7: RCM-Ergebnisse, Vergleich nach 28d

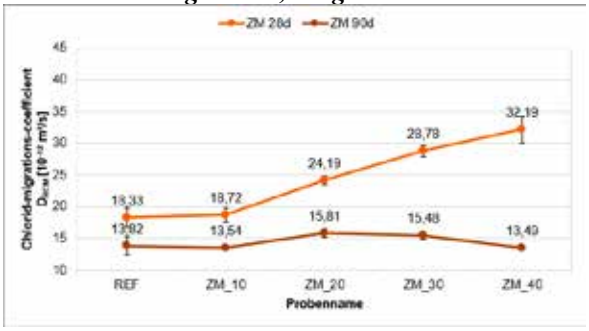


Abb. 8: RCM-Ergebnisse, Vergleich Ziegelmehl 28d, 90d

Fazit und Ausblick

Mischungen mit verringertem Zementeinsatz und Substitution durch recycelte Materialen wirken auf den ersten Blick wie ein Rundum-Sorglos-Paket. Jedoch stellen sich bei genauerer Betrachtung noch einige Herausforderungen diesem Ziel entgegen. Der teilweise Ersatz von Zement durch vorhandene RC-Baustoffe erwies sich jedoch insgesamt als vielversprechend im Hinblick auf mechanische Kennwerte und die Dauerhaftigkeit, wie in dieser Arbeit gezeigt wurde. Ein Einsatz in Betonen und Einsatzbereichen von Zement mit geringen Anforderungen (bspw. Mörtel, Estrich, Magerbeton) kann unter bestimmten Bedingungen bereits jetzt realistisch erreicht werden. Das Ziel sollte jedoch der Einsatz in Normalbetonen sein. Dies würde eine effektive CO_2-Einsparung bedeuten und den ökologischen Fußabdruck der Bauindustrie verbessern.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1]: Chen, X. et al. (2019) Study on Recycled Concrete Powders as Mineral Admixture in Recycled Concrete in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 330, S. 22113. https://doi.org/10.1088/1755-1315/330/2/022113

[2]: NOBIS, C.; VOLLPRACHT, A. Forschungsbericht F 7099: Verwendung von Recyclingmaterial in der Betonproduktion - Sachstand in: Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. 2015.2

[3]: Sérgio C. Angulo et al. REHYDRATION OF CEMENT FINES: A TG /CALORIMETRY STUDY.

[4]: Alexandre Bogas, J.; Carriço, A.; Real, S. (2021) Thermoactivated Recycled Cement in: Sustainability of concrete with synthetic and recycled aggregates [Working Title]. IntechOpen.

[5]: Alonso, C.; Fernandez, L. (2004) Dehydration and rehydration processes of cement paste expose to high temperature environments in: Journal of Materials Science 39, H. 9, S. 3015–3024. https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000025827.65956.18

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Serpell, R.; Lopez, M. (2015) Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials in: Cement and Concrete Composites 64, S. 16–26.
2. Alexandre Bogas, J.; Carriço, A.; Real, S. (2021) Thermoactivated Recycled Cement in: Sustainability of concrete with synthetic and recycled aggregates [Working Title]. IntechOpen.
3. Serpell, R.; Zunino, F. (2017) Recycling of hydrated cement pastes by synthesis of α′H-C2S in: Cement and Concrete Research 100, S. 398–412.
4. Real, S. et al. (2020) Influence of the Treatment Temperature on the Microstructure and Hydration Behavior of Thermoactivated Recycled Cement in: Materials (Basel, Switzerland) 13, Nr. 18.
5. Shui, Z. et al. (2009) Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures.
6. He, Z. et al. (2023) Reusing thermoactivated construction waste spoil as sustainable binder for durable concrete: Microstructure and chloride transport in: Construction and Building Materials 398, S. 132553.
7. Rahhal, V. F. et al. (2019) Complex Characterization and Behavior of Waste Fired Brick Powder-Portland Cement System in: Materials (Basel, Switzerland) 12, Nr. 10.
8. Irki, I. et al. (2018) Effect of Blaine fineness of recycling brick powder replacing cementitious materials in self compacting mortar in: Journal of Adhesion Science and Technology 32, H. 9, S. 963–975. https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1393202

Autor

Johannes Paule, Master of Engineering - Allgemeines Bauingenieurwesen, Maurer

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt in der Fakultät 02 Bauingenieurwesen der Hochschule München, Dr. rer. nat. Kai Tandon, M.-Sc. Benjamin Wolf, Professorin Dr.-Ing. Andrea Kustermann

Die Arbeit wird mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ENTWICKLUNG EINES KONZEPTES ZUR OPTIMIERUNG VON STOFFSTRÖMEN (AUSGENOMMEN: BODEN-MATERIAL) ZWISCHEN BAUSTELLEN ZUR ABFALL-VERRINGERUNG INKL. UMSETZUNG ALS EXCEL-TOOL

Bachelorarbeit

Erik Rechenberg

Auf Baustellen entstehen aus verschiedenen Gründen Restmengen von Baumaterialien, die kostenpflichtig entsorgt werden müssen. Dies hat höhere Baukosten und gesteigerte Treibhausgasemissionen zur Folge. Die Bachelorarbeit entwickelt ein Konzept zur Nutzung dieser Restmengen und setzt dieses in Form eines Excel-Tools um. Dabei werden u.a. die relevanten EU-Richtlinien wie die „Corporate Sustainability Reporting Directive“ (CSRD), die „European Sustainability Reporting Standards“ (ESRS) und die „Corporate Sustainability Due Diligence Directive“ (CSDDD) berücksichtigt.

Kern des Tools ist ein prozessgesteuertes System, das den Austausch überschüssiger Materialien zwischen Baustellen ermöglicht, organisiert und dokumentiert. Es identifiziert und erschließt sowohl finanzielle als auch ökologische Optimierungspotenziale. Das Tool ist benutzerfreundlich, intuitiv bedienbar und bereits so entwickelt, dass zukünftige Erweiterungen problemlos integriert werden können. Es wurde mit einer offenen Architektur gestaltet, die es ermöglicht, es sowohl in kleinen als auch großen Unternehmen sowie Unternehmensverbünden zu nutzen.

Das entwickelte System leistet einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierung der Baubranche. Es bietet erstmals eine datenbasierte Übersicht über die Restmengen auf Baustellen und ermöglicht so eine Reduktion von Baukosten und Abfallmengen. Zudem trägt das Tool zur Senkung von Treibhausgasemissionen bei und unterstützt Unternehmen bei der Umsetzung von EU-Richtlinien.

Keywords: Abfallvermeidung, Baubetrieb, Baumanagement, CO_2-Fußabdruck, Digitalisierung, EU-Richtlinien, Graue Energie, Kostenoptimierung, mittelständige Unternehmen, Nachhaltigkeit, Rationalisierung, Ressourceneinsparung, Standardisierung

Problemstellung und Zielsetzung

Aufgrund der stetig steigenden Anforderungen u.a. durch die im Rahmen des „Green Deal“ erarbeiteten Umweltauflagen der EU, ist die Einführung digitaler Systeme, die die Unternehmen bei der Umsetzung unterstützen, notwendig. Der European Green Deal, ist ein von der Europäischen Kommission im Jahr 2019 vorgestelltes Konzept mit dem Ziel bis 2050 in der Europäischen Union die Netto-Emissionen von Treibhausgasen auf null zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen, soll eine Kreislaufwirtschaft etabliert, das Wirtschaftswachstum von der Ressourcennutzung entkoppelt und der CO_2-Fußabdruck der einzelnen Branchen gesenkt werden. In diesem Zusammenhang bereits verabschiedete bzw. derzeit geplante Richtlinien (CSRD [1], ESRS, CSDDD [2], …) betreffen auch den Bausektor.

Infolgedessen hat das mittelständige Unternehmen „dechant hoch- & ingenieurbau gmbh“ die Einführung einer „Materialbörse“ in Betracht gezogen. Bei der „Materialbörse“ handelt es sich um ein Dispositionssystem, welches den Austausch von überschüssigen Materialien zwischen Projekten fördern soll. Mithilfe eines solche Systems soll eine Verbesserung der Abfallwirtschaft durch die Reduzierung der Abfallmengen und eine Optimierung der Transportwegen erzielt werden.

Bei der Implementierung solcher Systeme sind viele Stakeholder involviert, wodurch die Anforderungen und die Komplexität des Systems erhöht werden.

Programmstruktur

Aufgrund dieser hohen Komplexität wurde bei der programmtechnischen Umsetzung das Prinzip der strukturierten Programmierung angewendet.
Durch eine solche Umsetzung wird sichergestellt, dass das System zielgerichtet gewartet werden kann, sowie zukünftige Änderungen und Erweiterungen problemlos implementiert werden können. Die Einarbeitung neuer Mitarbeiter sowie die Anbindung zusätzlicher Unternehmen ist mit minimalem Aufwand realisierbar.

Zum Erstellen der Materialbörse wurde deshalb zunächst eine Programmstruktur (Abbildung 9) definiert. Die „Materialbörse“ besteht aus sechs Bereichen. Für jeden Bereich wurden Aufgaben, sowie Schnittstellen definiert. Die vorhandenen Schnittstellen zwischen den einzelnen Dateien sind in der Programmstruktur mithilfe von Pfeilen dargestellt. Die Schnittstellen ermöglichen den Datenaustausch zwischen den einzelnen Bereichen. Für die Bereiche „Eingabedatei je Baustelle“, „Ausgabedatei(en)“ und „Analysedatei(en)“ können gleichzeitig mehrere Dateien existieren. Die Aufgaben und Ziele der einzelnen Bereiche des Programmes werden nachfolgend definiert:

<u>Eingabedatei je Baustelle:</u>
Für jedes Projekt wird eine Eingabedatei benötigt. Diese Datei kann mithilfe der standardisierten Blanko-Version vom Nutzer unkompliziert für ein neues Projekt angelegt werden. Die Blanko-Version ist mit den notwendigen Baustellen- und Kontaktinformationen zu füllen. Anschließend können überschüssige Waren angeboten werden. Die verkauften Waren sind inkl. der Lieferkosten für eine spätere Analyse mit in die Datei einzupflegen.

<u>Ausgabedatei(en):</u>
In der Ausgabedatei werden alle noch nicht verkauften Waren der Eingabedateien von aktiven Projekten angeboten. Der Interessent kann die hinterlegten Daten einsehen und die Kontaktdaten abfragen. Der Standort der Ware wird dem Nutzer durch eine Deutschlandkarte visualisiert. Um die Lieferwege und -kosten gering zu halten, werden die Entfernungen zwischen den Baustellen durch die Software berechnet.

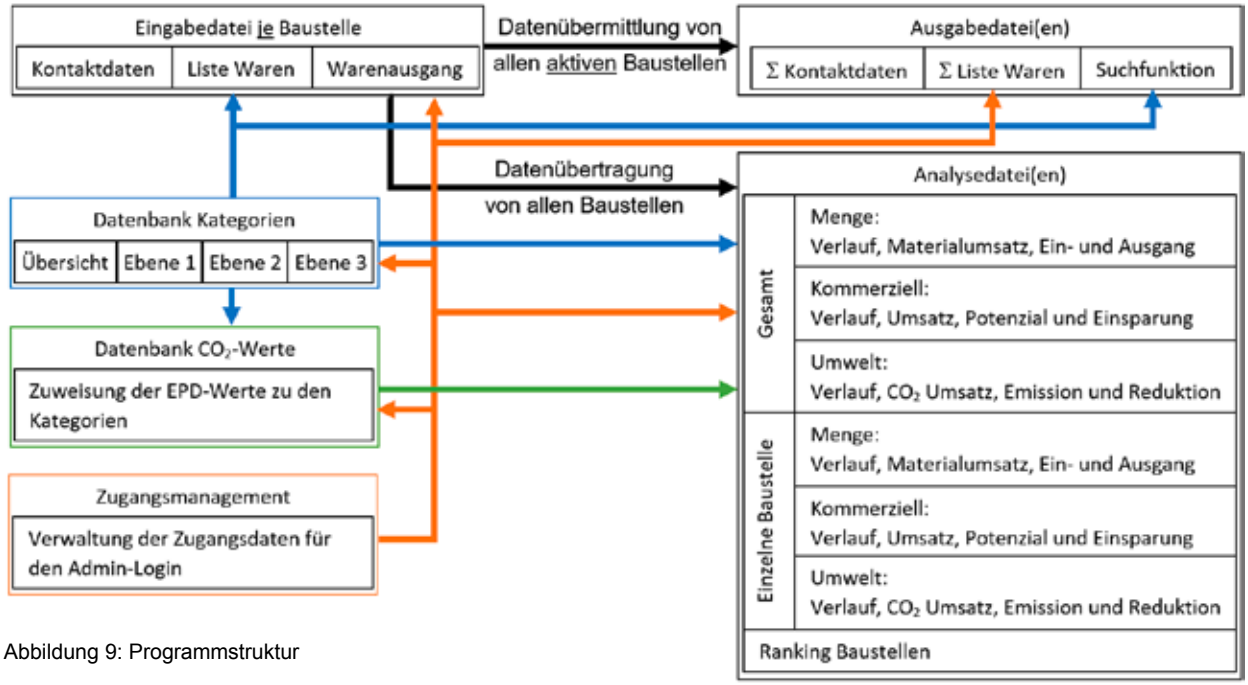


Abbildung 9: Programmstruktur

Datenbank Kategorien:

Für eine einheitliche Klassifizierung der Bauprodukte ist eine Struktur der Kategorien notwendig. Diese wird in der Datei „Datenbank_Kategorien“ definiert und zentral verwaltet. Die Kategorien werden in drei Ebenen gegliedert, wodurch eine Baumstruktur erzeugt wird. Mit dieser Hierarchie werden Baustoffgruppen, sowie die dazugehörigen Untergruppen definiert.

Datenbank CO_2-Werte:

In dieser Datei werden den ca. 400 Kategorien der Datei „Datenbank_Kategorien“ jeweils ein Datensatz von CO_2-Werten (Graue Energie) zugeordnet. Aufgrund des Umfangs und fehlender Informationen zu den verwendeten Produkten wurde bei der Hinterlegung der CO_2-Quantile ein Produkt aus der jeweiligen Kategorie herangezogen. Da die Produkte i.d.R. ähnliche Eigenschaften aufweisen, kann das EPD eines Produktes für eine näherungsweise Berechnung für die gesamte Kategorie angesetzt werden. Die hinterlegten Daten stammen aus den nach EN15804 und ISO 14040/44 standardisierten „Environmental Product Declarations“ (EPDs) [3] der einzelnen Bauprodukte.

Analysedatei(en):

In der Analysedatei werden die Datensätze aller aktiven und archivierten Projekte ausgewertet. Die Auswertung gibt Auskunft über die Menge der erfassten und umgesetzten Waren, die Höhe der eingesparten Kosten, das maximal mögliche finanzielle, sowie energetische Einsparpotenzial und die CO_2-Bilanz (Emission und Reduktion). Die dargestellten Daten und Grafiken lassen sich durch die Verwendung von Filtern sowohl zeitlich als auch kategorial eingrenzen. Zudem besteht die Möglichkeit, entweder sämtliche Projekte (aktive und archivierte) oder eine gezielte Auswahl spezifischer Projekte anzeigen zu lassen.

Zugangsmanagement:

In dieser Datei werden durch den Administrator die Benutzerrechte der einzelnen Nutzer für alle oben genannten Dateien verwaltet.

Umsetzung und Anwendung

Das Konzept wurde in Excel umgesetzt. Dabei wurde die „Materialbörse“ wie in der Programmstruktur beschrieben nicht mithilfe einer Datei, sondern durch die Verbindung mehrerer Dateien, die miteinander interagieren, realisiert. Für jeden

Bereich der Programmstruktur wurde eine eigene Datei entworfen.

Neben der programmtechnischen Realisierung bestand ein wesentlicher Teil der Arbeit in der Erstellung einer nutzerfreundlichen und intuitiven Benutzeroberfläche. Sowohl die Umsetzung als auch die Bedienung des Tools sind in der Bachelorarbeit beschrieben.

Ergebnis

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurde ein Excel-basiertes Softwaretool entwickelt, das den Austausch von Restmengen zwischen den Baustellen ermöglicht und somit zur Abfallverringerung und Ressourcenoptimierung beiträgt.

Das Programm wird derzeit in Projekten der Firma „dechant“ ausgerollt. Mit jedem Projekt, welches die Materialbörse aktiv nutzt, steigt die Informationsdichte und damit die Wahrscheinlichkeit eines Matches zwischen Angebot und Nachfrage.

Durch die Auswertung der Daten in der Analysedatei erhält der Nutzer ein Werkzeug, um sowohl finanzielle als auch ökologische Optimierungspotentiale zu erkennen. Das eigens entwickelte Dashboard gliedert sich in fünf Bereiche (Abbildung 10):

- Bereich 1: Navigationsbereich zwischen den Dashboards „Menge“, „Kommerziell“ und „Umwelt“
- Bereich 2: Menü- und Filterbereich des ausgewählten Dashboards
- Bereich 3: Darstellung des zeitlichen Verlaufs
- Bereich 4: Darstellung des Umsatzes
- Bereich 5: Darstellung der Ein- und Ausgänge

Die Daten werden darüber hinaus tabellarisch zur Verfügung gestellt, wodurch die Daten u.a. bei der Erstellung geforderter Nachhaltigkeits- bzw. Umweltbilanzberichte herangezogen werden können.

Ausblick

In Zukunft ist eine Einbindung der Nachunternehmer und weiterer Interessenten anzustreben. Die Weiterentwicklungsmöglichkeiten wurden bereits in der Entwicklung vorgesehen und durch die verwendete Programmstruktur berücksichtigt. Dabei bleiben die primären Bausteine des Programmes erhalten. Beispielsweise sind nachfolgende Updates des Tools denkbar:

- Verwendung von KI-Systemen
- Ausweitung auf Bodenmaterial
- Implementierung einer Prognoseermittlung
- Ausweitung auf Abfallauswertung

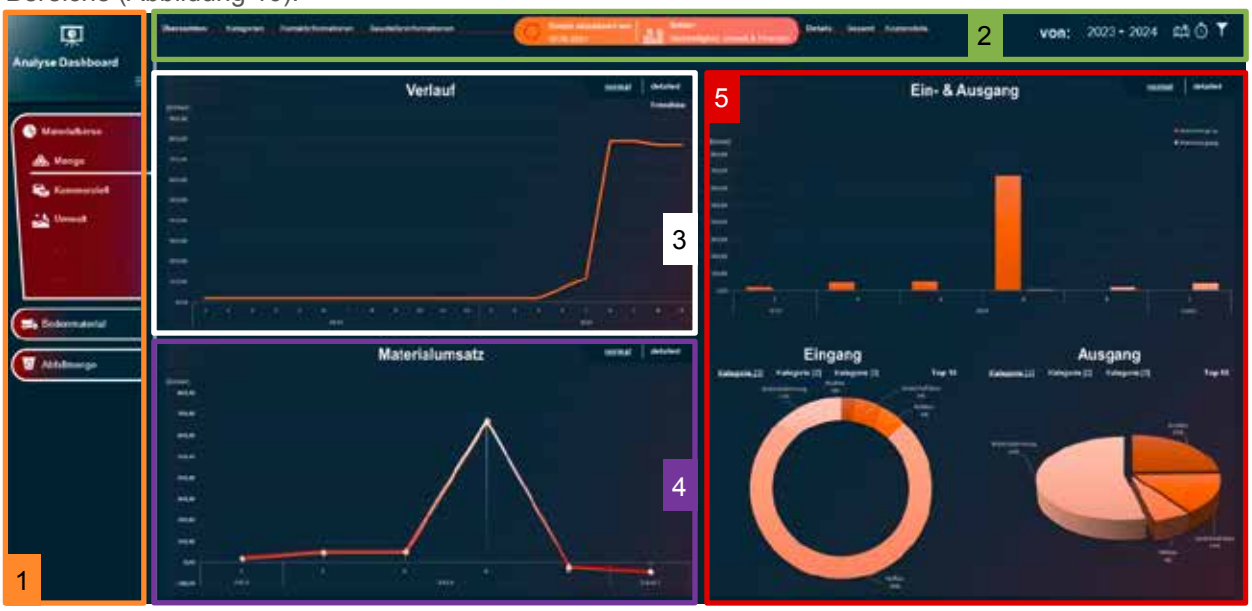


Abbildung 10: Auszug Analysedatei - Dashboard "Menge"

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1]: ENIT. (26. 06 2023). *Was ist ESG und CSRD? EU-Richtlinien für Unternehmen kurz erklärt [2023]*. Abgerufen am 21. 08 2024 von YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=vZ-kc1M0oSk

[2]: OSAPIENS. (23. 04 2024). *CSDDD - Corporate Sustainability Due Diligence Directive*. Abgerufen am 22. 08 2024 von YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=eh2zYFUWtyU

[3]: forbo. (04 2018). *UMWELT-PRODUKTDEKLARATIONEN (EPD)*. Abgerufen am 07. 08 2024 von forbo: https://forbo.blob.core.windows.net/forbodocuments/201094/EPD-Erklaerungen_201804.pdf

[4]: International Organization for Standardization. (2015). *Introduction to ISO 14001:2015*. Abgerufen am 25. 07 2024 von iso: https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100371.pdf

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Bundesamt, U. (06. 05 2024). *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*. Abgerufen am 21. 08 2024 von Umwelt Bundesamt: https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung

2. Institut Bauen und Umwelt e.V. (2020-2024). *Datenbank*. Abgerufen am 20. 07 2024 von ibu: https://ibu-epd.com/ibu-data-start/

3. Bundesministerium für Wohnen, S. u. (19. 06 2023). *ÖKOBAUDAT*. Abgerufen am 31. 07 2024 von ÖKOBAUDAT: https://www.oekobaudat.de/

Autor

Erik Rechenberg, B. Eng.

Studium:

10/2017 – 09/2020:	Bachelorstudium Bauingenieurwesen an der FH Coburg
10/2020 – 12/2024:	Bachelorstudium Bauingenieurwesen an der TH Nürnberg

Praxiserfahrung:

11/2017 – 09/2020:	Duales Studium (Studium mit vertiefter Praxis) bei der Firma dechant hoch- & ingenieurbau gmbh, u.a. BMW Group FIZ Nord - München
11/2020 – 12/2024:	Werkstudent bei der Firma dechant hoch- & ingenieurbau gmbh Bauleitungstätigkeiten in u.a. folgenden Projekten: - Fraport Terminal 3 Neubau (Frankfurt Flughafen) - MVC Lagarde 2 Bamberg

Betreuer

Die Arbeit wurde im Fachbereich Wasser- und Umwelttechnik an der technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm in Zusammenarbeit mit der Firma „dechant hoch- & ingenieurbau gmbh“ durchgeführt.
Die Betreuer der Arbeit waren Herr Prof. Dr.-Ing. Alexander Weidelener (Erstprüfer), Herr Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann (Zweitprüfer) und Frau Angela Püls (dechant hoch- & ingenieurbau gmbh).

Die Arbeit wird mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

NACHHALTIG BAUEN MIT BETON – QUANTIFIZIERUNG DER ÖKOLOGISCHEN OPTIMIERUNGSPOTENTIALE DER BETONBAUWEISE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG LOKAL VERFÜGBARER (SEKUNDÄR-)MATERIALIEN

Bachelorarbeit

Julia Sinning

Nachhaltige Bauweisen gewinnen zunehmend an Bedeutung und erfordern eine Untersuchung ökologischer Optimierungspotenziale in der Betonbauweise. Der hohe Ressourcenverbrauch und die Umweltbelastung durch konventionellen Beton machen alternative Bauweisen notwendig. Eine vielversprechende Alternative ist Recyclingbeton (RC-Beton), der durch die Wiederverwendung von Abbruchmaterial Ressourcen schont und CO_2-Emissionen reduziert. Die Arbeit bewertet die Umweltwirkungen von RC-Beton mittels einer standardisierten Ökobilanz nach ISO 14040 und DIN EN 15804. Im direkten Vergleich zu Normalbeton zeigen sich signifikante Unterschiede beim Treibhauspotenzial (GWP) und kumulierten Energieaufwand (KEA). Die Untersuchung zeigt, dass RC-Beton CO_2-Emissionen und den Abbau von Primärmaterialien deutlich reduziert. Besonders der Einsatz von gebrochenem Kies und alternativen Zementsorten verbessert die ökologische Gesamtbilanz. Die Ergebnisse verdeutlichen das Potenzial von RC-Beton, als nachhaltige Alternative im Bauwesen etabliert zu werden und zukünftige Entwicklungen in der ressourcenschonenden Bauweise maßgeblich zu beeinflussen.

Keywords: Nachhaltigkeit, Recyclingbeton, Ökobilanz, Bauwesen, Ressourcenoptimierung, CO_2-Reduktion, Kreislaufwirtschaft

Einleitung

„Nachhaltige Entwicklung beschreibt eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der gegenwärtigen Generation gerecht wird, ohne zukünftige Generationen bei der Befriedigung eigener Bedürfnisse zu beeinträchtigen“ [1]. Diese Definition verdeutlicht die zentrale Problemstellung der Arbeit. Klimaschutz und Ressourcenschonung gewinnen in der Bauindustrie zunehmende an Bedeutung. Beton ist mit etwa sieben Milliarden Kubikmetern jährlich – abgesehen von Wasser – der meistgenutzte Stoff weltweit. Seine Herstellung verursacht rund 7 % der weltweiten CO_2-Emissionen und erzeugt

große Mengen an womöglich teilweise vermeidbaren Abfall. [2]
Um die Umweltbelastungen im Bauwesen zu verringern, bietet RC-Beton eine nachhaltige Alternative.

Theoretischer Hintergrund

Recyclingbeton könnte also ein Schlüssel für eine bessere Ökobilanz im Bauwesen sein. Doch wie ist dieser Baustoff definiert? RC-Beton ersetzt natürliche Gesteinskörnung teilweise durch rezyklierte (RC) Materialien aus Bauschutt oder anderen Sekundärquellen. Je nach Zusammensetzung (siehe Abbildung 1) können bis zu 45 % ersetzt werden, ohne Qualitätseinbußen [3].

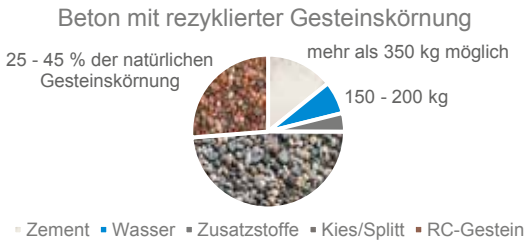


Abb. 1: Betonzusammensetzung mit RC-Gestein [4–6]

Einsatz von RC-Gestein

RC-Gestein wird vorwiegend in grober Fraktion (> 2 mm) eingesetzt [7]. Es gibt Einschränkungen bei Frost- und Tausalzangriff sowie chemischen Belastungen [1]. Für tragende Bauteile wird Typ 1 (≥ 90 % Beton/Naturstein, max. 10 % Nebenbestandteile) verwendet, während Typ 2 (≥ 70 % Beton/Naturstein, max. 30 % Nebenbestandteile) strengeren Einschränkungen unterliegt. Die maximalen Austauschquoten betragen für Typ 1 bis zu 45 %, für Typ 2 bis zu 35 %, je nach Expositionsklasse. Die neue DIN 1045-2 definiert Betonklassen: BK-N erlaubt ≤ 25 % RC-Gestein, BK-E > 25 % mit erhöhten Anforderungen für Feuchtigkeitsklasse WA und BK-S erfordert einen Verwendbarkeitsnachweis. Feine rezyklierte Gesteinskörnung (0–2 mm) war lange unzulässig, wird nun jedoch für Typ 1 zugelassen. Typ 2 bleibt weiterhin unzulässig. [7]

Methode der Ökobilanzierung

Die Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) ist eine standardisierte Methode zur ganzheitlichen Umweltbewertung eines Produkts oder Prozesses über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Grundlage sind die ISO-Normen 14040–14044 sowie im Baubereich die DIN EN 15978 (Gebäude) und DIN EN 15804 (Bauprodukte). [8]

Die LCA umfasst vier Phasen: Zieldefinition und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung [8]. Daraus entstehende Umweltproduktdeklarationen (EPD) standardisieren Ökobilanzen und unterstützen Zertifizierungen wie die der DGNB [1].

Projekt: Sportpark Ost Regensburg

Die Methode wurde auf das Praxisbeispiel Sportpark Ost in Regensburg der Firma Riedel Bau (siehe Abbildung 2) angewendet. Beim Rückbau einer benachbarten Kaserne wurde das gewonnene RC-Material als Sekundärrohstoff für die Betonproduktion genutzt.



Abb. 2: Jonas Kron, Frankfurt, *Sportpark Regensburg*, 2024. Quelle: www.riedelbau.de/referenzen/sportpark-regensburg, 10.04.2025

Zur Bewertung der Umweltauswirkungen im Vergleich zu Normalbeton wurden verschiedene Betonmischungen mit unterschiedlichen Festigkeitsklassen, Transportwege und alternative Zementarten bilanziert. Ziel war es, zentrale Umweltbelastung zu identifizieren und Optimierungspotenziale aufzuzeigen.

Für die Ökobilanz wurde die Software OpenLCA und die Datenbank Ecoinvent verwendet. Die Analyse folgte dem Cradle-to-Gate-Ansatz. Es wurden also die Module A1–A3 (siehe Abbildung 3) miteinbezogen. Das Modul A1 beschreibt die Rohstoffbereitstellung, Modul A2 den Transport der Rohstoffe und Modul A3 die Herstellung des Betons im Werk [9]. Als funktionelle Einheit, welche den Vergleich ähnlicher Systeme ermöglicht, wurde 1 m³ unbewehrter Konstruktionsbeton festgelegt [8].

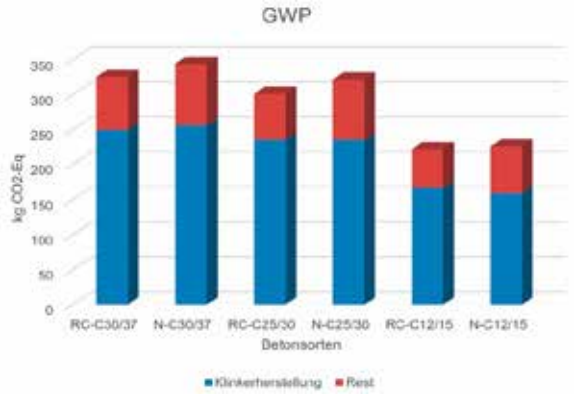


Abb. 4: Ergebnisse des GWP

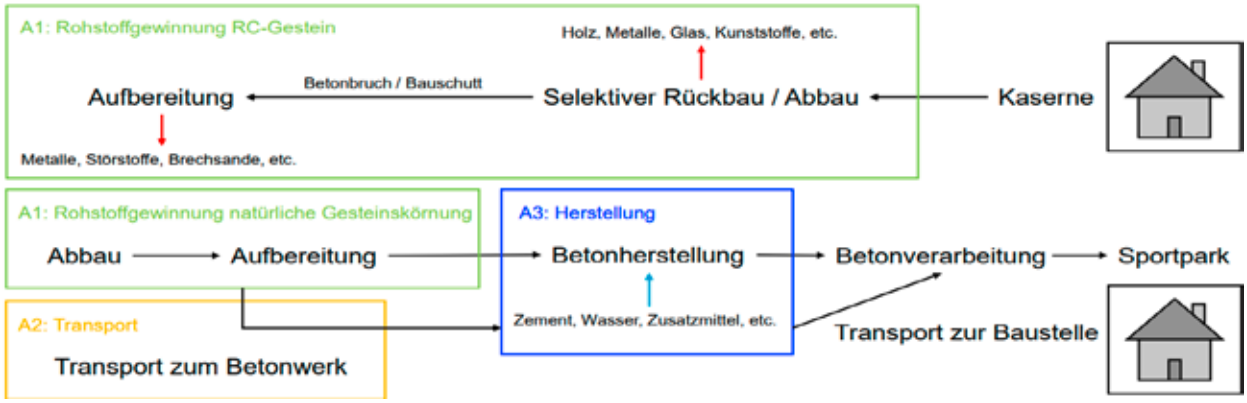


Abb. 3: Systemfließbild mit Systemgrenzen

Die Wirkungsabschätzung umfasst Umweltindikatoren wie beispielsweise Treibhauspotenzial (GWP), Ozonabbaupotenzial (ODP), Versauerungspotenzial (AP), Eutrophierung (EP), Verknappung von Ressourcen (ADP) und der kumulierte Energieaufwand (KEA). Zur Berechnung wurden primär die Methoden CML-IA baseline und CED verwendet. [1]

Auswertung

Die Ökobilanz zeigt, dass RC-Beton in allen Festigkeitsklassen geringere Umweltbelastungen als Normalbeton aufweist. Besonders beim GWP (siehe Abbildung 4) sind Einsparungen von bis zu 6 % möglich. Allerdings hat die Klinkerherstellung mit über 75 % den größten Einfluss auf das GWP.

Beim KEA (siehe Abbildung 5) zeigt sich ebenfalls eine Verbesserung durch den Einsatz von RC-Beton. Die Einsparungen variieren je nach Festigkeitsklasse und liegen zwischen 9 % und 17 %. Auch hier ist die Klinkerherstellung der Hauptfaktor, der den Energieverbrauch dominiert.

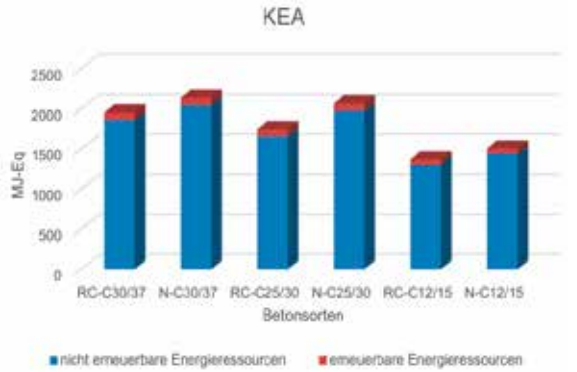


Abb. 5: Ergebnisse des KEA

Die Analyse der Transportwege zeigte, dass RC-Beton bis zu einer Strecke von 200 km geringere Umweltauswirkungen als der entsprechende Normalbeton aufweist. Der Einsatz verschiedener Zementsorten zeigte, dass CEM III/B mit 8 % die besten Einsparungen aufweist. Die

Klinkerherstellung macht hier statt 75 % im Vergleich nur noch ca. 45 % des GWP aus. Die Reduktion des Klinkeranteils bietet somit das größte Potenzial zur Senkung von GWP und KEA.

Vergleich mit der Literatur

Die Ergebnisse des GWP wurden mit bestehenden Studien verglichen. In der Ökobilanz der Hochschule Konstanz wurde für einen RC-C25/30 ein GWP-Wert von 211,5 kg CO_2-eq/m³ bilanziert [10]. Die Werte des Sportparks liegen mit 301,45 kg CO_2-eq/m³ deutlich darüber. Auch im Vergleich zur Studie der Universität Hannover mit 277,5 kg CO_2-eq/m³ für denselben Betontyp sind die höher [11]. Dennoch zeigt die Arbeit, dass durch eine gezielte Anpassung der Betonmischung und Transportstrategie die ökologische Gesamtbilanz von Beton optimiert werden konnte. Die Diskrepanzen lassen sich unter anderem durch Unterschiede in Datensätzen, Zementwahl und Methodik erklären. Ein Vergleich einer entsprechenden EPD sowie der Ecoinvent- und Ökobaudat-Datenbank zeigt beispielsweise deutliche Unterschiede beim GWP von CEM II/A bzw. vergleichbaren Datensätzen.

Fazit und Ausblick

Die Untersuchung bestätigt, dass RC-Beton eine umweltfreundlichere Alternative zu Normalbeton darstellt, wobei die Umweltbilanz wesentlich von Zementzusammensetzung und den Transportwegen beeinflusst wird. Eine optimierte Zementmischung – etwa durch den Einsatz klinkerarmer Zemente wie CEM III/B – in Kombination mit einem höherem RC-Anteil führt zu signifikanten CO_2- und KEA-Reduktionen.

Bis zu einer Transportdistanz von 200 km bleibt RC-Beton ökologisch vorteilhaft, darüber hinaus übersteigen die Umweltbelastungen die von Normalbeton. Dies unterstreicht die Bedeutung regional verfügbarer Recyclingmaterialien.

Trotz der ökologischen Vorteile müssen auch technische und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine breitere Anwendung von RC-Beton nicht nur sinnvoll, sondern auch ein bedeutender Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung im Bauwesen ist.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1] *Peck, M.:* Atlas moderner Betonbau – Konstruktion, Material, Nachhaltigkeit, Edition Detail, Inst. für Internat. Architektur-Dokumentation, München, 2013.

[2] *Nolting, U.; Dehn, F.; Link, J. et al.:* Ressourceneffizienter Beton - Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis : 15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 14. März 2019. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2020.

[3] *Knappe, F.; Reinhardt, J.; Theis, S. et al. (Hrsg.):* Schlussberichte zum BMBF-Verbundforschungsvorhaben "R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation" Schwerpunkt 1: Konzeption der neuen Werkstoffe. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Deutscher Ausschuss für StahlbetonHeft 639, Beuth Verlag, Berlin, 2022.

[4] *Rhein Main Kies und Splitt GmbH & Co. KG:* Kies 2/8 mm, https://www.rmks.de/media/images/kies-2-8.jpg [Zugriff am: 13.05.2024].

[5] *Freepik Company:* Bilder - Zement, https://de.freepik.com/fotos-kostenlos/draufsicht-tonfleck_12596786.htm#query=zement&position=40&from_view=keyword&track=ais_user&uuid=af639d47-8ee5-43a7-a892-4f0912f19fac [Zugriff am: 13.05.2024].

[6] *ISEKE Natursteinbrüche Bergisch Land GmbH:* Moräne Extra Kies, https://www.natursteinbrueche.de/splitt-und-kies-fur-den-steingarten/moraene-extra-kies/ [Zugriff am: 13.05.2024].
[7] *Deutsches Institut für Normung:* DIN 1045-2, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton. Deutsches Institut für Normung, Deutsche Norm, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2023.
[8] *Deutsches Institut für Normung:* DIN EN ISO 14040, Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020). Deutsches Institut für Normung, Deutsche Norm, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2021.
[9] *Deutsches Institut für Normung:* DIN EN 15804, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Deutsches Institut für Normung, Deutsche Norm, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2022.
[10] *Prof. Dr.- Ing. Sylvia Stürmer & Dipl.- Ing. Christoph Kulle, HTWG Konstanz:* Untersuchung von Mauerwerksabbruch (verputztes Mauerwerk aus realen Abbruchgebäuden) und Ableitung von Kriterien für die Anwendung in Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Beton mit Typ 2 Körnung) für den ressourcenschonenden Hochbau – Abschlussbericht gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Hochschule Konstanz, DBU - AZ 32105/01 Ausgabe 2017.
[11] Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Haist: Klimaschonender und ressourceneffizienter Betonbau – Ein Widerspruch? Hannover, Leibniz Universität Hannover, 2023^

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Peck, M.: Atlas moderner Betonbau – Konstruktion, Material, Nachhaltigkeit, Edition Detail, Inst. für Internat. Architektur-Dokumentation, München, 2013.
2. Nolting, U.; Dehn, F.; Link, J. et al.: Ressourceneffizienter Beton - Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis : 15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 14. März 2019. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2020.
3. Klöpffer, W.; Grahl, B.: Ökobilanz (LCA) – Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Wiley-VCH-Verl., Weinheim, 2009.
4. Böing, R.; Knappe, F.; Müller, C. et al. (Hrsg.): Schlussberichte zum BMBF-Verbundforschungsvorhaben "R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation" Schwerpunkt 3: Ökobilanz, Praxistest und Transfer. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Deutscher Ausschuss für StahlbetonHeft 641, Beuth Verlag, Berlin, 2022.

Autorin

Julia Sinning (B. Eng.)

Bachelor of Engineering, Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Hochschule Regensburg. 2020-2024.
Werkstudentin Riedel Bau. Seit 2022.
Ausbildung zur Bauchzeichnerin. 2016-2019.

Betreuerin

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Bauingenieurwesen, Ostbayrische Technische Hochschule Regensburg, unter Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Charlotte Thiel.

Die Arbeit wird mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

INNOVATIVE BESTANDSERFASSUNG, CAD-BASIERTE ENTWURFSPLANUNG UND ENERGETISCHE BEWERTUNG FÜR EIN BESTANDSGEBÄUDE MIT NUTZUNGSÄNDERUNG UND ANBAU

Bachelorarbeit

Matthias Staudinger

Die Bauwirtschaft steht vor der Herausforderung, Ressourcen effizient zu nutzen und nachhaltige Bauweisen zu fördern. Diese Bachelorarbeit untersucht das Potenzial digitaler Erfassungs- und Verarbeitungstechnologien zur Nutzung bestehender Gebäudesubstanz. Im Fokus steht die digitale Aufnahme eines Wohn- und Geschäftshauses mittels LiDAR-Technologie, bei der das Gebäude durch Laufzeitmessung als 3D-Punktwolke mit einem handelsüblichen iPad erfasst wird, um die Anwendbarkeit für eine breite Nutzergruppe zu analysieren. Die erhobenen Daten werden in ein CAD-System überführt und bilden die Grundlage für die dreidimensionale Eingabeplanung der Umnutzung zu einem Bürogebäude mit Anbau. Eine begleitende energetische Bewertung untersucht praxisorientierte Sanierungspotenziale und reale Fördermöglichkeiten zur Effizienzsteigerung und nachhaltigen Nutzung der Gebäudestruktur. Die digitale Methodik der Bestandserfassung optimiert Planungsprozesse, reduziert Fehler und steigert die Effizienz. Die Ergebnisse verdeutlichen die Leistungssteigerung durch digitale Technologien in der Bauwirtschaft und zeigen den Entwicklungsbedarf für deren weitere Optimierung und Integration.

Keywords: LiDAR-Methoden, CAD-Programm, Bestandsdaten, Umgestaltung, Nutzungsänderung, Entwurfsplanung, Genehmigungsplanung, Energetische Bewertung, Sanierung

Analyseansatz der Gebäudesubstanz

Die Arbeit gliedert sich in drei Phasen: Bestandserfassung, konzeptionelle Planung und energetische Bewertung.

Auf Basis der Bestandsaufnahme erfolgen praxisorientierte, genehmigungsfähige Planungsschritte sowie die Entwicklung subventionsfähiger Sanierungsmaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz.

Bestandserfassung - LiDAR

Die innovative Methode der Bestandserfassung in dieser Arbeit basiert auf der Light Detection and Ranging (LiDAR) Technologie, die mittels Laufzeitmessung von Laserimpulsen hochpräzise 3D-Daten erzeugt. Die Impulse werden von einer Antenne ausgesendet und nach ihrer Rückstreuung vom Objekt wieder empfangen. Dieses Verfahren, welches bereits erfolgreich in der Vermessung eingesetzt wird, generiert eine dichte Punktwolke mit 3D-Koordinaten der erfassten Oberflächen, die zu einem 3D-Modell verknüpft werden, wodurch selbst komplexe Strukturen detailliert dargestellt werden [1].

Bei der Auswahl der Messinstrumente und Software stehen Wirtschaftlichkeit und praktische Anwendbarkeit im Vordergrund. Es werden kostengünstige, alltägliche Geräte genutzt, die eine breite Anwendbarkeit ermöglichen, während auf teure und komplexe Instrumente verzichtet wird, ohne die Datenqualität zu beeinträchtigen.

Zum Einsatz kommt ein Apple iPad Pro mit integriertem LiDAR-Scanner in Kombination mit der Applikation Polycam. Der Sensor arbeitet nach dem Time-of-Flight-Prinzip, indem er die Zeit misst, die ein Laserstrahl benötigt, um zum Objekt und zurückzugelangen. Die LiDAR-Daten werden dabei mit Kamera und Bewegungssensoren synchronisiert, während Infrarot-Laserstrahlen von Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasern (VCSEL) emittiert werden [2].

Diese Methode bietet eine benutzerfreundliche und effiziente Lösung, die sowohl für Handwerksbetriebe als auch für akademische Fachleute von Nutzen ist. Sie ermöglicht eine praxisorientierte und globale Anwendbarkeit und bietet eine schnelle Möglichkeit zur Erfassung von Gebäudedaten sowie deren Ableitungen für die weitere Verarbeitung. Auf dieser Basis können präzise Modelle erstellt werden, die den gescannten Bereich dreidimensional abbilden (vgl. Abb. 1).



Abb. 1: Ergebnis LiDAR-Scan - 3D-Modell des Innenbereichs

3D Bestandserfassung - CAD

Die erfassten Daten werden in die 3D-Modularität der CAD-basierten Baukonstruktion integriert, was im Vergleich zur traditionellen 2D-Planung erhebliche Vorteile bietet.

Die automatische Generierung von Ansichten und Schnitten spart Zeit und verbessert die Übersichtlichkeit. Bauteildefinitionen sowie intelligente Beschriftungen und Bemaßungen optimieren den Planungsprozess und erhöhen die Fehlerprävention.

Das Ergebnis ist ein vollständiges 3D-CAD-Modell, welches den Bestand detailliert abbildet und eine fundierte Grundlage für effiziente Bestandsdokumentation und -pflege sowie die Möglichkeit zur Integration in erweiterte Anwendungen bietet (vgl. Abb. 2).



Abb. 2: Vergleich 3D-Bestandsmodell zu Bestandsfotografie

Entwurfs- und Genehmigungsplanung

Die detaillierte Bestandsaufnahme bildet die Grundlage für die effiziente Umplanung sowie die Erweiterung und Modernisierung der Gebäudesubstanz im Rahmen einer Nutzungsänderung. Die Planung erfolgt praxisorientiert und berücksichtigt ergänzende Bestandsdaten wie Entwässerungssysteme und Geländehöhen. Da sich die Liegenschaft außerhalb eines Flächennutzungs- oder Bebauungsplans befindet, orientiert sich die Planung an der Eigenart der umliegenden Bebauung unter Beachtung der Bayerischen Bauordnung (BayBO) und der geltenden gesetzlichen Vorgaben.

Das Ergebnis ist eine fundierte Genehmigungsplanung, die alle erforderlichen Komponenten wie Abstandsflächen, Lageplan, Entwässerungsplanung, Schnitte und Grundrisse gemäß der Bauvorlagenverordnung (BauVorlV) umfasst (vgl. Abb. 3). Zusätzlich werden ergänzende gesetzliche planungstechnische Vorgaben, wie die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV), berücksichtigt. Diese Planung fördert die zukünftige Nutzung der Immobilie und trägt aktiv zur Reduktion des Leerstands bei. Erste bauliche Maßnahmen, wie der Ausbau des Erdgeschosses und die Erneuerung der Kellerräume, wurden bereits erfolgreich auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit umgesetzt.

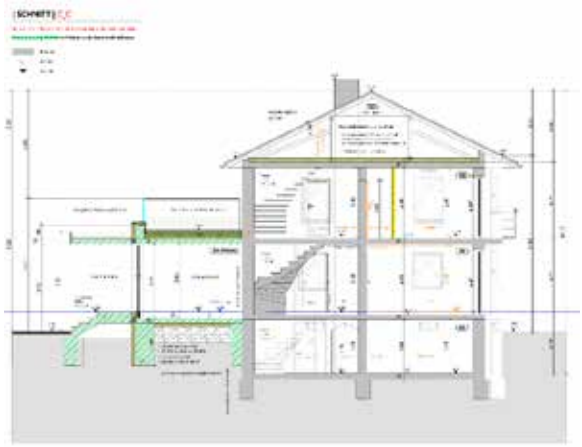


Abb. 3: Auszug Genehmigungsplanung – Schnitt C_C

Energetische Bewertung

Die energetische Analyse umfasst die gesamte Gebäudekonzeption, einschließlich der Bestandsstruktur und des geplanten Anbaus, unter Berücksichtigung gesetzlicher Vorgaben.

Der Einsatz der in der Praxis etablierten Hottgenroth-Software ETU-Planer ermöglicht eine normgerechte Planung und Simulation von Gebäuden sowie deren technischen Anlagen zur Gebäudeausrüstung. Alle relevanten Bauteile wie Außenwände, Fenster, Dachkonstruktionen und das Gelände werden dabei modelliert. Ein Vergleich der bestehenden Komponenten mit Maßnahmen aus der geplanten Sanierung zeigt signifikante Optimierungspotenziale auf, wobei auch zum Zeitpunkt der Arbeit gültige Subventionsprogramme berücksichtigt werden.

Besonders die Einbindung der Bundesförderung für effiziente Gebäude verdeutlicht den Praxisbezug dieser Untersuchung. Gefördert werden Maßnahmen zur Errichtung, zum Umbau oder zur Erweiterung von Gebäudenetzen, sofern mindestens 65 % der Wärmeerzeugung aus förderfähigen Anlagen oder unvermeidbarer Abwärme stammen, wobei der Anteil der Wärmeerzeugung aus Biomasseheizungen auf maximal 75 % begrenzt ist [3].

Das ansässige Unternehmen hat eine Förderung für eine Biomasseheizung beantragt und wurde infolge dem Zuwendungsbescheid genehmigt, wobei eine Zuwendung in Höhe von 68.000,00 Euro zugesichert wurde. Gemäß der Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM) wurde der Bewilligungszeitraum verlängert, sodass die Förderung weiterhin gültig bleibt.

Die Integration dieser Fördermöglichkeiten überführt die theoretische Planung in die Praxis und unterstreicht die Realisierbarkeit der geplanten Maßnahmen.

Bewertung der Ergebnisse

Die Gebäudebewertung umfasst sowohl die bestehende als auch die geplante Gebäudetechnik, wobei der Fokus auf der Erneuerung der Heizungsanlage und der thermischen Optimierung der Gebäudehülle liegt. Zu den Maßnahmen zählen die thermische Trennung des nicht ausgebauten Dachgeschosses sowie die Integration eines modernen Anbaus.

Durch diese Verbesserungen sinkt der Primärenergiebedarf von 308 kWh/m²a auf 143 kWh/m²a, was einer Einsparung von 54 % entspricht (vgl. Abb. 4). Die Investitionskosten für die Modernisierung betragen ca. 100.000 €, einschließlich der BEG EM-Förderung. Trotz der hohen Anfangsinvestition amortisiert sich die Heizungsanlage innerhalb von 21 Jahren, während die jährlichen Brennstoffkosten um 13 % sinken.

Der Umstieg von fossilen Brennstoffen auf Biomasseheizungen mit Holzpellets reduziert die CO2-Emissionen um 60 % und verbessert somit die ökologische Bilanz.

Zusammenfassend zeigt die Analyse, dass die geplanten Maßnahmen sowohl wirtschaftlich als auch nachhaltig sind. Sie erfüllen die aktuellen gesetzlichen Anforderungen, senken langfristig Betriebskosten und leisten einen bedeutenden Beitrag zum Klimaschutz, während sie die Immobilie nachhaltig aufwerten.

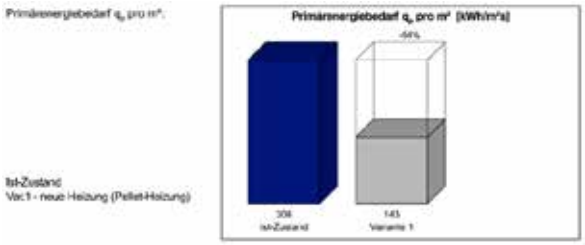


Abb. 4: Vergleich Primärenergie IST zu Sanierung (- 54%)

Zusammenfassung

Diese Arbeit zielt darauf ab, die Bestandsgebäude eines ansässigen Unternehmens mithilfe innovativer Technologien und praxisorientierter Planungsmethoden zu erfassen und eine nachhaltige Revitalisierung zu ermöglichen.

Die Bestandsaufnahme erfolgt bewusst mit einem handelsüblichen iPad und LiDAR-Technologie, um die breite Praxisanwendbarkeit zu überprüfen und die Digitalisierung sowie Effizienzsteigerung der Bauwirtschaft voranzutreiben. Diese Methode ermöglicht eine präzise Visualisierung von Gebäudestrukturen, stößt jedoch bei der erweiterten Datenverwendung auf Grenzen in der Datenauswertung und im Datenaustausch, was Optimierungspotential, insbesondere für ingenieurtechnische Anwendungen, aufzeigt.

Die darauf basierende Entwurfsplanung umfasst die Modernisierung der Gebäudetechnik und energetischen Optimierungen des Bestands sowie Erweiterungsmaßnahmen zur Erstellung einer genehmigungsfähigen Planung. Dabei wird die energetische Effizienz der Maßnahmen unter ökologischen, nachhaltigen und wirtschaftlichen Aspekten bewertet und optimiert, wobei die Praxisrelevanz für eine realistische Umsetzung und gesetzeskonforme Subventionierung berücksichtigt wird.

Zusammenfassend bietet die Planung mit ihren Inhalten eine fundierte Grundlage für die Modernisierungsmaßnahmen, liefert praxisorientierte Lösungen und zeigt das Potenzial, die Effizienz und Nachhaltigkeit des Unternehmens sowie dessen Gebäudebestand signifikant zu steigern. Gleichzeitig werden ökologische und ökonomische Vorteile erzielt. Diese Arbeit trägt wesentlich zur langfristigen Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens und zur nachhaltigen sowie digitalen Weiterentwicklung im Bauwesen bei.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1]: Zippelt, Karl (Hg.): Vernetzt und ausgeglichen: Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Günter Schmitt, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe 2014, S. 6.

[2]: Behrendt, Christina: Untersuchung zum Einsatz des iPhone 12 LiDAR-Scanners in der Vermessung und Vergleich zu Punktwolken aus weiteren Aufnahmeverfahren, Nr. Hochschule für Technik Stuttgart, 26. Januar 2022, S. 21.

[3]: „BAFA - Anlagen zur Wärmeerzeugung (Heizungstechnik)“, abgerufen am 17. Februar 2024, https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente_Gebaude/Sanierung_Nichtwohngebaeude/Anlagen_zur_Waermeerzeugung/anlagen_zur_waermeerzeugung_node.html.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. ArbStättV - Verordnung über Arbeitsstätten, 12. August 2004.
2. Bauvorlagenverordnung – BauVorlV, 10. November 2007.
3. Bayerische Bauordnung – BayBO, 14. August 2007.
4. Gebäudeenergiegesetz – GEG, 8. August 2020.

Autor

Matthias Staudinger

Ausbildung:
08/2014 – 06/2017: Staatlich geprüfter Baustoffprüfer (Geotechnik) – IHK
09/2018 – 07/2020: Staatlich geprüfter Bautechniker (Hochbau) – Dr. R. Eckert Akademie Regenstauf
10/2020 – 02/2024: Studium Bachelor Bauingenieurwesen (B.Eng.) – OTH Regensburg
Weiterbildung:
2019: Ausbildereignung / Ausbilderschein nach AEVO – IHK
2020: Sicherheits- und Gesundheitsschutzkoordinator – RAB 30
2021: Anerkannter Sachverständiger für Schäden an Gebäuden und Wertermittlung – DESAG
2024: Energieeffizienz-Experte für Wohngebäude – dena / TÜV Thüringen
Berufserfahrung:
08/2014 – 06/2017: Staatlich geprüfter Baustoffprüfer (Geotechnik) – ifb Eigenschenk, Deggendorf
07/2017 – 08/2018: Fachwerker im Bauwesen – Bauunternehmen Georg Staudinger, Stephansposching
08/2022 – 12/2022: Praktikant der Bauleitung im Schlüsselfertigbau – Guggenberger GmbH, Mintraching
01/2023 – 02/2024: Werkstudent – Bauunternehmen Georg Staudinger, Stephansposching
05/2024 – jetzt: Bauleitung im Schlüsselfertigbau – Guggenberger GmbH, Mintraching

Betreuer

Die Arbeit wurde an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg, Fakultät Bauingenieurwesen, angefertigt. Betreuerin der Arbeit ist Frau Prof. Dr.-Ing. Ursula Albertin-Hummel, Zweitprüfer ist Herr Prof. Dipl.-Ing. Florian Weininger.

Die Arbeit wird mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNG DES TRAGVERHALTENS VON CARBONFASERVERSTÄRKTEM ULTRA-HOCHLEISTUNG BETON (C-UHFB) UNTER BIEGEZUGBEANSPRUCHUNG

Masterarbeit

Leon Unewisse

Carbonfaserverstärkter Ultra-Hochleistungs Beton (C-UHFB) ist ein innovatives Verbundmaterial, das aufgrund seiner herausragenden Festigkeitseigenschaften und hohen Duktilität ein breites Spektrum potenzieller Anwendungen bietet. Die im UHFB üblichen Stahlfasern führen oftmals zur optischen Beeinträchtigung der Oberflächenbeschaffenheit sowie zu potenziellen Risiken in Verkehrsbereichen. Die Substitution durch Carbonfasern adressiert diese Probleme und stellt zudem eine nachhaltigere Alternative dar. In dieser Arbeit wurde in Kooperation mit Praxispartnern eine umfassende Parameterstudie durchgeführt. Dabei wurden die Auswirkungen von Fließmittelgehalt, Fasergehalt und Faserlänge auf die rheologischen und mechanischen Eigenschaften von C-UHFB untersucht und für einen möglichen Praxiseinsatz optimiert. Die Anwendbarkeit etablierter Bemessungsansätze wurde bestätigt. Es erfolgte eine Automatisierung sowie der Entwurf eines Optimierungsansatzes, um das Tragverhalten realitätsnäher abzubilden. Die Nachhaltigkeitsanalyse zeigt das Recyclingpotenzial von UHFB und Carbonfasern auf, wobei die Entwicklung von Separationsverfahren für C-UHFB noch aussteht. Der Einsatz in einem Pilotprojekt unterstreicht das Potenzial des Verbundmaterials.

Keywords: UHFB, Carbonfasern, rheologische Eigenschaften, mechanische Eigenschaften, Materialentwicklung, Bemessung, Nachhaltigkeit

Einführung

Die fortschreitende Entwicklung innovativer Baustoffe bietet weitreichende Möglichkeiten zur Optimierung von Tragwerken, stellt indes aber auch Herausforderungen hinsichtlich des Entwurfs geeigneter Bemessungsansätze dar. Komplexe Materialmodelle müssen so abstrahiert werden, dass die Möglichkeit einer ausreichend präzisen und dennoch effizienten Berechnung der wichtigsten Kennwerte besteht. Carbonfaserverstärkter Ultra-Hochleistungsbeton (C-UHFB) stellt ein besonders innovatives, aber auch komplexes Verbundmaterial dar.

UHFB zeichnet sich durch hohe Festigkeiten von mehr als 120 N/mm² aus, die Faserbewehrung verleiht dem Material hohe Biegezugfestigkeiten und Duktilität. Durch seine optimierte Packungsdichte wird das Eindringen potenzieller Schadstoffe, wie beispielsweise von Chloriden, bereits bei geringen Bauteilstärken verhindert [1]. Ein großes Anwendungsgebiet liegt daher in der Instandsetzung.

Aus der Kombination der beiden Hochleistungsmaterialien ergibt sich eine Vielzahl potenzieller Anwendungsmöglichkeiten. Verglichen zu hochfesten Stahlfasern, die üblicherweise in UHFB verwendet werden, können Carbonfasern nachhaltig hergestellt werden. Aktuelle Forschungsprojekte untersuchen dabei eine Herstellung aus Lignin, einem Abfallprodukt der Papierwirtschaft [2]. Es wird auch versucht, CO_2 aus emissionsintensiven Industrien wie der Zementherstellung als Rohstoffquelle zu verwenden und zu Carbonfasern weiterzuverarbeiten [3]. Es findet außerdem keine optische Beeinträchtigung der Oberflächenbeschaffenheit statt, die sich bei stahlfaserverstärktem UHFB häufig durch Rostfahnen einstellt.

Trotz der vielen Potenziale ist C-UHFB bisher weitgehend unerforscht. Bis zum Jahresende 2021 befassten sich lediglich 1,5% der Veröffentlichungen zu UHFB mit einer Carbonfaserverstärkung [4]. Ein fundiertes Verständnis des Materialverhaltens ist jedoch entscheidend für die Weiterentwicklung und den praktischen Einsatz.

Ziel der Arbeit war es, den Einfluss ausgewählter Parameter auf die mechanischen und rheologischen Eigenschaften von C-UHFB experimentell zu untersuchen. Durch eine analytische Betrachtung wurden daraufhin bestehende Bemessungsansätze für UHFB dargestellt und ihre Anwendbarkeit auf C-UHFB untersucht. Abschließend wurde das Material hinsichtlich seiner Nachhaltigkeit analysiert.

Da in Deutschland zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit kein normiertes Regelwerk für UHFB existierte, wurde sich hinsichtlich der Untersuchungen an der Schweizer Norm SIA 2052 orientiert.

Experimentelle Untersuchung

In der zugrunde gelegten Parameterstudie wurden der Fließmittel- (FM) und Fasergehalt (FG) sowie Faserlänge (FL) und -art variiert. Auch die Kombination verschiedener FL („Fasercocktails“) in einer Zusammensetzung wurde untersucht.

Die Untersuchungen erfolgten zweistufig. In Stufe I wurden Chargen mit geringem Volumen hergestellt. Es wurde das Ausbreitmaß des Frischbetons gemessen und Kleinbauteile hergestellt. Ziel dieser Untersuchung war es, die rheologischen Eigenschaften (gem. DIN EN 13395-1) zu bestimmen und erste mechanische Eigenschaften (gem. DIN EN 1015-11) abzubilden. Vielversprechende Zusammensetzungen wurden in Stufe II mit höherem Volumen hergestellt. In diesem Rahmen wurden auch Balken hergestellt und nach SIA 2052 Anhang E auf Biegezug geprüft [5]. Die Rissbildung wurde zusätzlich mithilfe von digitaler Bildkorrelation (Digital Image Correlation DIC) überwacht.

Die Versuchsmatrix ist in Tabelle 1 dargestellt. Einzelne Zusammensetzungen sind durch eine vertikale, Fasercocktails durch eine diagonale Linie getrennt. Unterstrichene wurden in großen Chargen hergestellt. Fasertyp D1 ist mit einem Stern gekennzeichnet, alle anderen Fasern sind vom Typ D2. Die Typen unterscheiden sich hinsichtlich ihres Durchmessers und des Carbonmatrixgehalts.

Tabelle 1: Versuchsmatrix mit Unterteilung nach Faser- (horizontal) sowie Fließmittelgehalt (vertikal). Jede Zelle der Matrix enthält die in der entsprechenden Kombination aus Faser- und Fließmittelgehalt verwendeten Faserlängen.

Faserlänge [mm]		Fasergehalt [M-%]			
		0,5	**1,5**	**2,5**	**3,1**
Fließmittelgehalt [M-%]	**4**	12 | 18 | 24 12/18 | 18/24	12 | 18 | 24 12/18 | 18/24	-	-
	5	-	18	12 | **18** 12*	18 | 24
	6	-	-	18 | 24	24*

Abbildung 11 fasst die wichtigsten Erkenntnisse der experimentellen Untersuchung zusammen. Es zeigt sich, dass mit steigendem FG das Ausbreitmaß ab- und die Biegezugfestigkeit zunimmt. Bei erhöhtem FG lassen sich allerdings auch größere Streuungen beobachten, was auf Fehlstellen durch Faseransammlungen zurückgeführt wird. DIC-Aufnahmen zeigen bei Balken mit FG ≥2,5% ein ausgeprägtes Multirissbild mit geringen Rissweiten, was auf einen guten Verbund zwischen Betonmatrix und Faser schließen lässt (vgl. Abbildung *12*).

Die Zusammensetzung mit 5% FM, 2,5% FG und 18 mm FL erweist sich als vielversprechend. In Bezug auf die Verarbeitbarkeit weist die Charge ein hohes Ausbreitmaß auf. Die Biegezugfestigkeiten liegen durchweg im oberen Drittel der getesteten Proben. Die Würfeldruckfestigkeit und das E-Modul liegen innerhalb der Klassifizierung nach SIA. Die Standardabweichung ist über alle Versuche hinweg verhältnismäßig gering, was auf eine homogene und konsistente Vermengung der Fasern ohne signifikante Fehlstellen hinweist.

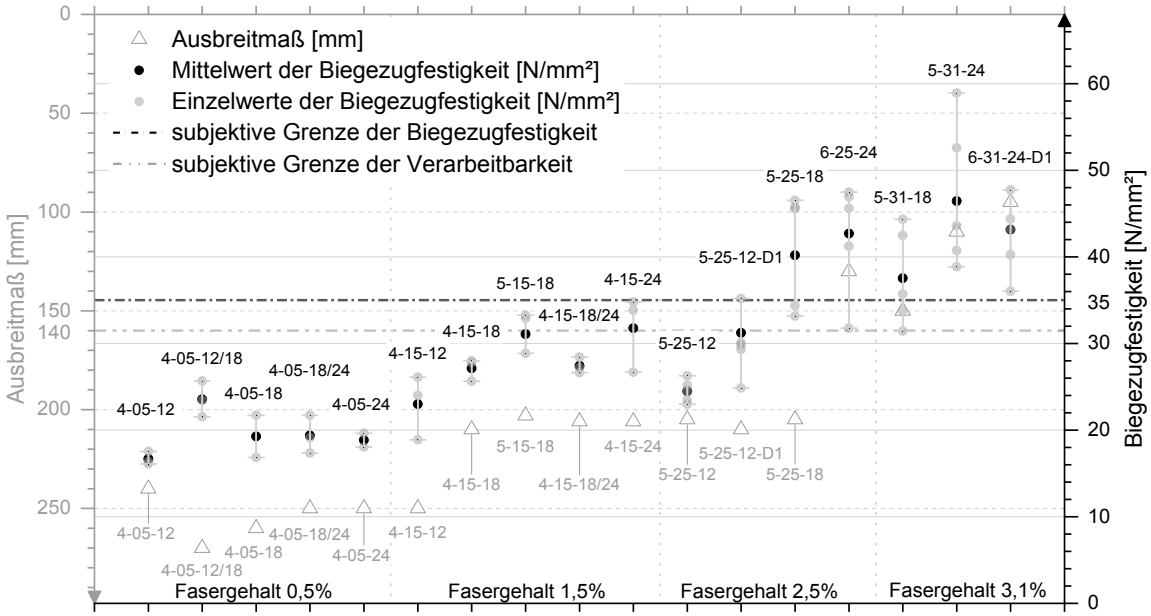


Abbildung 11: Darstellung von Ausbreitmaß (y-Achse links, Dreiecke) und Biegezugfestigkeit (y-Achse rechts, Punkte) der hergestellten Chargen. Die Fasergehalte steigen entlang der x-Achse. Subjektive Grenzen sind mit gepunkteten Linien dargestellt.

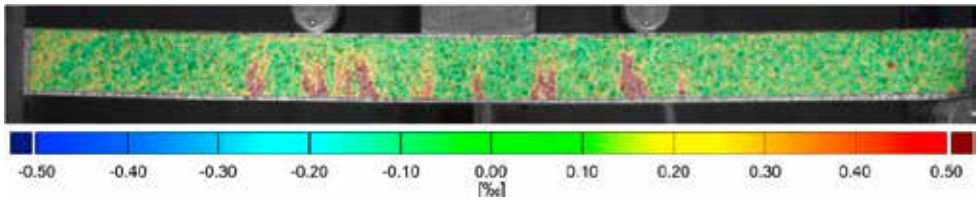


Abbildung 12: Multirissbildung unmittelbar vor Erreichen der Maximalkraft in der DIC-Auswertung. Die farbliche Darstellung zeigt die Verteilung der Dehnung auf der Probenoberfläche gemäß der abgebildeten Skala.

Analytische Betrachtung des Tragverhaltens

Die SIA 2052 beschreibt eine inverse Analyse zur Ermittlung der Zugfestigkeit aus Biegezugversuchen, was die Durchführung aufwendiger axialer Zugversuche erspart. Aufgrund des geringen Kenntnisstands zum Material wurde die Anwendbarkeit auf C-UHFB geprüft. Dazu wurden die in der Richtline enthaltenen Formeln hergeleitet, um eine Nachvollziehbarkeit der Werte sicherzustellen.

Da ein für die Analyse entscheidender Faktor auf empirischen Ergebnissen basiert, konnte die Anwendbarkeit durch eine rein theoretische Betrachtung nicht festgestellt werden. In Absprache mit den Industriepartnern wurden deshalb von einem externen Prüfinstitut Zug- und Biegezugversuche durchgeführt und die Ergebnisse anschließend mit der inversen Analyse nachvollzogen. Für eine effiziente Auswertung wurde die Analyse mithilfe eines Pythonprogramms automatisiert. Es konnte gezeigt werden, dass die inverse Analyse nach SIA 2052 ohne weitere Anpassungen auf C-UHFB anwendbar ist.

Dem Vorgehen nach SIA liegen stark vereinfachte Spannungsverteilungen über den Querschnitt zugrunde. Um die Spannungen realistischer abzubilden, wurde das Tragverhalten der Probekörper basierend auf den Zugversuchen analysiert. Ein weiteres Pythonprogramm bildet iterative Berechnungsprozesse zur Ermittlung der Spannungen ab, die bei bekannten Grenzwerten eine realitätsnähere, trilineare Spannungsverteilung ergeben.

Nachhaltigkeitsbetrachtung

Die Literaturrecherche zeigt, dass UHFB-Rezyklat mit geringfügigen Rezeptur-anpassungen zur Substitution des Premix bei der Herstellung von UHFB genutzt werden kann, ohne die Festigkeit zu mindern. Es bestehen außerdem Ansätze zum Recyclen der Carbonfaser, bspw. zu Partikeln, die als Zusatzstoff verwendet werden können. Aufgrund der noch begrenzten Verbreitung von C-UHFB existieren derzeit keine etablierten Verfahren zur Separation von Carbonfaser und Betonmatrix.

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Parameterstudie wurden Prüfkörper mit variierender Zusammensetzung analysiert. Für die Weiterentwicklung wird ein Fließmittelgehalt von 5%, ein Fasergehalt von 2,5 Vol.-% und eine Faserlänge von 18 mm empfohlen.

Die inverse Analyse nach SIA 2052 ermöglicht aus Biegezugversuchen auf das Zugtragverhalten von UHFB rückzuschließen. Die Analyse wurde automatisiert sowie die Anwendbarkeit auf C-UHFB untersucht und bestätigt.

Das der untersuchten inversen Analyse zugrundeliegende Modell basiert auf einer stark vereinfachten Spannungsverteilung. Es wurde ein weiteres Programm entwickelt, das die Spannungsverteilung eines biegezugbelasteten Prüfkörpers realitätsnäher abbilden soll.

Die Nachhaltigkeitsbetrachtung zeigt das große Potenzial zur Wiederverwendung der Materialien auf. Es sind allerdings weitere Untersuchungen erforderlich, die sich mit der Trennung von UHFB und Carbon sowie dem anschließendem Carbonrecycling auseinandersetzen.

Der Industriepartner newcycle GmbH arbeitet aktuell an einem Praxisprojekt, das u.a. auf dieser Masterarbeit aufbaut, sodass C-UHFB sich bald im praktischen Einsatz bewähren kann.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1] *Brühwiler, E.; Denarié, E.:* Stahl-UHFB - Stahlbeton Verbundbauweise zur Verstärkung von bestehenden Stahlbetonbauteilen mit Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB). *In:* Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 4, S. 216-226. https://doi.org/10.1002/best.201200076.

[2] *Luo, Y.; Razzaq, M.E.A.; Qu, W. et al.:* Introducing thermo-mechanochemistry of lignin enabled the production of high-quality low-cost carbon fiber††Electronic supplementary information (ESI) available. See DOI: https://doi.org/10.1039/d3gc04288j. *In:* Green Chemistry 26 (2024), Heft 6, S. 3281-3300. https://doi.org/10.1039/d3gc04288j.

[3] *Arnold, U.; Brück, T.; Palmenaer, A. et al.:* CCU by Algal Polyacrylonitrile Fiber Production: Process-Design, Techno-Economic Analysis and Climate related Aspects. *In:* Industrial & Engineering Chemistry Research 57 (2018). https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b04828.

[4] *Ravichandran, D.; Prem, P.R.; Kaliyavaradhan, S.K. et al.:* Influence of fibers on fresh and hardened properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC)—A review. *In:* Journal of Building Engineering 57 (2022), S. 104922. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104922.

[5] SIA 2052: Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) - Baustoffe, Bemessung und Ausführung. Ausgabe März 2016.

[6] *AFGC:* Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances – Recommandations (2013).

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. *Brühwiler, E.; Denarié, E.:* Stahl-UHFB - Stahlbeton Verbundbauweise zur Verstärkung von bestehenden Stahlbetonbauteilen mit Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB). *In:* Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 4
2. *Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.):* Beton Kalender 2017 - Schwerpunkte: Spannbeton, Spezialbetone, Wiley, 2016.
3. SIA 2052: Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) - Baustoffe, Bemessung und Ausführung. Ausgabe März 2016.

Autor, Coautoren

M.Eng. Leon Unewisse

2015-2017:	Ausbildung zum staatlich anerkannten Bauzeichner
2017-2021:	Bachelor of Engineering, Bauingenieurwesen
2021-2024:	Master of Engineering, Bauingenieurwesen
2019-2022:	Werkstudent in der Tragwerksplanung | bracher bock ingenieure
2022-2024:	Lehrassistent Fachbereich Massivbau | Hochschule München
seit 2024:	Wissenschaftlicher Mitarbeiter | Hochschule München

Betreuer

Die Arbeit wurde im Labor für Massivbau und Konstruktiven Ingenieurbau an der Hochschule München angefertigt.

Erstbetreuer: Prof. Dr. Jörg Jungwirth

Zweitbetreuer: M.Eng. Andre Strotmann

Industriepartner

Ein besonderer Dank geht an die drei Industriepartner, die mich durch das zur Verfügung stellen von Materialien und Knowhow aus der Praxis unterstützten:

- Implenia AG
- newcycle GmbH
- KIBAG Holding AG

Die Arbeit wird mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ANWENDUNG VON BUILDING INFORMATION MODELING IN DER STRASSENERHALTUNG

Masterarbeit

Annica Wedekind

Die Digitalisierung hält zunehmen in jeden Wirtschaftsbereich Einzug. Der technische Fortschritt verändert auch die Baubranche in sehr hohem Tempo. Doch nicht jede Innovation ist für jeden Bausektor geeignet. Während BIM im Hochbau ein alltäglicher Begriff ist, findet er im Tief- und Straßenbau kaum Anwendung. Im Folgenden wird die Eignung der BIM-Arbeitsmethode für Erhaltungsmaßnahmen im Straßen- und Tiefbau beschrieben. Hierzu werden die vier maßgeblichen Kriterien, die Einfluss auf den Erfolg einer Baumaßnahme haben, vorgestellt und anhand eines reell durchgeführten Projektes bewertet. Es werden Unterschiede in Arbeitsleistung und Betriebskosten zwischen herkömmlicher Bauart und BIM-Methode aufgezeigt und eine Bewertungsformel generiert. Anhand realer Anwendungsbeispiele kann der mathematische Nachweis validiert werden. Die Entscheidung, ein Bauvorhaben mit der BIM-Methode durchzuführen, wird durch die vorausgehende Evaluierung der Maßnahme formelseitig unterstützt.

Keywords: BIM-Methode, Straßenbau, Erhaltungsmaßnahmen, Bewertungsformel, Modellabrechnung

Grundlagen und Voraussetzungen für BIM

„Wenn der Wind der Veränderung weht, bauen die einen Mauern, die anderen Windmühen. – Chinesisches Sprichwort“ [1]
Die Zeit, in denen Bauprojekte mit Zettel, Stift und Maßband dokumentiert und abgerechnet werden, ist vorbei. Die Digitalisierung verändert auch die Baubranche und bringt technische Fortschritte, sowie innovative Ideen in den Arbeitsalltag. Hierbei ist Building Information Modeling (BIM) ein zentrales Thema, das vor allem im Hochbau von Bedeutung ist und in zahlreicher Fachliteratur erwähnt wird. Wenig Anwendung der BIM-Methode kann bei Erhaltungsmaßnahmen im Straßenbau festgestellt werden. Die Studie analysiert die Anwendung von BIM, anhand eines Bauvorhabens, und zeigt mögliche Zeit- und Kostenoptimierungen auf.

BIM ist eine Arbeitsmethode, bei der ein digitales, dreidimensionales Bauwerksmodel alle relevanten Informationen, für den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks, erfasst und

verwaltet. Es bietet eine detaillierte Visualisierung und eine umfassende Datenbereitstellung, die den Bauprozess, von der Planung bis zum Rückbau, unterstützt.

Die Einsatzformen für BIM (open, closed, little, big) unterscheiden sich in der Art des Datenaustauschs aller Projektbeteiligten und in der Tiefe, in der die Methode zum Einsatz kommt. Für einen erfolgreichen Einsatz von BIM sind geeignete Software, definierte Rollen/Verantwortlichkeiten sowie einheitliche Standards in der digitalen Dokumentation, erforderlich.

Obwohl das Baugewerbe eine zentrale Rolle in der deutschen Wirtschaft hat, steht es jedoch in der Arbeitsproduktivität, im Vergleich zu anderen Sektoren, hinten an. Zurückzuführen ist dies unter anderem auf mangelnde Planung, unzureichende Zusammenarbeit der Gewerke und einen niedrigen Grad der Digitalisierung. Die BIM-Methode bietet Potential, diese Probleme zu beheben und die Arbeitsproduktivität zu steigern.

Technische Sichtweise zu BIM

Das digitale Modell ermöglicht eine schnellere Angebotserstellung und genauere Kalkulation durch visuelle Darstellung. Es erleichtert die Bauvorbereitung, indem es Bauzeitenpläne integriert und eine Simulation des Bauablaufs ermöglicht. Fehler in der Planung, wie Kollisionen von Gewerken, können frühzeitig erkannt und umgangen werden. Zudem sind Lieferungen besser zu koordinieren und Materialengpässe zu vermeiden. BIM erleichtert die Erstellung von Mengenermittlung und Abrechnung und reduziert die Fehlerquote in der Dokumentation.

Zahlreiche Herausforderungen müssen jedoch mit der neuen Arbeitsweise bewältigt werden. Darunter die unvollständige Informationsweitergabe zwischen Planung und Ausführung, die die Erstellung eines präzisen 3D-Modells erschwert. Auch die hohen Dokumentationsanforderungen können eine zusätzliche Belastung darstellen. Die Einführung von BIM ist kosten- und zeitintensiv und setzt eine aktive Anpassung der internen Prozesse voraus. Der Übergang zu BIM ist ein Lernprozess, der jedoch langfristig die Wettbewerbsfähigkeit sichert.

Neben Baufirmen können auch Städte und Gemeinden von der Umstellung auf BIM profitieren. Im kommunalen Straßenbau haben die Erhaltung und Sanierung von Verkehrswegen höchste Priorität. Dies organisiert das Asset-Management (AM) der Baulastträger. Es empfiehlt, wie und wann Straßen saniert werden. Verzögerte Sanierungen können hohe Folgekosten verursachen. BIM verbessert die Qualität des AM, indem es den gesamten Lebenszyklus einer Straße berücksichtigt. Es werden Daten zu Nutzung, Zustand und Lebensdauer gesammelt, in einem Modell verarbeitet und Prognosen und Szenarien erstellt. Dies führt zu besserer Planung und einer effizienteren Sanierung.

Umsetzung einer BIM-Baustelle

Die Firma Brochier Rohrleitungs- und Anlagenbau GmbH hat diese Untersuchung beauftragt. Im bisherigen Baubetrieb wird BIM nur in geringem Maße genutzt. Häufiger finden jedoch digitale Vermessungsinstrumente, wie GPS-Messgeräte und Tachymeter, Verwendung. Die erfassten Daten werden von Bauzeichnern in Plänen verarbeitet und in Mengenermittlungssysteme eingetragen. Um wettbewerbsfähig zu bleiben und Arbeitsprozesse weiter zu optimieren, plant die Firma Brochier Rohrleitungs- und Anlagenbau GmbH, BIM auch für zukünftige Baumaßnahmen einzusetzen.

Die Baumaßnahme, die zu Untersuchungszwecken herangezogen wird, umfasst den Ausbau und die Sanierung eines Straßenabschnitts von etwa 250m. Der Straßenkoffer wird saniert und der Gehweg mit

Granitrandsteinen und Betonpflaster erneuert. Ein FTTH-Leerrohrsystem mit 15 Hausanschlüssen wird zeitgleich verlegt. Die Firma Brochier verwendet im Rahmen der Baumaßnahme verschiedene Software und Programme, darunter den isl-baustellenmanager von isl-kocher für die 3D-Modellerstellung und Mengenermittlung, AutoCAD für Zeichnungen sowie BRZ-Programme für Kalkulation und Abrechnung. Zudem kommen die MTS-Baggersteuerung und ein digitaler Verdichter zum Einsatz. Ein geeignetes GPS-System von MTS wird für Vermessungen verwendet.

In der Bauvorbereitung wurde vom Ingenieurbüro ein kombinierter Bestands- und Ausführungsplan übergeben. Dieser war für das 3D-Modell nicht ausreichend, sodass ein neuer digitaler Plan erstellt wurde. Dies ist ein typisches Beispiel für eine unvollständige Informationsweitergabe. Während der gesamten Bauzeit fand eine 3D-Baggersteuerung Anwendung, um eine präzisere Durchführung von Feinplanum und Verdichtung zu ermöglichen. Für einzelne Aufgaben, wie dem Aufmaß von Hausanschlüssen, wird der GPS-Stab verwendet. Die Abrechnung erfolgt durch die modellgestützte Mengenermittlung des isl-baustellenmanager.

BIM-Bewertungsformel

Wenn der Auftraggeber keine Anforderungen an den Digitalisierungsgrad der Baumaßnahme stellt, entscheidet das Bauunternehmen selbst, inwieweit es die BIM-Methode anwendet. Die Studie ermittelt Faktoren, die den Einsatz der BIM-Methode empfehlen. Maßgeblich gehen vier Kriterien in die Bewertungsformel ein. Lohn- und Betriebskosten der untersuchten Bauweisen bilden die Grundlage.

Kriterium eins zur Bewertung des BIM-Einsatzes ist die 3D-Baggersteuerung, die den Arbeitsaufwand für den Aushub effizient gestaltet. Aufgrund des 3D-Modells können Tiefen und Breiten beim Aushub exakt gehalten und einzubauende Schichtstärken direkt überprüft werden. Dieses Vorgehen führt zu einer Produktivitätssteigerung von 26% bis 29%. Zusätzlich werden die Betriebsstoffkosten durch den Einsatz der Baggersteuerung minimiert.

Die zweite Einflussgröße ergibt sich durch die Reduzierung des Aufwands bei Aufmaß und Absteckung (A&A). Aufgrund der ständigen Höhen- und Breitenüberprüfung der GPS-Steuerung des Baggers müssen weniger Punkte per Hand abgesteckt und aufgenommen werden. Die Effizienzsteigerung bei Aushub und Verfüllung sowie A&A, durch den Einsatz einer 3D-Baggersteuerung, geht BIM-stärkend in die Bewertungsformel ein. Die Intensität der Baggernutzung ist proportional zur Menge der bewegten Kubikmeter. Für die Bewertung muss die Kostensteigerung der Aufrüstung des Baggers (3D-Steuerung) ins Verhältnis der gestiegenen Arbeitsleistung und den gesunkenen Betriebsstoffen gesetzt werden. Es ergibt sich eine Einsparung von 3,745€/m³. Zusätzlich wird die Zeit-/Kostenersparnis des Poliers, die sich aus dem reduzierten Aufwand von A&A ergibt, mit dessen Stundenlohn multipliziert und auf die Menge der Bodenbewegung normiert. Es zeigt sich eine zusätzliche Einsparung von 0,110€/m³.

Alle Arbeiten zur Modell- und Planerstellung werden im technischen Innendienst durchgeführt. Es werden sowohl die konventionelle als auch die BIM-Variante bewertet. Die herkömmliche Variante erfordert nur die Erstellung eines Abrechnungsplans, während bei der BIM-Methode zusätzliche Aufgaben anfallen, wie das Sammeln von Plänen, die Modellerstellung und -überarbeitung, sowie die Integration von Messpunkten. Ein Vergleich der benötigten Arbeitszeit beider Varianten zeigt, dass die BIM-Methode einen höhereren Aufwand für den technischen Innendienst mit sich bringt. In der Berechnungsformel ist dies als drittes Kriterium mit dem Parameter Zeichnung zu erkennen.

Die Abrechnung der Baumaßnahme wird für beide Arbeitsmethoden erstellt und findet als viertes Kriterium Beachtung im Berechnungsmodell. Während für die konventionellen Variante eine Abrechnung, nach den im Plan festgehaltenen Mengen, erfolgt, wird bei der BIM-Variante eine modellgestützte Abrechnung generiert. Dies hat den Vorteil, dass mehrere Objekte mit Positionsgruppen verknüpft werden können, und so eine effizientere Abrechnung generiert werden kann.

Der Aufwand bei der Modellerstellung, als auch bei der Abrechnung, ist abhängig von der Komplexität einer Baumaßnahme. Am besten können die Faktoren Auftragssumme (AS) und Positionszahl des Leistungsverzeichnis (LV) den Umfang einer Baustelle beschreiben. Um die Verhältnismäßigkeit beider Faktoren zu wahren, geht nur ein Tausendstel der AS in die Berechnung ein. Es wird das Delta der Zeitaufwände für Modellerstellung und Abrechnung aus beiden Methoden ermittelt und auf die AS und das LV der Musterbaumaßnahme normiert. So ergab sich für den zeichnerischen Aufwand eine Kostensteigerung von 2,138€/(AS/1000€+LV) im BIM-Fall. Dem gegenüber steht die Kosteneinsparung durch die BIM-Abrechnung von 0,421€/(AS/1000€+LV).

Die finale BIM-Bewertungsformel ergibt sich aus den genannten Faktoren und wird in Abb.1 dargestellt. Angewandt, für ein weiters Musterprojekt, können bei einer Aushubmenge von 6.400m³ und 327 LV, Kosteneinsparungen von 1,31% berechnet werden.

Die BIM-Bewertungsformel ist innerhalb eines festgelegten Anwendungsrahmen valide. Veränderungen in den Lohn- oder Betriebskosten erfordern einen entsprechende Anpassung der Kriterien. Des Weiteren können baubegleitende Änderungen im Leistungsumfang, wie eine Erhöhung des Aushubvolumens, sowie kostenintensive Nachträge, die BIM-Eignung einer Maßnahme erheblich beeinträchtigen.

Fazit

Ziel der Studie ist, den Mehrwert der BIM-Arbeitsmethode, anhand eines Bauvorhabens zu beleuchten. Dabei wurden ein Bagger mit MTS 3D-Steuerung und der isl-baustellenmanager als BIM-Software verwendet. Arbeitszeiten und Leistungsansätze wurden untersucht und mit dem konventionellen Vorgehen verglichen. Eine Bewertungsformel zur Bestimmung der BIM-Eignung wurde entwickelt, die Eingangsparameter, wie Aushubmenge, Auftragsvolumen und Arbeitsumfang, heranzieht. Die Forschung zeigt, dass der Einsatz von BIM größtenteils positive Effekte hat. Negativ wirkt sich die Modellerstellung aus.

Die entwickelte Methode kann von Bauunternehmen genutzt und individuell angepasst werden. Weitere Studien sollten alternative BIM-Softwarelösungen und ihre Effizienzgewinne untersuchen. Das Ergebnis der Arbeit zeigt, dass BIM sich für Erhaltungsmaßnahmen im Straßen- und Tiefbau, abhängig der Projektanforderungen, eignet.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{Y_{BIM}} &= (\Delta P_{Baggersteuerung} + \Delta P_{A\&A}) * V + (\Delta P_{Zeichnung} + \Delta P_{Abrechnung}) * \left({}^{AS}/_{1000€} + LV\right) \\ &= \left(3{,}745\,\frac{€}{m^3} + 0{,}110\,\frac{€}{m^3}\right) * V + \left(-2{,}138\,\frac{€}{{}^{€}/_{€}+Stk} + 0{,}421\,\frac{€}{{}^{€}/_{€}+Stk}\right) * \left({}^{AS}/_{1000€} + LV\right) \\ &= \boldsymbol{3{,}855\,\frac{€}{m^3} * V - 1{,}717\,\frac{€}{{}^{€}/_{€} + Stk} * \left({}^{AS}/_{1000€} + LV\right)} \end{aligned}$$

Abb. 1: BIM - Bewertungsformel [eigene Darstellung]

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

[1]: Schrode, R., 2021. Die Krise als Chance. fokus automatisierung - BIM im kommunalen Verkehrswege und Tiefbau (K-VTB), 01.03., p.3

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Schrode, R. et al., 2023. BIM-Handbuch; Von der Verschwendung zur Vernunft. Hayingen MTS Schrode AG.
2. Dr. Buttgereit, A. & Prof. Dr. Stöckner, M., 2021. BIM für kommunale Verkehrsflächen - Möglichkeiten und aktuelle Herausforderungen. 1. Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, pp. 293-302.
3. Egger, M., Hausknecht, K., Liebich, T. & Przybylo, J., 2013. BIM Leitfaden für Deutschland, Bundesministerium für Bau-, Stadt-, und Raumforschung.

Autor

M. Eng. Annica Wedekind

seit 10/2024	Firma Brochier Rohrleitungs- und Anlagenbau GmbH im technischen Innendienst
10/2022 - 12/2024	Masterstudiengang Urbane Mobilität an der TH-Nürnberg
10/2018 - 09/2022	Bachelorstudiengang Bauingenieurwesen mit Vertiefung Verkehrswesen an der TH-Nürnberg
bis 06/2018	Abitur am Gymnasium Eckental

Betreuer

Die Arbeit wurde im Zuge des Studiengangs Urbane Mobilität an der Fakultät Bauingenieurwesen der TH Nürnberg, unter der Leitung von Herrn Prof. Berthold Best, angefertigt. Die Zweitprüfung übernahm Herr Prof. Roland Kraus. Als Ansprechpartner der Firma Brochier Rohrleitungs- und Anlagenbau GmbH standen Herr Bernd Schöner und Herr Patrick Mühlöder stehts zur Verfügung.

Die Arbeit wird mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ISBN 978-3-89650-588-0 // € (D)

