



DAS
BAYERISCHE
BAUGEWERBE

HOCHSCHULPREIS
des Bayerischen Baugewerbes

2021

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

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, April 2021

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 werden ausgezeichnet. Der Preis wurde 2021 zum 13. Mal vergeben. Aufgrund der Corona-Pandemie wurde die Preisverleihungsfeier im Oskar von Miller Forum in München digital als Online-Stream durchgeführt.

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

In diesem Jahr wurden insgesamt 16 Bachelor- und Masterarbeiten von

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

eingereicht. Aus den 16 Arbeiten hat der Wettbewerbsausschuss entschieden, 3 Arbeiten mit einem Geldpreis und 13 Arbeiten mit einer Teilnahmeurkunde auszuzeichnen.

Mit dem 1. Preis wurde Felix Sirtl mit seiner Bachelorarbeit „Erweiterte Imperative Modellprüfung - Ein visueller Programmieransatz für eine benutzerfreundliche MVD Generierung und Validierung“ ausgezeichnet. Herr Sirtl hat ein Tool entwickelt, um relevante Informationen aus digitalen Gebäudemodellen zu finden und zu prüfen. Damit leistet er einen Beitrag zur Lösung der immer noch verbreiteten Schnittstellenproblematik bei der Anwendung von BIM in den baugewerblichen Unternehmen.

Den 2. Preis erhielt Christine Braun für ihre Bachelorarbeit „Zur Genauigkeit der

Carbonatisierungstiefe von Beton“. Phenolphthalein, wichtigster Indikator zur Prüfung der Carbonatisierungstiefe von Beton, wurde bereits 2009 als krebserregend eingestuft. Frau Braun untersucht neue Stoffe und Messverfahren auf natürlicher Basis um Phenolphthalein zu ersetzen. Die Arbeit ist ein Beitrag zum Gesundheitsschutz im Bauwesen und der Bauwerkserhaltung (Graue Energie).

Der 3. Preis ging an Lena Rappert mit ihrer Bachelorarbeit „Trittschallübertragung von Stahlbeton-Bodenplatten in darüberliegende, schutzbedürftige Räume“. Für die Übertragung von Trittschall in darüber liegende Räume gibt es noch kein normiertes Berechnungsverfahren. Die Arbeit erarbeitet Grundlagen auf dem für die baugewerblichen Betriebe wichtigen Feld des Schallschutzes.

Der Wettbewerbsausschuss:

Benedikt Baumann
 Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann
 Georg Gerhäuser
 Prof. Dr.-Ing. Thomas Neidhart
 Thomas Schneider
 Ricarda Sposito
 Olaf Techmer
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel

Inhaltsverzeichnis

Christine Braun , Bachelorarbeit Zur Genauigkeit der Carbonatisierungstiefe von Beton	Seite 3
Max Dik , Master's Thesis Optimierung der Baubarkeit bei der Leichtbetonextrusion	Seite 8
Lena Drewes , Masterarbeit BIM-Integration von Zertifizierungskriterien für nachhaltige Gebäude in den frühen Entwurfsphasen	Seite 14
Lisa Forstmaier , Bachelorarbeit Einfluss der Vorsättigung von Leichtzuschlägen auf die Rohdichteveränderung im Pumpprozess	Seite 19
Georg Kolb , Masterarbeit Ungesättigte hydraulische Eigenschaften von industriellen Nebenprodukten – Rechnerische Ermittlung von Hauptbewässerungskurven anhand von Hauptentwässerungskurven	Seite 24
Marina Langer , Masterarbeit Prediction of window control actions using machine learning	Seite 29
Melanie Lechner , Masterarbeit Untersuchungen zur rechnerischen Ermittlung der erforderlichen Einbindetiefe bei tiefen Baugruben mit dem Teilsicherheitskonzept	Seite 34
Michael Lehle , Masterarbeit Numerische Sensitivitätsanalyse des "Thermal Integrity Profiling" für Ortbetonbohrpfähle	Seite 39
Marcus Lindner , Masterarbeit Entwicklung einer zuverlässigen Methode zur nachträglichen Putzmörtelgruppenbestimmung anhand der chemischen Zusammensetzung	Seite 44
Nathalie Niesser , Rebecca Baum , Masterarbeit Experimentelle Kleinversuche an Planhochlochziegeln und Ziegelscherben mittels optischer 3D-Messtechnik	Seite 49
Florian Parhofer , Masterarbeit Untersuchungen zum Einsatz von Recyclingbetonmehl als Füller, reaktiver Betonzusatzstoff oder Binder mit dem Ziel der Zementreduktion	Seite 55
Lena Rappert , Bachelorarbeit Trittschallübertragung von Stahlbeton-Bodenplatten in darüberliegende, schutzbedürftige Räume	Seite 60
Anneka Seuß , Bachelorarbeit Analytische Untersuchungen zum Einfluss der Vorspannkraft auf die Übertragung einer Torsionsbeanspruchung in trockenen Fugen	Seite 65
Felix Sirtl , Bachelorarbeit Erweiterte Imperative Modellprüfung - Ein visueller Programmieransatz für eine benutzerfreundliche MVD Generierung und Validierung	Seite 70
Hannes Nikolas Valentin , Bachelorarbeit Ingenieurtechnische Grundlagen für die Ausbildung von Einsatzkräften zur technischen Rettung bei Verschüttungsunfällen im Tiefbau“	Seite 75
Timur Weilbach-Eyüboğlu , Masterarbeit Mit digitalen Tools zu einem zukunftsorientierten Brückenbau – Entwicklung eines BIM-basierten Gesamtmodells zur Unterstützung der Entwurfs- und Genehmigungsplanung eingleisiger Bahnbrücken in Fertigteilbauweise in Anlehnung an die Eisenbahnüberführung bei Burgheim	Seite 81

ZUR GENAUIGKEIT DER CARBONATISIERUNGSTIEFE VON BETON

Bachelorarbeit

Christine Braun

Die Carbonatisierung spielt eine wichtige Rolle bei Stahlbetonbauteilen, da sie wesentlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit und Lebensdauer hat. Eine Methode zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe ist das Aufsprühen einer Indikatorlösung auf frische Bruchflächen. Die Indikatorlösung muss bei einem pH-Wert zwischen 8 und 11 umschlagen. Die Durchführung erfolgt derzeit meistens mithilfe einer einprozentigen Phenolphthaleinlösung, welche jedoch in den letzten Jahren als gesundheitsschädigend und krebserregend eingestuft wurde. Durch Indikatoren, die auf natürlicher Basis hergestellt sind, soll deshalb eine Alternative zu dieser Lösung gefunden werden. Versuche zeigten, dass sowohl Curcumin als auch der Farbstoff der schwarzen Karotte als Basis dient. Sie zeigen eine vergleichbare Verfärbungsfläche wie Phenolphthalein und Thymolphthalein. Letzteres wurde bereits als Alternative erforscht.

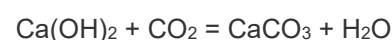
Um die Bestimmung der Carbonatisierungstiefe zu automatisieren, wurde ein Programm erstellt, welches mithilfe weniger Klicks des Anwenders die Carbonatisierungstiefe automatisch misst. Der Vergleich zur manuellen Auswertung zeigt eine hohe Genauigkeit der bestimmten mittleren Carbonatisierungstiefe und bestätigt somit, dass das Programm durchaus in der Praxis einsetzbar ist. Es verlangt jedoch noch viel Aufmerksamkeit und Interpretation durch den Anwender, weshalb es künftig noch erweitert und ausgebaut werden soll.

Keywords: Carbonatisierung, natürliche Indikatoren, Carbonatisierungstiefe, Automatisierung, digitale Bildverarbeitung

Vorgang der Carbonatisierung

Carbonatisierung ist ein wichtiger und sich wiederholender Begriff in Verbindung mit Stahlbetonbauten. Damit wird der chemische Vorgang bezeichnet, bei welchem sich calciumhaltige Verbindungen durch die Aufnahme von Kohlenstoffdioxid

in Calciumcarbonat umwandeln. Die chemische Formel hierfür lautet [1]:



Daran lässt sich erkennen, dass während des Vorgangs der Carbonatisierung das Ca(OH)_2 des Betons umgewandelt wird, wodurch sich der pH-

Wert entscheidend ändert. Dieser, welcher normalerweise bei nicht carbonatisiertem Beton $> 12,6$ ist, kann durch die CO_2 -Diffusion auf Werte unter 10 absinken. Folglich verschwindet die Alkalität des Betons und somit löst sich die Passivität auf. Schwerwiegende Konsequenzen hat dies bei Stahlbetonbauten, da der Bewehrungsstahl somit nicht mehr vor Korrosion geschützt ist [2].

Bestimmung der Carbonisierungstiefe

Die Carbonisierungstiefe stellt eine messbare Größe für den Alterungsprozess des Betons dar. Ihre Bestimmung hilft, einem fortschreitenden Rosten des Bewehrungsstahls so früh wie möglich entgegenzuwirken. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Carbonisierungstiefe ist in der DIN-EN 12390-12 [3] fest vorgeschrieben. Die gängigste Methode zur Visualisierung der carbonatisierten Fläche ist die mithilfe einer einprozentigen Phenolphthaleinlösung [4]. Seit dem 01. Juni 2009 wurde Phenolphthalein als krebserregend (Kategorie 2) eingestuft [5].

Alternative Indikatoren auf natürlicher Basis

Im Zuge der Voruntersuchungen wurden deshalb Indikatoren auf natürlicher Basis als Alternative zur Phenolphthalein und dem bereits aus der Literatur bekannten Thymolphthalein verglichen. Dazu wurden Betonprobekörper mehrfach gespalten, sodass insgesamt jeweils fünf Bruchflächen aus dem gleichen Balken entstanden sind. Anschließend wurde auf jede frische Betonbruchfläche ein Indikator aufgesprüht.

Die mittlere Carbonisierungstiefe wurde jeweils 30 Minuten nach dem Besprühen der frischen Bruchfläche bestimmt. Als mögliche Alternativen dienten hierzu die drei folgenden Indikatoren, welche im Zuge einer Zusammenarbeit mit der TU München von deren Chemielabor hergestellt wurden:

- 0,5%-ige Curcumin - Ethanol Mischung
- 2,5-M.% Black Carrot - Ethanol/Wasser Mischung (70/30)
- 2,2-M.% Grape – Ethanol/Wasser Mischung (70/30)

Die bestimmte mittlere Carbonisierungstiefe eines jeden Indikators wurde daraufhin mit dem Ergebnis der Phenolphthalein- und Thymolphthaleinlösung verglichen. Geringe Abweichungen zeigten sich bei den Indikatoren auf Basis von Curcumin und des Farbstoffes der schwarzen Karotte. Die mittlere Carbonisierungstiefe hatte jeweils eine Abweichung von < 2 mm im Vergleich zur Phenolphthaleinlösung. Der Indikator auf Basis des Farbstoffes der Traube lieferte hingegen keine genaue Verfärbungsfläche. In Abbildung 1 ist zu sehen, dass es nicht möglich war, die Carbonisierungstiefen zu bestimmen. Da dieser jedoch genauso wie der Indikator auf Basis der schwarzen Karotte auf Anthocyanen beruht, ist zu vermuten, dass der prozentuale Anteil des Traubensaftes zu gering war. In Zukunft sollte dies noch anhand anderer Mischungsverhältnisse verifiziert werden.



Abb.1: Verfärbungsfläche des Traubenindikators

Die Voruntersuchung hat gezeigt, dass es Alternativen zur Phenolphthaleinlösung gibt, welche auf natürlichen Stoffen basieren. Diese sollten in Zukunft weiter untersucht werden, um das gesundheitschädigende Phenolphthalein künftig zu ersetzen und so die Mitarbeiter zu schützen.

Automatisierte Bestimmung der Carbonatisierungstiefe mithilfe digitaler Bildanalyse

Die Bestimmung der Carbonatisierungstiefe erfolgt an insgesamt drei bis fünf Messpunkten je Kante und zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten. Nach der DIN EN 12390-12 [3] soll diese auf eine Genauigkeit von 0,5 mm abgemessen werden. Das hat zur Folge, dass der Prozess zum einen sehr zeitaufwändig ist und zum anderen auch eine hohe Präzision erfordert. Abgesehen davon lassen sich Fehler und kleine Ungenauigkeiten bei der manuellen Ablesung kaum vermeiden.

Deshalb sollte im Zuge dieser Abschlussarbeit die Bestimmung der Carbonatisierungstiefe durch eine digitale Bildanalyse automatisiert und somit vereinfacht werden. Es wurde dafür ein zeitsparender Algorithmus entwickelt, welcher genaue Ergebnisse über die Carbonatisierungstiefe liefert. Python wurde als Programmiersprache gewählt, welche durch eine klare Syntax und einfache Lesbarkeit vielseitig einsetzbar ist. Python unterstützt sowohl die objektorientierte als auch funktionale Programmierung. Entscheidend ist hierbei für das Unternehmen, dass diese Programmiersprache kostenfrei ist und sich mit den üblichen Betriebssystemen (UNIX, Linux, Windows und Mac OS) verwenden lässt [6].

Voraussetzungen zur Verwendung des Programmes

Um eine erfolgreiche Bestimmung der Carbonatisierungstiefe zu gewährleisten, muss der Anwender zunächst einige Punkte beachten. Das Bild des Probekörpers mit der aufgetragenen Indikatorlösung muss unter guten Lichtverhältnissen aufgenommen werden. Vor allem ist darauf zu achten, dass nur die untersuchte Seite zu sehen ist und größere Schatteneinflüsse verhindert werden. Außerdem muss der Hintergrund einfarbig sein und sich vom Probekörper und dessen Verfärbung farblich deutlich unterscheiden.

Segmentierung des Bildes

Die Basis des Programmes ist die Segmentierung des Bildes in die Bereiche Hintergrund, Probekörper und Verfärbungsfläche mit Hilfe der RGB-Werte. Das RGB-Farbmodell stellt alle sichtbaren Farben durch eine Kombination aus Rot, Grün und Blau dar. Jede Farbe ist also durch drei Komponenten definiert. Diese können Werte zwischen 0 und 255 annehmen, je nach Intensität der Grundfarbe [7]. Durch Klicks des Anwenders in die drei entscheidenden Segmente werden mithilfe der region-growing Methode das Bild je Pixel analysiert und als Ergebnis die Verfärbungs- und Materialgrenzen bestimmt. Mittels der euklidischen Distanz wird für jeden Pixel der Abstand zu den Farbwerten der drei Bereiche berechnet und dieser anschließend dem Bereich mit der geringsten Differenz zugeordnet. Abbildung 1 zeigt eine erfolgreiche Segmentierung eines Bildes, auf welchem der Probekörper mit aufgetragener Indikatorlösung zu sehen ist.

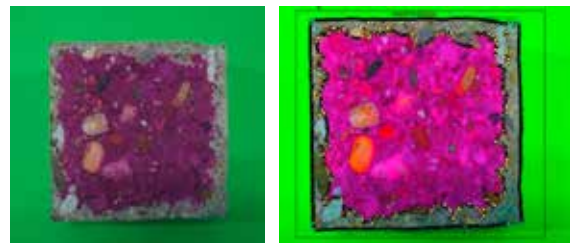


Abb. 2: Analyse und Segmentierung des Bildes auf Basis der RGB-Werte der drei Bereiche

Berechnung der Carbonatisierungstiefen

Die Bestimmung der Segmentgrenzen ermöglicht es, die Carbonatisierungstiefen je Pixel zu berechnen. Dies wird automatisch mithilfe der euklidischen Distanz ausgeführt.

Ausgaben des Programmes

Nach einer automatischen Berechnung durch das Programm werden dem Verwender zunächst mittels Histogrammen die Carbonatisierungstiefen

und die dazugehörige Anzahl an Punkten dargestellt. Darauf folgt eine Statistik mit den Mittelwerten, Medianen und den fünf häufigsten am vorkommenden Carbonisierungstiefen. Diese Werte werden für jede Kante des Probekörpers und für die Kombination, das heißt die gesamte Bruchfläche, ausgegeben. Die Ausgaben sollen dem Anwender helfen, die Ergebnisse genauer interpretieren zu können und Rückschlüsse durch die Zerstreung der berechneten Tiefen zu ziehen.

Vergleich der digitalen zur manuellen Ablesung

Um das selbstentwickelte Programm zur automatisierten Ablesung der Carbonisierungstiefen zu

testen, wurde der Mittelwert der manuellen Ableseung, welcher sich aus jeweils acht Messpunkten je Seite ergibt, dem vom Programm berechneten Mittelwert, welches einen Messpunkt je Pixel verwendet, gegenübergestellt. Die Ergebnisse des Vergleiches zeigen, dass das Programm, unabhängig vom verwendeten Indikator der Voruntersuchung, benutzt werden kann und vergleichbare Ergebnisse liefert. Das bedeutet, dass es auch künftig Anwendung findet, wenn die bisher verwendete Phenolphthaleinlösung durch eine Alternative ersetzt wird. Tabelle 1 zeigt, dass die Ergebnisse der automatisierten Bildanalyse mit einer Abweichung von < 2 mm vergleichbar sind und eine Anwendung in der Praxis möglich ist.

Vergleich	Phenolphthalein	Curcuma	Thymolphthalein	Black Carrot
Mittelwert abgelesen [mm]	6,28	5,81	9,03	7,5
Mittelwert digital bestimmt [mm]	7,29	7,28	10,56	7,37
Abweichung [mm]	1,01	1,47	1,53	-0,13
Abweichung [%]	13,85	20,19	14,49	-1,76

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Ergebnisse der digitalen und manuellen Auswertung auf Basis unterschiedlicher Indikatoren

Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch die digitale Bestimmung der Carbonisierungstiefe ist eine höhere Präzision gegeben und Ableseungenauigkeiten werden vermieden. Es besteht die Möglichkeit zur Integration in BIM und Bauwerksmanagementsystemen. In der Praxis ist dies vor allem im Bereich des Bauens im Bestand entscheidend, da durch das Programm eine er-

höhte Qualität der Zustandserfassung bestehender Bauwerke möglich ist. Auch bei Neubauten lässt sich das Programm zur indirekten Qualitätskontrolle von Nachbehandlungen anwenden. Durch die einfache Anwendung kann dieser automatisierte Prozess bereits nach einer kurzen Einführung der Mitarbeiter im Unternehmen integriert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] DERLER, P., Hg., 2014. Betonschäden. Ursache - Analyse - Mängelbeseitigung - Haftung. Kissing: WEKA-Media. WEKA-Praxislösungen. ISBN 978-3-8111-2924-5.
- [2] STARK, J. und B. WICHT, Hg., 2013. *Dauerhaftigkeit von Beton*. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: Springer Berlin. ISBN 978-3-642-35277-52020.
- [3] DIN 12390-12 2020 ACC (2).
- [4] LO, Y. und H.M. LEE, 2002. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy [online]. *Building and Environment*, 37(5), 507-514. ISSN 03601323. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0360-1323(01)00052-X.
- [5] EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. Substance Infocard [online]. Phenolphthalein. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.000.914>.
- [6] WOYAND, H.-B., Hg., 2017. PYTHON. [Place of publication not identified]: CARL HANSER Verlag GMBH &. ISBN 978-3-446-45198-8.
- [7] BURGER, W. und M.J. BURGE, Hg., 2006. Digitale Bildverarbeitung. Eine Einführung mit Java und ImageJ. 2., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. X.media.press. ISBN 978-3-540-30940-6.

Autor

Allgemeine Daten

Name: Braun Christine

Studium

Seit März 2017: Bachelorstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg
 Februar 2019 – Dezember 2019: Auslandsjahr, Universidad Nacional de Santiago del Estero
 Februar 2021: Ende des Bachelorstudiums

Berufserfahrung

Seit August 2018: Studentische Hilfskraft im Bereich Geotechnik
 August 2019 – Dezember 2019: Bauleitung Firma Ingecon, Argentinien
 Seit Januar 2020: Studentische Hilfskraft im Bereich Baustoffkunde
 Seit Januar 2020: Studentische Hilfskraft im Bereich Ingenieurgeologie und Bodenmechanik

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt im Bereich der Baustoffkunde und dem digitalen Bauen der OTH Regensburg. Betreuer der Arbeit ist Prof. Dipl.-Ing. Thiel Charlotte und Zweitprüfer ist Prof. Dr.-Ing. Euringer Thomas.

Die Arbeit wurde mit dem 2. Preis ausgezeichnet.

OPTIMIERUNG DER BAUBARKEIT BEI DER LEICHTBETON-EXTRUSION

Master's Thesis

Max Dik

Die additive Baufertigung ist ein innovatives Bauverfahren und die letzte erforderliche Schnittstelle zwischen der 3D-Modellierung eines Bauwerks, Building-Information-Modeling und Fertigung in der Digitalisierung des Bauwesens. Bei der Extrusion mit zementbasierten Materialien wird die Fähigkeit des Materials zur Aufnahme der Lasten, die infolge des sukzessiven Schichtens entstehen, durch den Strukturaufbau des Frischbetons ermöglicht. Der Strukturaufbau wird maßgeblich durch die interpartikulären Wechselwirkungen und die Hydratationsprodukte beeinflusst. Zur Reduzierung der Lasten und Verbesserungen der bauphysikalischen Eigenschaften im Vergleich zum Normalbeton wird eine Leichtbetonrezeptur untersucht. Die Leichtbetonrezeptur wird so optimiert, dass die Kontrolle und Steuerung des Strukturaufbaus auf makroskopischer Ebene durch einfache Modifizierung einer Rezeptur möglich sind. Durch die erfolgte Optimierung kann eine zügige und unterbrechungsfreie additive Baufertigung stattfinden.

Keywords: additive Baufertigung, Baubarkeit, Extrusion, 3D-Drucken, Leichtbetonextrusion

Motivation, Problemstellung und Zielsetzung

Die meisten 3D-Drucker, welche ablegend eine Geometrie erzeugen, arbeiten mit Materialien, die kurzzeitig aufgeschmolzen werden und unmittelbar nach Verlassen der Düse ihre Ursprungsfestigkeit wieder annehmen. Im Vergleich dazu ist die Extrusion mit Frischbeton wesentlich komplizierter, da das Ansteifverhalten von einer Vielzahl an Faktoren abhängig ist. Daher müssen die Ansteifungs- und Erstarrungsparameter der Frischbetone möglichst genau und einfach bestimmt werden können.

Um den zuvor genannten Herausforderungen entgegenzuwirken, werden die Parameter in der Stoffraumrechnung einer Leichtbetonrezeptur untersucht, die ein druckbares Material unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen an die Baubarkeit ermöglichen. Unter Baubarkeit versteht man in diesem Zusammenhang die Fähigkeit eines Materials, die Lasten aus nachfolgenden Schichten während der Extrusion formstabil abzutragen [5, S. 313]. Die einflussnehmenden Parameter des Strukturaufbaus eines Frischbetons müssen anhand der Ausgangsstoffe charakterisiert werden und möglichst steuerbar sein.

Paradoxon in der additiven Baufertigung

In den meisten Projekten, die sich mit der Extrusion von Beton oder Mörtel beschäftigen, werden meist konventionelle Betonpumpen zur Verarbeitung des Materials verwendet. Hierbei wird schematisch nach Abbildung 1, links verfahren: Die Ausgangsstoffe werden mit Hilfe eines stationären Mixers und Förderers vermischt und zur Düse transportiert. In diesem Fall muss der Frischbeton eine fließfähige Eigenschaft zur Sicherstellung eines förderfähigen Materials aufweisen und zusätzlich eine ausreichend hohe Grünstandfestigkeit nach Verlassen der Düse ermöglichen. Diese beiden Materialanforderungen stellen einen Widerspruch in sich dar.

Daher wird in einem aktuellen Forschungsvorhaben [9] der Technischen Universität München ein Mischsystem entwickelt, mit dessen Hilfe das düssenahe Mischen, wie schematisch in Abbildung 1, rechts dargestellt, ermöglicht wird. Dadurch entfallen die langen Transportwege des Frischbetons. Die wesentlichen Vorteile sind zum einen verarbeitbare Frischbetone mit einer steifen Konsistenz zur Einhaltung der erforderlichen Form und Materialien mit einem hohen Strukturaufbau zur Sicherstellung eines zügigen Baufortschritts und Aufnahme der Lasten, die aus dem sukzessiven Schichten entstehen. Nach diesen Kriterien wurde die Masterarbeit in Bezug auf eine Materialoptimierung ausgearbeitet, um erste Erkenntnisse zu solchen materialverarbeitenden und -transportierenden Systems zu erhalten.

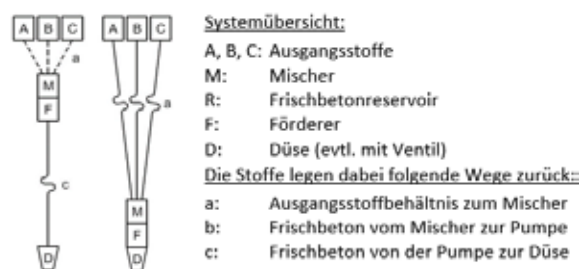


Abb. 1: Varianten des materialverarbeitenden und -transportierenden Systems, in Anlehnung an [2, S. 43]

Materialien und Versuchsmethodik

Die Frischbetonuntersuchungen werden mit Materialien durchgeführt, die in der Basismischung von Matthäus et al. [5] vorhanden sind. Die Ausgangsstoffe der Basismischung setzen sich aus einem Spezialzement LC3D [4], Silikastaub, expandiertem Blähglas, Fließmittel, Luftporenstabilisierer, Thixotropiermittel und Wasser zusammen. Die Bestandteile einer Mischung, die den Strukturaufbau beeinflussen, werden getrennt voneinander untersucht, um einen gemessenen Effekt einem bestimmten Ausgangsstoff zuordnen zu können.

Die Untersuchungen der einflussnehmenden Parameter auf den Strukturaufbau beziehen sich auf eine Abstufung des Silikastaubs, Veränderung des w/b-Werts, Variation des Anteils an Fließmittel und Austausch des bisher verwendeten Spezialzements LC3D durch den Portlandzement CEM I 52,5 R.

Die Materialien werden durch Modifizierung der Stoffraumrechnung und mit Hilfe eines Rotationsrheometers untersucht. Das Ziel der Untersuchung ist, die zeitlich zunehmende Fließgrenze in der frühen Phase in einem Zeitintervall von 15 Minuten zu erfassen und dadurch den Strukturaufbau einer modifizierten Rezeptur zu charakterisieren.

Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse zur Erlangung einer optimierten Baubarkeit werden nachfolgend dargestellt. Insbesondere die Abstufung des Silikastaubs zeigt eine wirkungsvolle Verbesserung des Strukturaufbaus und wird exemplarisch näher erläutert.

In Tabelle 1 sind die Modifikationen des Bindemittels aufgeführt. Diese beziehen sich auf eine Variation des Anteils an Silikastaub mit 10 M.-% (S10), 20 M.-% (S20) und 30 M.-% (S30) des Bindervolumens.

Tabelle 1: Materialbezeichnung und Variation des Silikastaubs in Masseprozent (M.-%) des Bindervolumens

Materialbezeichnung	Spezialzement LC3D	Silikastaub
S10	90 M.-%	10 M.-%
S20	80 M.-%	20 M.-%
S30	70 M.-%	30 M.-%

Die Darstellung der Ergebnisse in Abbildung 2 erfolgt mit Hilfe der Modellfunktion nach Roussel [7] und wird durch eine abschnittsweise definierte Funktion erweitert. Die Modellfunktion gibt an, wie der Strukturaufbau (die Entwicklung der Fließgrenze) mit der Zeit zunimmt, zum einen der erhöhte Strukturaufbau bis fünf Minuten und der abgeschwächte Strukturaufbau nach fünf Minuten. Auf der Abszisse in Abbildung 2 ist die Zeit in Sekunden aufgetragen und auf der Ordinate die erforderliche Schubspannung zum Strukturbruch eines Materials. Mit Hilfe dieser Daten können die Materialien gegenübergestellt und eine mögliche Optimierung kenntlich gemacht werden.

Die Messergebnisse der Materialien zeigen, dass der frühe Strukturaufbau wirkungsvoll mit dem Anteil des Silikastaubs beeinflusst werden kann. Insbesondere zu vermerken ist, dass die Veränderung der Aufbaurrate A_{thix} [Pa/s], welches die Steigung der Modellfunktion darstellt, nahezu linear mit dem Anteil des Silikastaubs korreliert. Dadurch können Frischbetonrezepturen erstellt

werden, die eine Vorhersage des Strukturaufbauverhaltens und einen wirtschaftlichen sowie ökologischen Einsatz des Bindemittels ermöglichen.

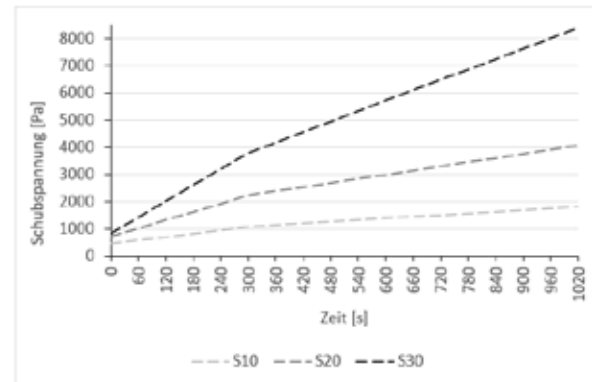


Abb. 2: Entwicklung der Fließgrenze als Funktion der Zeit

Parallel zu den rheologischen Untersuchungen wurden auch die Temperaturen aufgezeichnet. Die erste Temperatur wurde zum Zeitpunkt $t_1 = 2:30 - 3:00$ (Temp. 1 MW) und die zweite Temperatur zum Zeitpunkt $t_2 = 14:00 - 14:30$ (Temp. 2 MW) nach Ende des Mischvorgangs gemessen. Durch Zugabe von puzzolanischen Zusatzstoffen wird im Allgemeinen die Temperatur gesenkt [8]. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt.

Interessant ist, dass mit dem Material S10 eine Abkühlung von $\Delta t = -0,3$ °C gemessen werden konnte, wohingegen das Material S20 ein Δt von $+0,3$ °C und das Material S30 ein Δt von $+0,6$ °C aufweist. Dies ist ein Indiz auf eine Steigerung der exothermen Reaktion in der frühen Phase des Frischbetons durch Austausch eines Teils des Zements durch Silikastaub in der Stoffraumrechnung. Die Ergebnisse aus den Temperaturmessungen und rheologischen Untersuchungen deuten auf eine frühzeitige Entwicklung von Hydratationswärme. Dieser Effekt ist möglicherweise durch die puzzolanische Reaktion aus dem Ca(OH)_2 des Zements und Wasser mit dem reaktiven SiO_2 des Silikastaubs zu C-S-H-Brückenbildungen zwischen den Partikeln zu erklären, die für das Ansteifen der Materialien verantwortlich sind. Die

hohlraumfüllende Wirkung des Silikastaubs reduziert die Partikelabstände und beschleunigt zusätzlich die Brückenbildung der Calciumsilikathydrate.

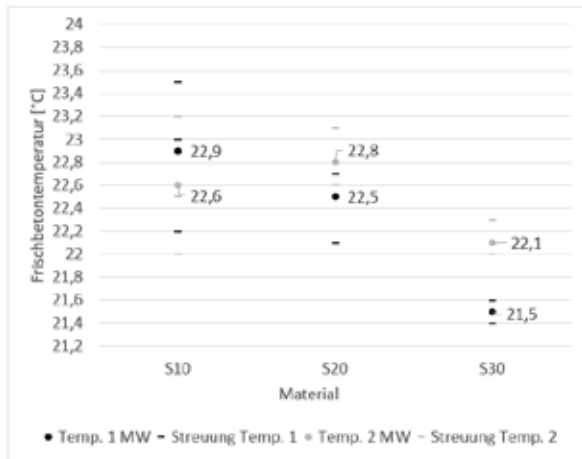


Abb. 3: Temperaturentwicklung

Fallbeispiel

Die Ergebnisse der Masterarbeit bieten eine Grundlage zur Entwicklung einer Rezeptur, um die Anforderungen an die Baubarkeit zu erfüllen. Um die Notwendigkeit der vorgenommenen Optimierung darzustellen und die Bedeutung für die Praxis kenntlich zu machen, werden nachfolgend die Erkenntnisse an einem Fallbeispiel angewendet. Hierbei soll die verbleibende Schalung mit Hilfe der additiven Baufertigung errichtet und die tragenden Elemente nach konventioneller Bauweise mit Bewehrung und Ortbetoneergänzung fertiggestellt werden. Für das Beispiel wird ein Grundriss eines Einfamilienhauses nach Abbildung 4 verwendet.

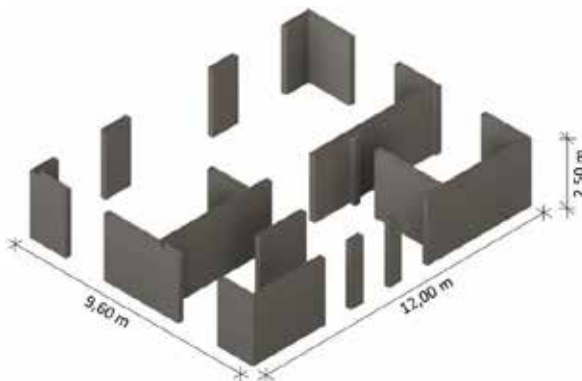


Abb. 4: Visualisierung der gedruckten Schalung eines Geschosses (Grundriss entnommen aus [3])

Zur Bestimmung der Druckparameter wird eine Schichtbreite $b = 30 \text{ mm}$, Schichthöhe $h_0 = 20 \text{ mm}$ und Anzahl der Schichten für ein Geschoss $n = 125$ festgelegt. Die Achsmaßlänge einer Schicht beträgt $85,11 \text{ m/Schicht}$.

Durch Umformung der Rechenmodelle aus der Literatur [6, 7] und die Verwendung der Messergebnisse aus den rheologischen Untersuchungen kann die vertikale Baurate (Baugeschwindigkeit in einer definierten Zeit) in graphischer Form nach Abbildung 5 dargestellt werden. Auf der Abszisse ist die kritische Höhe aufgetragen. Die kritische Höhe gibt an, ab welcher Höhe mit einem Versagen der ersten Schicht durch Überschreitung der Fließgrenze, infolge des sukzessiven Schichtens, zu rechnen ist. Dieser Wert hängt von der vertikalen Baurate ab, die auf der Ordinate aufgetragen ist. Hierbei ist festzustellen, dass bis zu einer bestimmten vertikalen Baurate mit keinem Versagen der ersten Schicht zu rechnen ist. Dieser Wert wird mit \dot{H}_T angegeben.

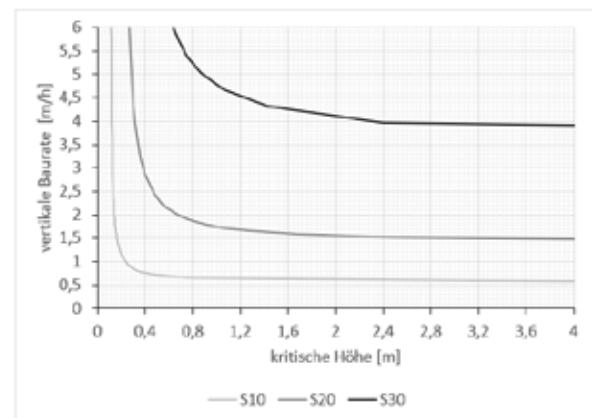


Abb. 5: Vertikale Baurate als Funktion der kritischen Höhe

Mit \dot{H}_T kann die erforderliche Zeit für eine zu druckende Schicht t_{Schicht} , die erforderliche Druckkopfgeschwindigkeit $v_{\text{Druckkopf}}$ und die Gesamtdauer des Druckprozesses für ein Geschoss t_{Geschoss} ermittelt werden. Diese werden zusammengefasst in Tabelle 1 für die vorgestellten Material-Variationen angegeben.

Material	\dot{H}_r [m/h]	t_{Schicht} [s/Schicht]	$v_{\text{Druckkopf}}$ [m/s]	t_{Geschoss} [h]
S10	0,576	125	0,68	4,34
S20	1,440	50	1,70	1,74
S30	3,600	20	4,26	0,70

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse in Bezug auf die Baubarkeit (Baurate)

Anhand der Ergebnisse aus Tabelle 1 kann durch Vergleich der erforderlichen Druckzeit eines Geschosses die Optimierung und Verbesserung der Materialien verdeutlicht werden. Sollte die technische Umsetzung einer Druckkopfgeschwindigkeit von 4,26 m/s möglich sein, so ist eine Druckzeit von lediglich 42 Minuten für ein Geschoss erforderlich. In der Literatur [1] wurde eine maximale Druckkopfgeschwindigkeit von 0,5 m/s angegeben.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z. & Dirrenberger J. (2018): 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. Paris: Elsevier Ltd.. Cement and Concrete Research 112 S. 37 – 49
- [2] Henke K. (2016): Additive Baufertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton. Dissertation an der Fakultät für Bau Geo Umwelt, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.
- [3] Kern Haus (o. J.): Beispielgrundriss. <https://www.kern-haus.de/haeuser/familienhaeuser/luce/> (Abruf vom 09.12.2020)
- [4] HeidelbergCement AG (o. J.): Hybrider Baustoff LC3D. <https://blog.heidelbergcement.com/de/das-beste-draus-gemacht-hybride-baustoffe> (Abruf vom 09.12.2020)
- [5] Matthäus C., Back D., Weger D., Kränkel T., Scheiydt J. & Gehlen C. (2020): Effect of Cement Type and Limestone Powder Content on Extrudability of Lightweight Concrete. Cham: Springer. Proceedings of HiPerMat 2020, 5th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials
- [6] Perrot A., Rangedard D. & Pierre A. (2016): Structural build-up for cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Cedex: Springerlink.com. Materials and Structures 49 S. 1213 – 1220
- [7] Roussel N. (2006): A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. Paris: Elsevier Ltd.. Cement and Concrete Research 36 S. 1797 – 1806
- [8] Röser F. (2018): Über die Reaktivität von Betonzusatzstoffen - Ein versuchsbasiertes Hydratationsmodell. Dissertation vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Technische Universität Darmstadt.
- [9] Technische Universität Braunschweig (o. J.): Forschungsvorhaben: TRR 277 – Additive Manufacturing in Construction (AMC). <http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/index.php/307/articles/1687.html> (Abruf vom 09.12.2020)

Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass die Materialien nicht die Limitierungen der additiven Baufertigung darstellen. So konnte die Baubarkeit durch eine Anpassung der Stoffraumrechnung zielführend beeinflusst werden. Die Ergebnisse der Masterarbeit ermöglichen eine Vorhersage des Strukturaufbauverhaltens auf makroskopischer Ebene durch Modifikation des Masseverhältnisses zwischen Silikastaub und Zement. Dadurch lassen sich Bauwerke in der additiven Bauweise ohne Unterbrechungen errichten, indem der bereits abgelegte Frischbetonstrang die auftretenden Lasten aufnehmen kann.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Geisenhanslüke C. (2008): Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen. Dissertation vom Fachbereich Bauingenieurwesen, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, am Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens, Universität Kassel.
2. Henke K. (2016): Additive Baufertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton. Dissertation an der Fakultät für Bau Geo Umwelt, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.
3. Lowke D. (2013): Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone. Optimierung auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, Technische Universität München.
4. Matthäus C., Back D., Weger D., Kränkel T., Scheydt J. & Gehlen C. (2020): Effect of Cement Type and Limestone Powder Content on Extrudability of Lightweight Concrete. Cham: Springer. Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication
5. Matthäus C., Weger D., Kränkel T. & Gehlen C. (2020): Effect of Thixotropy Enhancing Agents on Extrudability of Lightweight Concrete. München: Technische Universität München
6. Perrot A., Rängeard D. & Pierre A. (2016): Structural build-up for cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Cedex: Springerlink.com. Materials and Structures 49, S. 1213 – 1220
7. Roussel N. & Cussigh F. (2008): Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy. Paris: Elsevier Ltd.. Cement and Concrete Research 38 S. 624 – 632
8. Roussel N., Overlez G., Garrault S. & Brumaud C. (2012): The origins of thixotropy of fresh cement pastes. Paris: Elsevier Ltd.. Cement and Concrete Research 42 S. 148 – 157
9. Roussel N. (2018): Rheological requirements for printable concretes. Paris: Elsevier Ltd.. Cement and Concrete Research 112, S. 76-85

Autor, Coautoren

Max Dik

2018 – 2021 Masterstudiengang Bauingenieurwesen an der Technischen Universität München
 2017 – 2021 Werkstudent bei Blankenhagen und Cohrs Ingenieure
 2014 – 2018 Bachelorstudiengang Bauingenieurwesen an der Fachhochschule Erfurt
 2012 – 2014 Fachhochschulreife an der Berufsoberschule Bad Tölz
 2009 – 2012 Ausbildung zum Schreiner bei hartmann[am]werk (früher Möbel Line) in Holzkirchen

Betreuer

Die Arbeit wurde am Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen der Technischen Universität München unter Betreuung von Carla Matthäus, M. Sc. angefertigt.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

BIM-INTEGRATION VON ZERTIFIZIERUNGSKRITERIEN FÜR NACHHALTIGE GEBÄUDE IN DEN FRÜHEN ENTWURFS-PHASEN

Masterarbeit

Lena Drewes

Zertifizierungssysteme, wie das der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), stellen eine gemeinsame und ganzheitliche Basis für das dar, was in einem Gebäudekontext als nachhaltig gilt. Sie geben Planern und Ingenieuren ein konkretes Set an Maßnahmen an die Hand, mit denen sie ein Gebäude optimieren und ökologisch, sozial und ökonomisch nachhaltiger gestalten können. Daher ist es notwendig, den konventionellen Entwurfsprozess neu zu konfigurieren, um Nachhaltigkeitsaspekte bereits zu Beginn des Planungsprozesses als Entwurfsanforderung einzubeziehen. Building Information Modeling (BIM) ist ein Lösungsansatz, um einen solchen Prozess zu unterstützen. Deshalb wurde in dieser Arbeit anhand von Attributmatrizen, die detaillierte Modellinformationsanforderungen enthalten, ein BIM Modell erstellt, in dem unterschiedliche Nachhaltigkeitskriterien des DGNBs umgesetzt und mittels einer Modellprüfsoftware validiert werden konnten. Basierend auf diesem Ansatz, wurde ein Nachhaltigkeitsoptimierungstool entwickelt, das einen iterativen Optimierungsprozess durch einfache und unmittelbare Ergebnisse ermöglicht. Die Implementierung von zwei repräsentativen Beispielkriterien zeigte, dass bei qualitativen Kriterien die räumlichen Beziehungen im Modell ausschlaggebend sind, während bei den quantitativen Kriterien, die im Modell hinterlegten, spezifischen material- und objektbezogenen Informationen im Fokus stehen. Diese Arbeit liefert ein Tool, das als Grundlage für die Umsetzung von DGNB Kriterien zur nachhaltigen Optimierung von Gebäude verwendet werden kann.

Keywords: Nachhaltiges Bauen, Frühe Entwurfsphasen, Digitalisierung, Building Information Modeling (BIM), DGNB Nachhaltigkeitskriterien, Attributmatrizen, Optimierungstool

Forschungsmotivation

Die Baubranche produziert derzeit fast 40 % der globalen CO₂-Emissionen, verbraucht etwa 30 % der weltweiten Ressourcen, einschließlich 12 %

des globalen Wasserverbrauchs, und produziert 40 % des weltweiten Abfallaufkommens [1]. Es ist daher unbestreitbar, dass der konventionelle Gebäudeplanungs- und Bauprozess umgestaltet werden muss, um Nachhaltigkeitsaspekte von

Anfang an als Designanforderung zu berücksichtigen. In den frühen Entwurfsphasen ist die Beeinflussbarkeit des Designs hoch und die Kosten und der Aufwand für Designänderungen sind noch gering (Abb. 1).

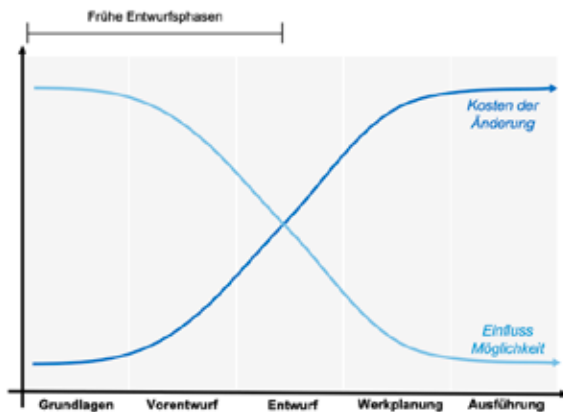


Abb. 1: Einfluss und Kosten von Entwurfsänderungen nach Planungsphase [2]

Durch den Fokus auf die frühen Entwurfsphasen kann ein unzusammenhängender und reaktionärer Planungsprozess durch einen integrierten und kollaborativen Ansatz ersetzt werden. Genau dieser integrierte Planungsprozess ist ein entscheidendes Merkmal des nachhaltigen Bauens, und Building Information Modeling (BIM) ist dafür ausgelegt, einen solchen Prozess zu unterstützen [3].

In den letzten Jahren hat sich BIM als eine der effektivsten organisatorischen und technologischen Weiterentwicklungen in der Baubranche gezeigt. Dennoch findet es erst langsam Eingang in die Praxis, da es anfänglich einen planerischen Mehraufwand bedeutet, der u.a. durch Schulung der Anwender entsteht. BIM kann in drei Hauptdimensionen unterteilt werden: eine digitale Repräsentation eines geplanten oder realisierten Bauwerks, ein Prozess des Informationsaustauschs und ein System des Managements und der Zusammenarbeit, durch das die Qualität und Effizienz eines Bauwerks gesteigert werden kann [4].

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Tool zur Nachhaltigkeitsoptimierung in den frühen Entwurfsphasen zu entwickeln, das Nachhaltigkeit konkret umsetzbar und für den Planer greifbar macht. Hierzu wird ein BIM-Modell verwendet, das konsistente und aktuelle, modellbasierte Nachhaltigkeitsinformationen enthält.

Analytische Untersuchung

In dieser Arbeit wird das Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit verwendet, das nicht nur die Umweltaspekte einbezieht, sondern auch die ökonomischen und sozialen Aspekte gleichermaßen bewertet. Als Grundlage für die Konkretisierung der Nachhaltigkeit innerhalb dieser Arbeit wurde daher das Zertifizierungssystem der DGNB herangezogen. Es ist das erste System der 2. Generation und basiert auf der Idee, dass ein nachhaltiges Gebäude Folgendes gewährleisten sollte:

- **Umweltschutz**, indem Ressourcen (Materialien, Energie, Wasser) in allen Lebenszyklusphasen eines Gebäudes eingespart werden
- **Wirtschaftlichkeit**, indem das Investitionsrisiko so gering wie möglich gehalten wird und langfristig Kosten gespart werden
- **Nutzerbezogenheit**, indem Gesundheit, Wohlbefinden und Nutzerkomfort im Vordergrund stehen und hochwertige, flexible Innen- und Außenräume für langfristige Nutzung geschaffen werden
- **Erfüllung lokaler Bedürfnisse**, indem das Gebäude Klima und Kultur berücksichtigt und die Werte der Gesellschaft widerspiegelt [5]

Um auf Basis der DGNB Kriterien ein Nachhaltigkeitsoptimierungstool für die frühe Entwurfsphase zu erstellen, musste zunächst ermittelt werden, welche Kriterien in den frühen Entwurfsphasen anwendbar sind und welche von der Integration in einen digitalen modellbasierten Workflow profitieren würden.

Analyse der frühen Entwurfsphasen

Die Berücksichtigung von Nachhaltigkeit in den frühen Entwurfsphasen birgt das größte Potenzial für Innovationen, während gleichzeitig nachhaltiges Denken grundlegend in den Entwurfsprozess integriert wird. Die Analyse der Gesamtkriterien sowie der einzelnen Indikatoren erfolgte in Excel, wo jeder Indikator entweder der Planungs-, Design-, Bau- oder Facility Management Phase, mit Erläuterung/Begründung, zugeordnet wurde. Die Analyse ergab, dass 81 %, also 30 der 37 DGNB Kriterien, in den frühen Entwurfsphasen schon mitberücksichtigt werden müssen.

Modellbasierte Workflow-Analyse

Im Anschluss an die Analyse der frühen Entwurfsphasen wurden alle DGNB-Kriterien daraufhin untersucht, ob sie sich mit einem semantischen BIM-Modell darstellen und überprüfen lassen. Ziel der Analyse war es zu bestimmen, ob durch eine Modell-Integration ein Mehrwert erzielt werden kann. Die Analyse in Excel, in der der Output jedes Kriteriums in Bezug auf einen möglichen Mehrwert dokumentiert wurde, ergab, dass von den 28 Kriterien (insgesamt 76 %), die von einer Integration in einen digitalen Workflow profitieren würden, ca. 11 % ein Facility-Management-Modell erfordern und weitere 11 % auf Daten basieren, die typischerweise in einem geografischen Informationssystemmodell (GIS) enthalten sind. Weitere 22 % der anwendbaren Kriterien würden das Modell als Grundlage für Simulationen nutzen.

Insgesamt 17 Kriterien, d. h. 46 % der gesamten 37 Kriterien, müssen in den frühen Phasen berücksichtigt werden und würden von einer Integration in ein digitales Modell profitieren. Von diesen anwendbaren Kriterien wurden 29 % als qualitativ eingeordnet, abhängig von subjektiv definierten Parametern, und 71 % waren quantitativ und konnten durch objektive, vordefinierte Parameter dargestellt werden. Es wurde jeweils ein repräsentatives Beispielkriterium ausgewählt: SOC 1.7 Sicherheit, um qualitative Kriterien zu repräsentieren, und TEC1.5 Reinigungsfreundlichkeit des Baukörpers für die quantitativen Kriterien.

Praktische Umsetzung

Es war notwendig, einen Integrationsansatz zu schaffen, der sowohl mit quantitativen als auch mit qualitativen Kriterien umgehen konnte. Dies erforderte eine standardisierte Informationsstruktur, mit der sowohl vordefiniert wie auch subjektiv festgelegte Informationen organisiert werden konnten, ein Building Information Model, in das die relevanten Informationen dann integriert werden konnten, und schließlich eine Verifikations- und Optimierungssoftware, um die erfolgreiche Integration zu validieren und Optimierungsfeedback zu geben (Abb. 2).

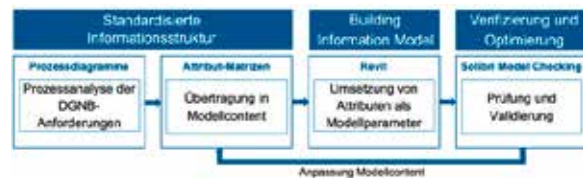


Abb. 2: Methodik für praktische Umsetzung [6]

Standardisierte Informationsstruktur

Für die beiden repräsentativen Kriterien wurde auf der Basis von Prozessdiagrammen (Abb. 3) eine ausführliche Attributmatrix entwickelt.

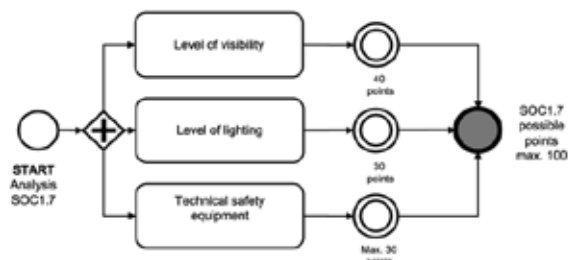


Abb. 3: Prozessdiagramm für SOC1.7, Safety and Security'

Die in Excel angelegten Attributmatrizen enthielten unter anderem die folgenden Informationen: Art der Dokumentation, logische Prüffrage, Parametertyp (IFC oder benutzerdefiniert), Modellobjekttyp (Tür, Fenster, Wand, Raum, etc.), Attributname, Datentyp, Einheiten, und Standardwert (von der DGNB vorgegeben oder subjektiv vom Designer definiert).

Ein Verständnis des BIM-Modells war für die korrekte Definition der Parameter innerhalb der Attributmatrizen essenziell. Das Modell war auch notwendig, um zu bestimmen, welche Attribute automatisch Teil der IFC-Datenstruktur waren und welche als benutzerdefinierte Parameter hinzugefügt werden mussten.

Building Information Model

Mit Revit wurde ein Building Information Model erstellt, in das die in den Attributmatrizen festgelegten Parameter integriert werden konnten. Bei dem Modell handelte es sich um ein Bürogebäude mit Büro- und Besprechungsräumen, Toiletten, Küchen und Lagerräumen sowie einer offenen Bürofläche und einem Empfangsbereich auf ca. 870 m² (Abb. 4).



Abb. 4: Ansicht der Ostseite des Revit-Modells

Das BIM-Modell dient als "Single Source of Truth" für die Speicherung und den Zugriff auf alle nachhaltigkeitsrelevanten Informationen.

Verifizierung und Optimierung

Nach der Erstellung des Modells wurde die Modellprüfsoftware Solibri eingesetzt, um die Attributintegration zu validieren und Feedback darüber zu geben, wo und wie der Entwurf anhand der DGNB-Anforderungen optimiert werden könnte. Dazu wurden die logischen Prüffragen aus den Prozessdiagrammen und Attributmatrizen in Rulesets umgewandelt. Diese prüften verschiedene Aspekte des Modells, wie z. B. Abstände zwischen Objekten (Abb. 5), Definitionen und Bezeichnungen von Räumen, Materialeigenschaften und boolesche (wahr/falsch) Parameter.

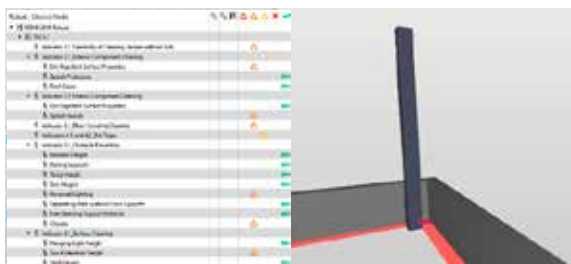


Abb. 5: Solibri-Ergebnisse für die Modelloptimierung

Ergebnisse der Arbeit

Mit dem entwickelten Optimierungstool war es möglich, den Entwurf innerhalb weniger Minuten, nachhaltiger zu gestalten. Für beide Kriterien ließen sich wesentliche Optimierungsvorschläge in unter 30 Minuten umsetzen. Das klar strukturierte Feedback des Optimierungstools ermöglichte diese schnelle Anpassung und verringerte die Zeit erheblich, die normalerweise für Modelländerungen nach einem traditionellen Planungsprozess benötigt wird.

Quantitative Kriterien

Für das repräsentative quantitative Kriterium konnten 84 % der erforderlichen DGNB-Informationen in das Modell eingefügt werden. Von den anwendbaren Modellinhalten konnten 100 % mit Hilfe der Optimierungs-Rulesets überprüft werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit deuten darauf hin, dass quantitative Kriterien in der Regel über Bauteilattribute, die den Modellobjekten als Parameter zugewiesen werden, in das Building Information Model eingefügt werden können. Deshalb ist der Schritt der **Modellattributierung** für quantitative Kriterien besonders wichtig.

Qualitative Kriterien

Fast 95 % der geforderten DGNB-Informationen konnten für das repräsentative qualitative Kriterium im Modell hinterlegt werden. Von diesen Informationen konnten 73 % mit Hilfe der Optimierungs-Rulesets überprüft werden. Diese Arbeit zeigte, dass qualitative Kriterien weitgehend vom Layout, den Räumen und deren Beziehungen abhängen. Sie erfordern daher einen besonderen Fokus auf die **Rulesets zur Modellprüfung**, da die subjektiven Aspekte der qualitativen Kriterien damit definiert und bewertet werden können.

Fazit

Die ganzheitliche Analyse aller DGNB-Kriterien ergab, dass über 80 % der Kriterien in den frühen Phasen berücksichtigt werden müssen und dass mehr als 75 % der Kriterien von einer Integration in ein digitales Modell profitieren würden. Dies bestätigt die Wichtigkeit der Einbeziehung von Nachhaltigkeitsaspekten als integralen Bestandteil der BIM-Methodik. Insgesamt können die Ergebnisse, die auf Basis der gewählten Beispiele für qualitative und quantitative Kriterien gewonnen wurden, auf alle anderen DGNB Kriterien übertragen werden, solange diese in den frühen Phasen berücksichtigt werden müssen und sie von einer Integration in ein digitales Modell profitieren würden. Diese Arbeit bietet eine solide Grundlage für die zukünftige Entwicklung der regelbasierten Nachhaltigkeitsoptimierung auf der Basis des DGNB Gebäudezertifizierungssystems.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: UNEP-SBCI. (2012). Building Design and Construction: Forging Resource Efficiency and Sustainable Development.
- [2]: WBDG. (2020). Architectural Programming | WBDG - Whole Building Design Guide. <https://www.wbdg.org/design-disciplines/architectural-programming>
- [3]: Ebert, T., Eßig, N., & Hauser, G. (2011). Green building certification systems: Assessing sustainability; international system comparison; economic impact of certifications. Institut für Internationale Architektur Dokumentation.
- [4]: Foliente, G., Luetzkendorf, T., Newton, P., & Paevere, P. (Eds.). (2008). SB08 book of abstracts: Connected viable liveable. ASN Events.
- [5]: DGNB. (2018). DGNB System Criteria Set New Construction Building Version 2018. DGNB System.
- [6]: ONIB. (2019). Optimierung der Nachhaltigkeit von Bauwerken durch die Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen in die digitale Methode Building Information Modeling (ONIB) (End Report SWD-10.08.18.7-17.29; p. 84). Leibniz Universität Hannover.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. ONIB. (2019). Optimierung der Nachhaltigkeit von Bauwerken durch die Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen in die digitale Methode Building Information Modeling (ONIB) (End Report SWD-10.08.18.7-17.29; p. 84). Leibniz Universität Hannover.
2. Ebert, T., Eßig, N., & Hauser, G. (2011). Green building certification systems: Assessing sustainability; international system comparison; economic impact of certifications. Institut für Internationale Architektur-Dokumentation.
3. Eastman, C. M., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (Eds.). (2008). BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. Wiley.

Autor

Lena Lisbeth Johanna Drewes wurde 1994 in Berlin geboren. Sie zog mit drei Jahren in die USA und lebte dort bis zu ihrem Bachelorabschluss in Bauingenieurwesen an der Colorado School of Mines in 2018. Danach kam sie zurück nach Deutschland, um an der Technischen Universität München ihren Master in ressourceneffizientem und nachhaltigem Bauen zu machen, den sie im Dezember 2020 erfolgreich abschloss.

Betreuer

Die Masterarbeit wurde am Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation an der Technischen Universität München bei Prof. Dr.-Ing. André Borrmann angefertigt. Die Betreuung erfolgte durch M.Sc. Kasimir Forth.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

EINFLUSS DER VORSÄTTIGUNG VON LEICHTZUSCHLÄGEN AUF DIE ROHDICHTEVERÄNDERUNG IM PUMPPROZESS

Bachelorarbeit

Lisa Forstmaier

Die Nutzung additiver anstelle von konventionellen Fertigungsverfahren kann im Betonbau - insbesondere in Bezug auf Produktivität - den zukünftigen Bauprozess optimieren. Das Material wird durch den sogenannten 3D-Druck zielorientiert und automatisiert eingesetzt. Bei der gleichzeitigen Verwendung von Leichtbeton ergeben sich zusätzliche Vorteile wie die mögliche Einsparung von Dämmstoffen. In der Praxis können Bauunternehmen auf lange Sicht Kosten einsparen sowie die Baugeschwindigkeit erhöhen. Voraussetzung dafür ist eine stabile Rezeptur über den Verarbeitungsprozess hinweg. In dieser Bachelorarbeit wurden Untersuchungen mit gefügedichtem Leichtbeton auf Grundlage der additiven Verfahrenstechnik Extrusion durchgeführt, mit primärer Betrachtung des Pumpprozesses. Durch verschiedene Vorgänge während der Fertigung erhöht sich die Rohdichte des Betons nach dem Pumpen gegenüber dem Ausgangsmaterial vor dem Pumpen - vor allem bedingt durch die Druckbeanspruchung während des Pumpens auf diese porenreiche Betonart. Mittels Pumpversuchen wurde hier ermittelt, dass eine verlängerte Vorsättigungszeit der leichten Gesteinskörnung (expandiertes Blähglasgranulat) über mehrere Tage die Rohdichteveränderungen deutlich abschwächen kann. Die Rohdichte wurde durch die Vorsättigung stabilisiert. Eine kurze Vorsättigung von wenigen Minuten hingegen konnte den Anstieg der Rohdichte nicht verhindern. Es wurden Vorsättigungszeiten von 4 Minuten, 2 und 7 Tagen untersucht.

Keywords: Additives Fertigungsverfahren, Extrusion, 3D-Druck mit Leichtbeton, Vorsättigung von leichter Gesteinskörnung, Pumpprozess

Thematische Einführung

Die Nutzung additiver anstelle von konventionellen Fertigungsverfahren im Betonbau kann die Produktivität des Bauprozesses optimieren. Mit der Verwendung von Leichtbeton ergibt sich zudem eine zukunftsfähige Produktionsmöglichkeit, da man

z. B. Dämmstoff einsparen kann. Somit können Kosten und Material verringert [1] und Rückbau und Recycling am Lebensende der Baukonstruktion vereinfacht werden.

Die Anfänge der additiven Fertigung mit Leichtbeton sind vielversprechend, bedingt durch die

erreichbaren Wärmeleitfähigkeiten und Baugegeschwindigkeiten. Vorteile ergeben sich weiterhin durch eine zielorientierte Materialverwendung ohne Nutzung von Schalungselementen [1]. Dadurch ergibt sich, neben der Reduzierung von Abfall, auch eine größere Freiheit im Design [1].

Eine Schwierigkeit beim 3D-Druck von Leichtbeton stellt der Pumpprozess dar. Währenddessen entsteht eine Druckbeanspruchung auf den Beton, die sich kombiniert mit dieser porenreichen Betonart ungünstig auswirken kann. Durch den Pumpendruck kann Zementleim in die Poren gedrückt werden. Die hier betrachtete poröse leichte Gesteinskörnung absorbiert Wasser und kann dem Zementleim zudem schon während des Anmischens des Betons Wasser entziehen. [2] Durch diese Vorgänge erhöht sich die Rohdichte des Betons gegenüber dem Ausgangsmaterial vor dem Pumpen.

Während der Extrusion von Leichtbeton mit kurz vorgesättigter leichter Gesteinskörnung (Vorsättigungszeit: 4 Min) wurde festgestellt, dass sich die Rohdichte durch den Pumpprozess stark erhöht [1]. Diese Erhöhung beeinflusst die Pumpbarkeit und schlussendlich die Wärmedämmwirkung sowie das Gewicht des Betons ungünstig.

Ziel dieser Arbeit war es daher, herauszufinden, ob man durch eine verlängerte Vorsättigung der leichten Gesteinskörnung die Rohdichteveränderungen minimieren kann. Es wurden Untersuchungen mit gefügedichtem Leichtbeton durchgeführt, die auf Erfahrungen und Problemstellungen aus dem Verfahren der Extrusion - eine mögliche Verfahrenstechnik der additiven Fertigung - aufbauen. Primär wurde dabei der Pumpprozess betrachtet. Als leichte Gesteinskörnung wurde expandiertes Blähglasgranulat verwendet.

Messmethoden

Grundsätzlich wurden Rezepturen untersucht, die trotz unterschiedlicher Vorsättigungszeiten auf die gleiche Konsistenz eingestellt wurden, um

eine vergleichbare Verarbeitbarkeit der Materialien sicherzustellen. Da die Wasseraufnahme zeitabhängig ist, waren dazu unterschiedliche Vorsättigungswassermengen nötig. In der Ausgangsrezeptur wurde eine für den Leichtbeton übliche Vorsättigungszeit von 4 Minuten festgelegt (*VBasis*). Diese Rezeptur wies während des Pumpprozesses die zuvor genannten Probleme auf. Um die Rohdichte des Leichtbetons trotz des Pumpprozesses konstanter zu halten, wurde leichte Gesteinskörnung mit einer verlängerten Vorsättigungszeit von 2 Tagen (*V2d*) und von 7 Tagen (*V7d*) kombiniert mit einer erhöhten Vorsättigungswassermenge untersucht und mit der *VBasis*-Rezeptur verglichen.

Die stets gleichbleibenden Bestandteile aller Rezepturen mit Ausnahme des Vorsättigungswassers waren das Blähglasgranulat mit einem Korndurchmesser zwischen 0,1 und 2 mm, Zugabewasser, Zement, Silikastaub und PCE-basiertes Fließmittel. Der w/b-Wert lag bei allen Rezepturen ohne Berücksichtigung der verschiedenen Vorsättigungswassermengen bei 0,38.

Im Rahmen von realen Pumpversuchen wurden Messungen durchgeführt, um die Eigenschaften des Frischbetons, der leichten Gesteinskörnung und des Festbetons zu analysieren. Am Frischbeton wurden Viskosität, Fließgrenze, Förderate und Rohdichte gemessen. Die leichte Gesteinskörnung wurde jeweils aus dem frischen und dem gepumpten Mörtel ausgewaschen und bildlich und statistisch ausgewertet. Zudem wurden Festbetonprismen hergestellt und nach 28 Tagen auf Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit und Rohdichte geprüft. Dabei wurde das Material vor und nach dem Pumpen sowie bei unterschiedlichen Pumpgeschwindigkeiten verglichen.

Versuchsdurchführung

Für jede Rezeptur (*VBasis*, *V2d*, *V7d*) wurde ein Pumpversuch durchgeführt. Zusätzlich wurde noch ein Pumpversuch mit erhöhter

Wassermenge, aber nur 4 Minuten Vorsättigungszeit ($2doV$) durchgeführt, um den Einfluss des rein erhöhten Wassergehalts ohne entsprechend erhöhte Vorsättigungszeit zu betrachten. Dazu wurde bei der $2doV$ -Rezeptur die Vorsättigungswassermenge verwendet, die auf die 2d-Vorsättigung abgestimmt ist, lediglich mit der Basis-Vorsättigungszeit. Durch die verkürzte Sättigungszeit wurde weniger Wasser vor dem Pumpen von der leichten Gesteinskörnung aufgenommen. Die Rezeptur hatte dadurch eine andere Konsistenz und war deutlich fließfähiger.

Wichtig war insgesamt stets der Vergleich des Materials vor dem Pumpen (v. P.) und nach dem Pumpen (n. P.), um die entstehenden Veränderungen analysieren zu können. Die verwendete Exzentrerschneckenpumpe wurde auf Stufe 1 (Frequenz von ca. 7,3 Hz) und Stufe 2 (Frequenz von ca. 15,6 Hz) betrieben.

Ergebnisse

Bei den untersuchten Leichtbetonen konnte man feststellen, dass die verlängerte Vorsättigung die Rohdichteänderungen durch den Pumpprozess deutlich abschwächen kann und die Eigenschaften konstanter gehalten werden können.

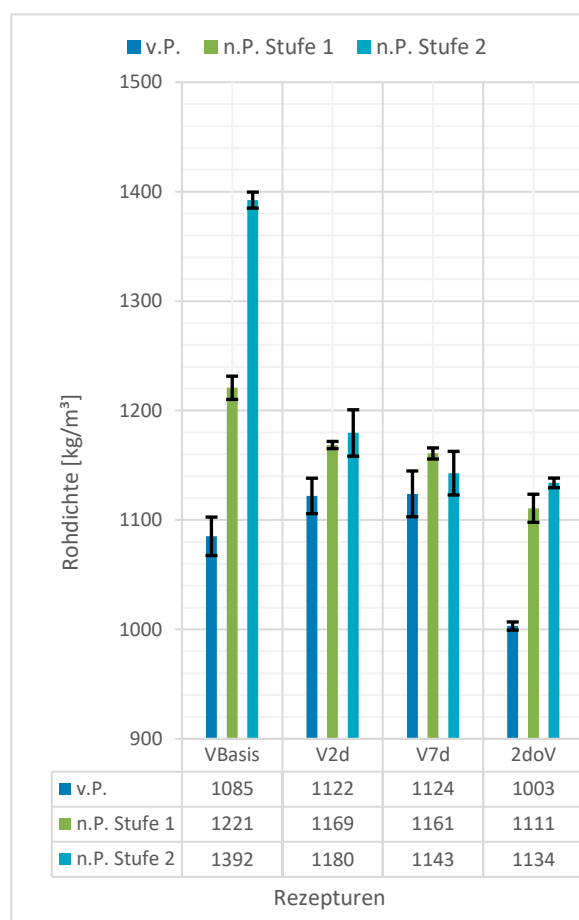
Die gemittelten Werte der Rohdichte nach 28 Tagen sind in *Abbildung 1* dargestellt. Der Beton des *VBasis*-Versuchs hatte eine höhere Rohdichte n. P. als v. P. Zudem nahm die Rohdichte mit höherer Pumpfrequenz (Stufe 2) zu. Beim Leichtbeton aus dem *V2d*- und *V7d*-Versuch konnte man sehen, dass die Rohdichte beinahe unabhängig von dem Pumpprozess (v. P./n. P.) und auch der Pumpgeschwindigkeit (n. P. St. 1/n. P. St. 2) fast konstant blieb. Dabei blieb die Rohdichte der *V7d*-Rezeptur noch geringer als die *V2d*-Rezeptur.

Damit wirkte sich die längere Vorsättigung hier insgesamt positiv aus, da die Rohdichte konstanter eingestellt werden konnte. Da die Wasseraufnahme zeitabhängig ist, sind die Unterschiede in der Rohdichte vor dem Pumpen dabei auf die

höhere anfängliche Wasseraufnahme der leichten Gesteinskörnung zurückzuführen.

Bei hohem Wassergehalt ($2doV$) war eine Veränderung der Rohdichte von vor dem Pumpen zu nach dem Pumpen festzustellen, allerdings veränderte sich diese bei Erhöhung der Pumpgeschwindigkeit auf Stufe 2 kaum. Die Unterschiede gegenüber vor dem Pumpen konnten darauf zurückgeführt werden, dass die leichte Gesteinskörnung in diesem Fall wieder weniger Wasser vor dem Pumpen aufgenommen hatte und diese unter Druck mehr Wasser aufnehmen als ohne Druck. Die weiteren Unterschiede gegenüber den anderen Rezepturen waren auch auf die höhere Fließfähigkeit dieses Materials und die damit einhergehenden geringeren Reibungseffekte während des Pumpens zurückzuführen.

Abb. 1: Rohdichte nach 28d



Generell stieg die Förderrate (*Abbildung 2*) in allen Rezepturen an, je höher die Pumpfrequenz bzw. die Stufe war.

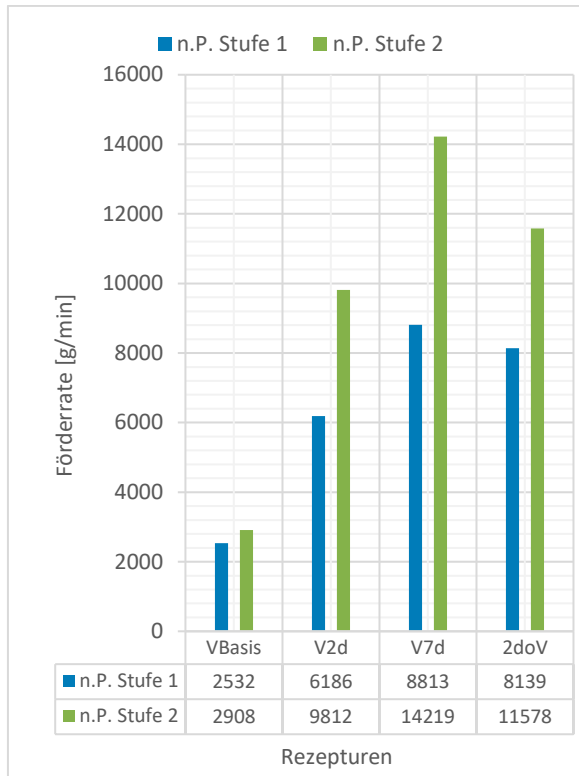


Abb. 2: Förderrate

Während die Förderrate beim *VBasis*-Versuch insgesamt eher niedrig blieb, war sie bei dem *V2d*- und *V7d*-Versuch deutlich höher. Bei gleicher Fördergeschwindigkeit wurde somit bei den länger vorgesättigten Rezepturen deutlich mehr Material gefördert als beim *VBasis*-Versuch. Beim *2doV*-Versuch fiel die Förderrate ähnlich hoch aus wie die der *V7d*-Rezeptur. Allerdings war die *2doV*-Rezeptur zu fließfähig und ist deshalb nicht für den Einsatz im 3D-Druck geeignet.

Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend konnte man feststellen, dass der hergestellte Leichtbeton mit länger vorgesättigter leichter Gesteinskörnung und damit einer höheren Wassermenge im gesamten System geringere Rohdichteveränderungen während des Pumpens aufwies.

Zu Beginn (v. P.) erhöhte sich die Rohdichte bei den länger vorgesättigten Proben (*V2d* und *V7d*) durch die erhöhte Wassermenge, jedoch ergaben sich nach dem Pumpvorgang gleichzeitig geringere Rohdichteveränderungen und somit eine

insgesamt niedrigere Rohdichte nach dem Pumpen als die der *VBasis*-Rezeptur.

Weiterhin kann man die *V7d*- der *V2d*-Rezeptur bevorzugen, da es weitere vorteilhafte Ergebnisse für den Pumpprozess und die Extrusion gab. Die leichte Gesteinskörnung nahm in 7 Tagen mehr Wasser auf als in 2 Tagen. Die Viskosität der *V7d*-Rezeptur war sehr niedrig, was günstig für die Pumpbarkeit ist. Bei der Auswertung der ausgewaschenen leichten Gesteinskörnung konnte man feststellen, dass das Blähglasgranulat der 7d-Vorsättigung durch den Zementleim im Gegensatz zur 4-minütigen Vorsättigung kaum sichtbar mechanisch angegriffen war. Insgesamt ergibt sich so eine vielversprechende Rezeptur.

Vorteile des Leichtbetons, wie das geringe Gewicht oder die Wärmedämmung, die durch die niedrige Rohdichte gegeben sind, werden bei den länger vorgesättigten Proben kaum mehr durch den Pumpprozess abgeschwächt. So kann man diese Eigenschaften wieder gezielt nutzen.

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wäre durch eine Wiederholung der Pumpversuche nachzuweisen, dies war hier zeitlich nicht möglich. Zudem sollten die Rezepturen mit verlängerter Vorsättigung in 3D-Druckversuchen auf ihre Eignung für Extrusion weiter untersucht werden.

Mit Optimierung der additiven Fertigung sollte das Ziel für die Baupraxis, neben einer Anwendung im Fertigteilwerk, ein reibungsloser Herstellungsprozess auf der Baustelle sein. Dabei scheint eine Vorsättigungszeit von 2 oder 7 Tagen zunächst lang. Das kann durch den anschließenden additiven Fertigungsprozess ausgeglichen werden, der schneller abgewickelt werden kann als eine konventionelle Betonbauteilherstellung. Die Vorsättigung muss jedoch terminlich mit in den Ablauf eingeplant werden. Bei Verzögerungen im Bauablauf könnte das Nachnässen der Leichtzuschläge nach Ablauf der angedachten Vorsättigungszeit eine Option sein, um die Vorsättigungszeit zu verlängern.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Matthäus, Carla; Back, Daniel; Weger, Daniel; Kränkel, Thomas; Scheydt, Jennifer; Gehlen, Christoph (2020): Effect of Cement Type and Limestone Powder Content on Extrudability of Lightweight Concrete. In: Freek P. Bos, Sandra S. Lucas, Rob J.M. Wolfs und Theo A.M. Salet (Hg.): SECOND RILEM INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE AND DIGITAL FABRICATION, Bd. 28. [S.I.]: SPRINGER NATURE (RILEM Bookseries), S. 312–322.
- [2] Thienel, Karl-Christian (2018): Gefügedichter und haufwerksporiger Leichtbeton. Skript für das Wintertrimester am Institut für Werkstoffe des Bauwesens. Universität der Bundeswehr München

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Thienel, Karl-Christian (2018): Gefügedichter und haufwerksporiger Leichtbeton. Skript für das Wintertrimester am Institut für Werkstoffe des Bauwesens. Universität der Bundeswehr München
2. Faust, Thorsten (2003): Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Ernst & Sohn.
3. Matthäus, Carla; Back, Daniel; Weger, Daniel; Kränkel, Thomas; Scheydt, Jennifer; Gehlen, Christoph (2020): Effect of Cement Type and Limestone Powder Content on Extrudability of Lightweight Concrete. In: Freek P. Bos, Sandra S. Lucas, Rob J.M. Wolfs und Theo A.M. Salet (Hg.): SECOND RILEM INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE AND DIGITAL FABRICATION, Bd. 28. [S.I.]: SPRINGER NATURE (RILEM Bookseries), S. 312–322.

Autorin

Lisa Forstmaier

Studium

Seit 10/2020 Masterstudium Bauingenieurwesen, Technische Universität München
 10/2016 – 09/2020 Bachelorstudium Bauingenieurwesen, Technische Universität München

Berufstätigkeiten

Seit 04/2019 Werkstudententätigkeit im Baumanagement,
 Linsmayer Projekte GmbH in München
 11/2018 – 01/2019 Studentische Hilfskraft am Lehrstuhl Risikoanalyse und Zuverlässigkeit,
 Technische Universität München

Lehrstuhlinhaber, Betreuer und Prüfer

Die Bachelorarbeit wurde am Centrum für Baustoffe und Materialprüfung, am Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen an der Fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München angefertigt.

Lehrstuhlinhaber: Herr Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
 Betreuerin der Bachelorarbeit: Frau Carla Matthäus, M.Sc.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNGESÄTTIGTE HYDRAULISCHE EIGENSCHAFTEN VON INDUSTRIELLEN NEBENPRODUKTEN – RECHNERISCHE ERMITTLUNG VON HAUPTBEWÄSSERUNGSKURVEN ANHAND VON HAUPTENTWÄSSERUNGSKURVEN

Masterarbeit

Georg Kolb

Im Zuge des Klimawandels rückt auch im Bauwesen in den letzten Jahren die Nachhaltigkeit immer mehr in den Fokus. Einen zentralen Aspekt stellt dabei die Ressourcenschonung dar. Zur Förderung der Kreislaufwirtschaft sollen daher industrielle Nebenprodukte künftig vermehrt Anwendung im Erdbau finden und damit eine ökologisch und wirtschaftlich interessante Möglichkeit für klein- und mittelständische Unternehmen eröffnen. Zur Beschreibung des Wasserflusses in Erdbauwerken mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen ist die Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften der Böden im ungesättigten Zustand unabdingbar. Bei industriellen Nebenprodukten ist darauf zu achten, dass aufgrund von Intraaggregatporen ein bimodales Porensystem vorliegt, welches die hydraulischen Eigenschaften maßgeblich beeinflusst. Folglich müssen die mathematischen Modelle zur Parametrisierung der maßgeblichen hydraulischen Kenngrößen und die Modelle zur Abschätzung der Hysterese erarbeitet, verglichen und angepasst werden. Mittels experimenteller Untersuchungen werden die hydraulischen Eigenschaften eines industriellen Nebenprodukts und eines natürlichen Sandes ermittelt. Abschließend werden zwei neue Ansätze präsentiert, die eine Abschätzung der Hysterese für Böden mit heterogenen Porensystemen ermöglichen.

Keywords: Industrielle Nebenprodukte, Kreislaufwirtschaft, Ersatzbaustoffe, Ungesättigte Bodenzone, Hydraulische Leitfähigkeit, Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung, Hysterese

Einleitung

Bei der Erzeugung von Eisen und Stahl fallen als Nebenprodukte die industriellen Gesteine Hochofen- und Stahlwerksschlacke an. Im Jahr 2018 fielen 5,39 Mio. Tonnen Stahlwerksschlacke

an, welche zu großen Teilen als Baustoff wieder Verwendung findet. Knapp 14 % der Erzeugnisse werden jedoch aufgrund ihrer technischen oder umweltschädlichen Eigenschaften deponiert [1]. Eine bedeutende Einsatzmöglichkeit dieser Baustoffe findet sich im Erdbau wieder. Die

Errichtung von Erdbauwerken führt aufgrund des Bauvolumens zu teils erheblichem Baustoffverbrauch. Im Zusammenhang mit dem Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung [2] und dem mit der Ersatzbaustoffverordnung [3] formulierten Ziel einer Schonung von Primärrohstoffen und bevorzugten Verwendung von Sekundärbaustoffen ist eine vermehrte Nutzung von industriellen Nebenprodukten anzustreben. Die Herstellung, Verarbeitung und Vermarktung von industriellen Nebenprodukten wird in Deutschland hauptsächlich von klein- und mittelständischen Unternehmen betrieben. Die Schaffung einer neuen Absatzmöglichkeit, inklusive dem Vorteil, dass industrielle Nebenprodukte häufig preiswerter gehandelt werden als Naturgesteine, kann in der Praxis zur wirtschaftlichen Sicherung dieser Unternehmen beitragen. Unabdingbare Voraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit ist jedoch der Nachweis, dass die für den jeweiligen Einsatzzweck vorgesehenen Baustoffe geeignet sind. Zum Schutz von Boden, Grundwasser und Oberflächengewässern vor einer möglichen Belastung durch ausgelaugte Inhaltsstoffe ist die Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften der Materialien daher von besonderer Bedeutung.

Die wichtigsten Kenngrößen zur Beschreibung des Wasserflusses in der ungesättigten Bodenzone stellen die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung (SWRC) und die hydraulische Leitfähigkeit dar. Die granulometrischen Eigenschaften und die damit einhergehende Porengrößenverteilung innerhalb eines Bodens haben eine direkte Auswirkung auf die hydraulischen Eigenschaften. Industrielle Nebenprodukte wie die Stahlwerksschlacken weisen im Gegensatz zu natürlichen Böden eine Porosität innerhalb der einzelnen Bodenpartikel auf, sogenannte Intraaggregatporen. Die aus der Literatur bekannten und üblicherweise angewandten mathematischen Modelle zur Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften beruhen auf einer unimodalen Porengrößenverteilung und können Böden mit heterogenen

Porensystemen nicht genau abbilden [4]. Beide Beziehungen werden über Bewässerungs- und Entwässerungsvorgänge beschrieben. Die Bestimmung der Bewässerungskurve ist im Gegensatz zur Entwässerungskurve, besonders bei sehr gering durchlässigen Böden sehr aufwändig, sodass die Entwicklung einer mathematischen Methode zur Bestimmung der Bewässerungs- aus der Entwässerungskurve sinnvoll ist. Die derzeit bestehenden Ansätze beruhen auf einer unimodalen Porengrößenverteilung [5]. Somit ist für Böden mit einem Sekundärporensystem keine zuverlässige Abschätzung der Bewässerungskurve möglich

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Etablierung eines neuen Ansatzes zur Vorhersage der Bewässerungskurve aus der Entwässerungskurve für Böden mit bimodalen Porengrößenverteilungen sowie der Durchführung von Untersuchungen zu den hydraulischen Eigenschaften zweier Böden zur Überprüfung und Verbesserung des vorgeschlagenen Modells.

Grundlagen

Anhand von Ergebnissen zu SWRC-Verläufen zu verschiedenen Böden aus der Literatur werden die gängigsten Modelle zur Abschätzung der Hysteresekurven und zur Parametrisierung bimodaler Böden angewandt und ein Vergleich gezogen. Zur Vorhersage der Bewässerungskurve liefert das Modell nach PHAM ET AL. [5] die präzisesten Abschätzungen. Das Modell beruht auf einer unimodalen Parametrisierung nach FENG UND FREDLUND [6] und etabliert empirische Parameter, die sich aus einer Studie der SWRC an über 30 verschiedenen Böden ableiten ließen. Zur Parametrisierung der bimodalen Verläufe können mit dem Ansatz nach DURNER [4] die genauesten Ergebnisse erreicht werden. Der Ansatz basiert auf einer linearen Überlagerung der van Genuchten Gleichung. Zuerst werden hierbei die unterschiedlichen Porensysteme separat betrachtet und anschließend nach dem Superpositionsprinzip mit einem Wichtungsfaktor

zusammengefügt. In einem weiteren Schritt werden weitere Ansätze zur mathematischen Annäherung an den Verlauf von bimodalen SWRC erstellt, verglichen und bewertet.

Materialien und Methoden

Zur Ermittlung der hydraulischen Kenngrößen werden ein Quarzsand als natürlicher Boden mit einer Korngrößenverteilung zwischen 0,1 mm und 0,5 mm und eine Gießpfannenschlacke (GPS) als ein industrielles Nebenprodukt mit einem Größtkorn von 8 mm herangezogen. Die Ermittlung der SWRC im trockenen bis mittleren Feuchtebereich erfolgt mit Hilfe eines Feuchtigkeitsmessgerätes nach der Taupunktmethode (WP4C) zur Erfassung der Werte im hohen Saugspannungsbereich. Die Ermittlung vom gesättigten Zustand bis zum mittleren Feuchtebereich erfolgt mit Tensiometern. Für beide Versuche wird ein Bewässerungs- und ein Entwässerungspfad aufgezeichnet. Bei dem Verdunstungsprozess wird der Boden vom gesättigten Zustand aus an der Luft getrocknet. Die Bewässerung erfolgt bei den WP4C-Messungen über tröpfchenweise Zugabe auf die Oberfläche der Probe. Bei den Tensiometermessungen wird über eine konstante Wasserzufuhr der Boden von unten nach oben durchströmt. Die Erfassung der Saugspannung erfolgt über drei Tensiometer, die in unterschiedlichen Höhen in der Probe installiert sind. Die Versuchsauswertung und die Ermittlung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit erfolgt aus den Verdunstungs- und Bewässerungsexperimenten nach der Methode nach SCHINDLER [7]. Unter der Annahme einer linearen Wassergehaltsverteilung über die Höhe der Probe wird dabei über die Ermittlung der Flussrate und des hydraulischen Gradienten auf die hydraulische Leitfähigkeit geschlossen.

Ergebnisse und Diskussion

Die gewonnenen Ergebnisse zur SWRC und zur hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion werden, mit

den gängigen aus der Literatur bekannten Modellen und mit neuen, in dieser Arbeit präsentierten Modellen beschrieben.

Die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung des Quarzsands beschreibt aufgrund der unimodalen Porengrößenverteilung die zu erwartende sigmoidale Form (s. Abb. 1). Im feuchten Bereich bis zu einem volumetrischen Wassergehalt von ca. 10% ist eine deutliche Hysterese zu erkennen. Die Parametrisierung des Verlaufs erfolgt mit dem Modell nach FREDLUND UND XING [8].

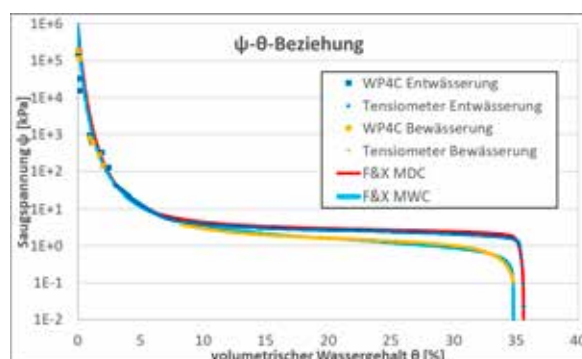


Abb. 1: SWRC des Quarzsands

Die bimodale Porengrößenverteilung der GPS äußert sich in einem doppelt sigmoidalen Verlauf der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung (s. Abb. 2). Über den kompletten Verlauf ist eine Hysterese zu erkennen. Die präzisesten mathematischen Annäherungen an die versuchstechnisch ermittelten Werte können über den Ansatz nach DURNER [4] oder über den in dieser Arbeit präsentierten Ansatz „FFbim“ (s. Abb. 2) erreicht werden.

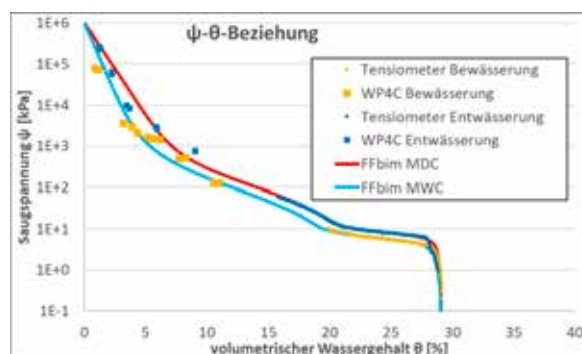


Abb. 2: SWRC der Gießpfannenschlacke

Es kann nachgewiesen werden, dass mit den gängigen, auf unimodalen Porengrößenverteilungen beruhenden Modellen eine unzureichend genaue Annäherung erreicht wird. Folgend werden zwei neue Ansätze zur Abschätzung der Bewässerungskurve präsentiert, die auf einer bimodalen Parametrisierung beruhen.

Der erste der beiden Ansätze basiert auf der Parametrisierung nach FENG UND FREDLUND [6] und dem Hysterese-Modell nach PHAM ET AL. [5]. Der unimodale Ansatz nach FENG UND FREDLUND [6] wird über zwei Wichtungsfaktoren superpositioniert, um einen bimodalen Verlauf darstellen zu können („FFbim“). Zur Vorhersage der Bewässerungskurve werden die von PHAM ET AL. [5]. vorgeschlagenen empirischen Werte auf das bimodale SWRC-Modell „FFbim“ angewandt.

Der zweite in dieser Arbeit präsentierte Ansatz beschränkt sich auf die Verschiebung der Kurve. Um eine größere Flexibilität in der Wahl der Parametrisierung der bimodalen SWRC zu gewährleisten und da dieser Ansatz für die GPS die beste Annäherung erzielte, wird das Modell nach DURNER [4] gewählt und mit einem empirischen Parameter zur Verschiebung der vorherzusagenden Kurve belegt. Das Ergebnis der Anwendung des Modells ist in Abb. 3 dargestellt, wobei „Vorhersage 1“ den empirischen Wert für verdichteten Sand verwendet, „Vorhersage 2“ verwendet den empirischen Wert für Sand.

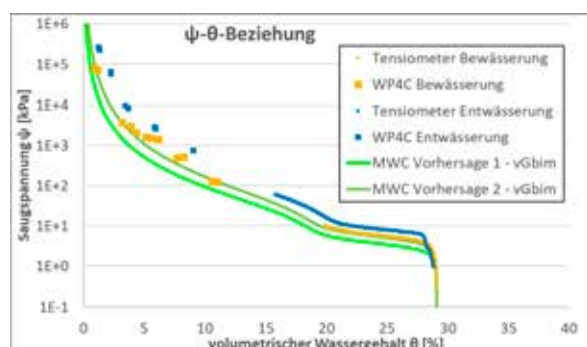


Abb. 3: Vorhersage der Bewässerungskurve der GPS mit Modell 2

Schlussfolgerung und Ausblick

Durch Anwendung beider Modelle auf Grundlage der ermittelten Messergebnisse der GPS konnten mithilfe des zweiten Modells, welches auf der Parametrisierung nach DURNER [4] basiert, genaue Abschätzungen der Bewässerungskurve erreicht werden. Die Abschätzungen des ersten Modells, das auf dem Ansatz nach FENG UND FREDLUND [6] beruht, variierten stärker, je nach Wahl des empirischen Parametersets. Über die Untersuchungen an der GPS konnten die Modelle bezüglich der ermittelten Messdaten angepasst werden. Damit ist jedoch kein universelles Modell zur Vorhersage der Bewässerungskurve bei bimodalen Böden im Allgemeinen gegeben. Eine größere Datenmenge zur Überprüfung der Modelle, bzw. zur Validierung und ggf. Anpassung der empirischen Parameter ist von Nöten, um ein allgemein gültiges Modell zur genauen Abschätzung der Bewässerungskurve etablieren zu können. Ein verlässliches Modell ist die Grundlage zu einer präzisen Abschätzung der Hysterese und trägt damit einen großen Anteil zur genauen Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit bei industriellen Nebenprodukten bei. Die genaue Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften ermöglicht einen vermehrten Einsatz von industriellen Nebenprodukten im Erdbau und trägt damit maßgeblich zu einer ökologischen und ressourcenschonenden Bauweise bei. Für klein- und mittelständische Unternehmen kann der Einsatz industrieller Nebenprodukte darüber hinaus eine wirtschaftlich interessante Variante bei Erdbauwerken darstellen und einen neuen Absatzmarkt für die Weiterverwertung dieser Stoffe generieren.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Merkel, T. (2019): Daten zur Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken 2018; Report Wissenschaftsprojekte des FEhS-Instituts 1/2019, Nr. 26(1), S. 25-26.
- [2]: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau- und Reaktorsicherheit (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin.
- [3]: Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung. Bundesrats-Drucksache 566/17 vom 17.07.2017
- [4]: Durner, W. (1994): Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, Water Resources Research, Vol. 30, pp. 211-223)
- [5]: Pham, H.; Fredlund, D.; Barbour, S. (2005): A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves, Canadian Geotechnical Journal, J. 42, S. 1548-1568.2
- [6]: Feng, M; Fredlund, D. G. (1999): Hysteretic influence associated with the thermal conductivity sensor measurements, 52nd Canadian Geotechnical Conference, S. 651-657
- [7]: Schindler, U. (1980): Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben; Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde; S. 1-7.
- [8]: Fredlund, D. G.; Xing, A. (1994): Equations for the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 521-532.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen: Oben aufgeführte Quellen, sowie:

1. Birle, E (2011): Geohydraulische Eigenschaften verdichteter Tone unter besonderer Berücksichtigung des ungesättigten Zustandes; Technische Universität München, Dissertation am Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau.
2. Lu, N., Likos, W. (2004): Unsaturated Soil Mechanics. John Wiley & Sons, Inc.

Autor, Coautoren

Georg Kolb, geboren: 28.03.1993 in Stuttgart

Studium: Bauingenieurwesen an der TU München mit Abschluss M.Sc. (2012 - 2020)

Karriere: Bavaria Project Service (2016-2018)
Ingenieurbüro EDR (seit 2018)

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Zentrum Geotechnik - Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, TU München

Betreuer:

Dipl.-Ing. Elisavet Barka

Dr.-Ing. Emanuel Birle

Prof.-Dr.-Ing. Roberto Cudmani – Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

PREDICTION OF WINDOW CONTROL ACTIONS USING MACHINE LEARNING

Masterarbeit

Marina Langer

In dieser Masterarbeit wird untersucht, inwiefern maschinelles Lernen für die Vorhersage des Fenstersteuerungsverhaltens von Gebäudenutzenden eingesetzt werden kann. Eine verbesserte Vorhersagbarkeit des Nutzerverhaltens ermöglicht realistischere Gebäudesimulationen und einen optimierten Einsatz der Gebäudeautomation. Somit trägt die genaue Vorhersage des Nutzerverhaltens zur Ausschöpfung von Ressourceneinsparpotenzialen und zur verbesserten Nachhaltigkeit der Gebäude bei. Der in dieser Arbeit beschriebene methodische Ansatz basiert auf Monitoring-Daten eines Bürogebäudes in Regensburg. Das umfangreiche Monitoring zur Erfassung der notwendigen Daten, z. B. der Innenraum- und Außentemperaturen sowie der Fenstergriffzustände wurde im Vorfeld im Rahmen eines Forschungsprojektes in den Jahren 2017 bis 2020 durchgeführt. In dieser Arbeit werden anhand verschiedener Klassifizierungsalgorithmen des maschinellen Lernens und anhand der vorhandenen Daten Modelle für die Vorhersage von Fensteröffnungs- und --schließungsereignissen trainiert. Potenziale und Grenzen der realistischen Vorhersage des Nutzerverhaltens auf der Grundlage der verfügbaren Daten werden identifiziert. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen insbesondere, dass einige Verhaltensmuster durch die trainierten Modelle abgebildet werden können, zugleich aber noch ein großer Datenbedarf besteht, um bessere Vorhersagen bezüglich des Nutzerverhaltens zu erzielen.

Keywords: Nutzerverhalten, maschinelles Lernen, Monitoring, Gebäudeautomation, thermische Gebäudesimulation

Einführung

Der Bausektor spielt eine wichtige Rolle im heutigen Streben nach einer nachhaltigeren Zukunft. Er ist für mehr als ein Drittel des globalen Ressourcen- und Energieverbrauchs verantwortlich [1].

Neben den Eigenschaften der Konstruktion und der Gebäudetechnik ist das energierelevante Verhalten der Nutzenden von entscheidender Bedeutung. Insbesondere das Fensteröffnungs-

verhalten kann einen großen Einfluss auf den Energiebedarf zur Sicherstellung der thermischen Behaglichkeit haben [2].

Besonders für die beiden Anwendungsfälle der thermischen Gebäudesimulation und der Gebäudeautomation ist dieser Einfluss entscheidend. In thermischen Gebäudesimulationen wird das Fenstersteuerungsverhalten nach entsprechenden Normen oder durch regelbasierte Funktionen z. B. nach DIN V 18599-10 [3] oder

DIN EN 15251 [4] modelliert. Die zugrundeliegenden Annahmen sind jedoch unrealistisch. Beispielsweise wird die natürliche Lüftung in der DIN V 18599 nicht berücksichtigt. Dies führt zu einer unzureichenden Darstellung des tatsächlichen Verhaltens. Thermische Gebäudesimulationen werden häufig eingesetzt, um die besten Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz, zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und zur Maximierung des thermischen Komforts zu ermitteln. Eine unrealistische Modellierung des Fenstersteuerungsverhaltens führt letztlich zu einer Diskrepanz zwischen dem prognostizierten Energiebedarf und dem realen Energieverbrauch.

Das Ziel der Gebäudeautomation ist die Gebäudetechnik so zu steuern, dass der Energieverbrauch minimiert wird und zugleich thermischer Innenraumkomfort gegeben ist. Unter Berücksichtigung der Lüftung kann hier natürlich das Eingreifen des Nutzers z. B. durch das Öffnen eines Fensters zu einem erhöhten Energieverbrauch und Fehlverhalten in der Gebäudeautomation führen. Um zu verhindern, dass die Nutzenden das Fenster öffnen, muss die Gebäudeautomation das Nutzerverhalten so früh wie möglich vorhersehen können und die raumklimatischen Bedingungen rechtzeitig entsprechend anpassen.

Eine intelligente und genaue Vorhersage des Gebäudenutzerverhaltens begünstigt somit die Durchführung realistischer Gebäudesimulationen und den optimierten Betrieb der Gebäudeautomation. Die so ermöglichten Effizienzoptimierungen tragen wiederum wesentlich zu einer verbesserten Nachhaltigkeit im gesamten Gebäudelebenszyklus bei. Diese Masterarbeit zeigt die Möglichkeiten des Einsatzes maschinellen Lernens für eine solche intelligente Vorhersage des Nutzerverhaltens in Gebäuden auf.

Bekanntlich beeinflussen folgende Faktoren das Fenstersteuerungsverhalten: Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit, Luftqualität (gemessen am Indikator CO₂-Konzentration), Außenbedingungen (Lärm, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wind), aktueller Fensterzustand (geschlossen, offen, gekippt), Kleidung, Aktivitätsniveau,

Routinen und mentale Zustände [6]. Diese Aspekte sind stark von der jeweiligen Person, dem Ort und der Situation abhängig.

Problemstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Potenziale und Grenzen des Einsatzes von Klassifikatoren des maschinellen Lernens zur Erkennung von Mustern und zur Vorhersage des Fenstersteuerungsverhaltens der Nutzenden zu identifizieren. Es wird daher die Leistung maschineller Lernmodelle untersucht, welche aus den Messdaten von Raumklimamonitoringssystemen lernen. Für den Einsatz eines prädiktiven Modells in der Gebäudeautomation müssen die Vorhersagen lange genug im Voraus getroffen werden, um eine ausreichende Reaktionszeit für die Gebäudetechnik zu gewährleisten. In dieser Arbeit geht es jedoch zunächst darum, Rückschlüsse auf allgemeine Potenziale und Grenzen zu ziehen. Daher wird der einfachste Fall der Vorhersage des Verhaltens immer in der darauffolgenden Minute als erster Ansatz definiert. Die Modelle werden auf Daten einer Zone trainiert und sagen somit das Verhalten des Nutzenden dieser Zone voraus.

Vorgehensweise

Um Modelle für die Vorhersage des Nutzerverhaltens zu bilden, werden verschiedene maschinelle Lernalgorithmen getestet. Die Algorithmen nutzen die vorhandenen Daten, um aus ihnen zu lernen und unterscheiden sich durch die zugrunde liegende Logik. Die verwendeten maschinellen Lernalgorithmen sind in der Programmiersprache Python in der online Bibliothek scikit-learn verfügbar. Durch das Trainieren unterschiedlicher Modelle (anhand verschiedener Algorithmen) kann geprüft werden, ob die Leistung des Modells vom verwendeten Algorithmus abhängt. Deswegen werden möglichst unterschiedliche Algorithmen getestet und miteinander verglichen. Dieses Verfahren nennt sich „Spot-Checking“ [5].

Basierend auf den Daten und dem vorliegenden Problem müssen die Lernalgorithmen folgende Anforderungen erfüllen:

- Eignung für Multiklassenprobleme
- Rechenintensive Algorithmen (z. B. Deep Learning) sind ausgeschlossen
- Eignung für große Datensätze von über einer Million Instanzen
- Eignung für ungleich verteilte Daten

Bei der Auswahl der Algorithmen ist es sinnvoll, eine Mischung aus parametrischen und nicht-parametrischen Algorithmen, modellbasierten, baumbasierten und instanzbasierten Algorithmen, linearen und nicht-linearen Funktionen sowie verschiedenen Lernalgorithmen für denselben Repräsentationstyp zu wählen. Unter Berücksichtigung aller beschriebenen Aspekte werden die folgenden maschinellen Lernalgorithmen für das „Spot-Checking“-Verfahren ausgewählt [6, 7]:

- Decision Tree
- Random Forest
- Gradient Tree Boosting
- k Nearest Neighbors
- Gaussian Naïve Bayes
- Support Vector Machine with Stochastic Gradient Descent
- Logistic Regression

In einem iterativen Prozess werden für jeden Algorithmus Modelle trainiert, Vorhersagen ausgewertet und Optimierungstechniken implementiert. Dabei werden insbesondere folgende Optimierungen vorgenommen:

- Dimensionsreduzierung
- Erzeugung zusätzlicher Features aus den vorherigen Fensterzuständen
- Bildung weiterer Variablen aus den vorherigen Messwerten (z. B. Mittelwert, Maximal- und Minimalwert)

Die Qualität der Ergebnisse wird anhand von zwei Kenngrößen evaluiert. Die am häufigsten verwendete Bewertungsgröße für Klassifikationsprobleme ist die Gesamtgenauigkeit. Sie stellt das Verhältnis der korrekten Vorhersagen zur Gesamtanzahl an Vorhersagen dar. Im vorliegenden

Klassifikationsproblem sind die Klassen stark ungleich verteilt (der Fensterzustand wird sehr selten verändert). Dies führt dazu, dass die Gesamtgenauigkeit als Metrik für die Bewertung der Modelle nicht ausreicht. Es ist also notwendig, sich zusätzlich auf die unterrepräsentierten Klassen zu konzentrieren. Hierzu wird eine weitere Bewertungsgröße eingeführt, der Recall-Wert. Der Recall-Wert einer Klasse ist definiert als Prozentsatz der Instanzen dieser Klasse, die vom trainierten Modell richtig klassifiziert werden [8].

Im ersten Schritt wird anhand des Recall-Wertes der unterrepräsentierten Klassen beurteilt, ob das Modell die Öffnungs- und Schließereignisse erkennt. Nur die Modelle, die einen definierten Schwellenwert für den Recall-Wert der unterrepräsentierten Klassen erreichen, werden weiter berücksichtigt. Da im derzeitigen Forschungsstand keine vergleichbaren Modelle für das vorliegende Problem existieren, gibt es insbesondere im Hinblick auf den zu erreichenden Schwellenwert des Recall-Werts keine Vergleichswerte. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit der zu erreichende Recall-Wert von 80 % gewählt und festgelegt. Erreicht ein Modell den definierten Schwellenwert, wird dieses Modell im Anschluss anhand der Gesamtgenauigkeit evaluiert, um das Modell mit der besten Vorhersagequalität zu identifizieren.

Ergebnisse

Das beste Modell basiert auf dem Random-Forest-Algorithmus. Die Vorhersage erreicht eine Gesamtgenauigkeit von 81,16 % auf den Testdaten. Das Gaussian-Naïve-Bayes-Modell erreicht eine Gesamtgenauigkeit von 32,36 %. Die beiden durch logistische Regression mit den Solvern 'newton cg' und 'lbfgs' erstellten Modelle erreichen beide eine Gesamtgenauigkeit von 77,04 %. Das Modell Logistische Regression mit dem Solver 'saga' erreicht eine Gesamtgenauigkeit von 71,48 %. Die Lernalgorithmen Decision Tree, Gradient Boosting, k-Nearest Neighbors, Logistische Regression mit den Solvern 'sag' und 'liblinear', sowie Support Vector Machine mit

Stochastic Gradient Descent erreichen den Recall-Wert von 80 % für die unterrepräsentierten Klassen nicht. Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Ergebnisse der erfolgreichen Algorithmen.

Random Forest	Gaussian Naive Bayes	Logistic Regression ('newton cg' and 'lbfgs')	Logistic Regression ('saga')
81,16 %	32,36 %	77,04 %	71,48 %

Tabelle 1: Vergleich der erreichten Gesamtgenauigkeiten auf ungesehenen Testdaten

Der Random Forest klassifiziert alle Fensterschließereignisse des Testdatensatzes und 34 der 42 Fensteröffnungereignisse korrekt. Die Gesamtgenauigkeit von über 80 % erscheint zufriedenstellend, wird jedoch hauptsächlich dadurch erreicht, dass das Modell erkennt, dass der Fensterzustand in bestimmten Zeiträumen nie verändert wird. Betrachtet man nur die Vorhersagen für die Zeit während der Nächte und der Wochenenden, beträgt die erreichte Gesamtgenauigkeit 94,96 %. Betrachtet man hingegen nur den Zeitraum tagsüber (werktags zwischen 6:10 Uhr und 18:46 Uhr) dann wird eine Genauigkeit von nur 52,06 % erreicht. Darüber hinaus zeigen die Untersuchungen des gesamten Datensatzes, dass Fensteröffnungereignisse meist morgens um Minute 400 des Tages stattfinden. Diese morgendliche Routine der Fensteröffnung erkennt das Modell.

Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf den Messdaten und auf maschinellen Lernalgorithmen können erfolgreiche Modelle für die Vorhersage des Fenstersteuerungsverhaltens trainiert werden. Die Ergebnisse zeigen die Potentiale von Algorithmen des maschinellen Lernens auf, mit welchen Muster in Daten erkannt werden können, die dann für thermische Simulationen und die Gebäudeautomation verarbeitet werden können.

Dabei zeigt sich auch, dass nach wie vor ein Optimierungspotential in der Erstellung von geeigneten Modellen besteht. Weiterer Forschungsbedarf kann insbesondere in der Modellerstellung und auch in dem zu Grunde liegenden Monitoring identifiziert werden.

Für zukünftige Untersuchungen müssen weitere Informationen als Eingangsgrößen gesammelt und analysiert werden. Beispielsweise sollten die CO₂-Konzentration, die Luftgeschwindigkeit und die Anwesenheit von Personen im Raum erfasst werden. Der Grad der Bekleidung, das Aktivitätsniveau und der mentale Zustand der Bewohner beeinflussen zudem das Verhalten, wobei diese Parameter schwer zu erfassen sind. Für den Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der TU München stellt diese Arbeit eine zentrale Rolle in der Entwicklung einer autarken und mobilen Messbox dar. Mit Hilfe dieser Messbox können weitere wichtige Parameter (z. B. CO₂-Konzentration, Luftgeschwindigkeit, Schalldruckpegel, Raumluftqualität) gemessen werden. Besonders die Erfassung näher am Nutzenden ist vielversprechend, da die Daten dann deutlich exakter die lokale Situation der Personen repräsentiert. Die in dieser Arbeit entwickelten Modelle werden in Kombination mit der Messbox in zwei Forschungsprojekten analysiert und weitere wertvolle Ergebnisse generiert.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Abergel, T., et al. (2017). Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector: Global Status Report 2017. UN Environment and International Energy Agency: Paris, France.
- [2]: Gaetani, I., Hoes, P. J., & Hensen, J. L. (2018). Estimating the influence of occupant behavior on building heating and cooling energy in one simulation run. Applied Energy, 223, 159-171.
- [3]: DIN, V. 18599-10: 2018-19. (2018). Energy efficiency of buildings - Calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting - Part 10: Boundary conditions of use, climatic data
- [4]: DIN, EN 15251:2012-12. (2012). Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics; German version EN 15251:2007
- [5]: Pedregosa, F., Varoquaux, Gaël, Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... others. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. Journal of Machine Learning Research, 12(Oct), 2825–2830.
- [6]: Burkov, Andriy. 2019. The Hundred Page Machine Learning Book.
- [7]: Perner, Petra. 2013. Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition. New York : s.n.
- [8]: Raschka, Sebastian and Mirjalili, Vahid. 2017. Python Machine Learning.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Burkov, Andriy. 2019. The Hundred Page Machine Learning Book.
2. Raschka, Sebastian and Mirjalili, Vahid. 2017. Python Machine Learning.
3. Ng, Andrew Y. Machine Learning Yearning. 2018

Angaben zu Verfasser, Lehrstuhl und Betreuer

Marina Langer hat nach ihrem Bachelor of Science (Umweltingenieurwesen) den Master of Science Energieeffizientes und Nachhaltiges Bauen an der TU München erfolgreich absolviert. Im Rahmen ihres Masterstudiums und insbesondere ihrer Thesis hat sie sich auf die Themengebiete der Programmierung in Python und des maschinellen Lernens spezialisiert.

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen von Prof. Dr.-Ing. Werner Lang. Betreut wurde die Masterarbeit seitens des wissenschaftlichen Mitarbeiters Michael Vollmer M.Sc.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNGEN ZUR RECHNERISCHEN ERMITTLUNG DER ERFORDERLICHEN EINBINDETIEFE BEI TIEFEN BAUGRUBEN MIT DEM TEILSICHERHEITSKONZEPT

Masterarbeit

Melanie Lechner

In Hinblick auf die hohen Herstellungskosten und den Ressourcenverbrauch im Zuge des Baus von tiefen Baugruben ist eine effiziente Dimensionierung der Verbauwände ausschlaggebend. Die Kalkulation der erforderlichen Einbindetiefe spielt hierbei eine wichtige Rolle. Im Zuge der Einführung des Teilsicherheitskonzeptes ergeben sich jedoch erhöhte Einbindelängen, die sich nicht mit den bisherigen Erfahrungswerten und Erkenntnissen decken. Aufgrund dessen werden im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit Untersuchungen zur erforderlichen Einbindetiefe bei tiefen Baugruben unter Berücksichtigung des Teilsicherheitskonzeptes durchgeführt. Die Ursache, weshalb sich nach momentanem Stand der Technik eine erhöhte kalkulierte Einbindetiefe ergibt, wird erarbeitet. Das Ziel dieser Arbeit beinhaltet außerdem die Darstellung der Möglichkeiten zu einer analytischen Reduzierung der erforderlichen Einbindetiefe. Auch auf die Besonderheiten des Teilsicherheitskonzeptes wird eingegangen. Es wird anhand eines analytischen Berechnungsprogramms der Iterationsprozess zur Dimensionierung einer Baugrubenwand herausgearbeitet und mittels Handrechnung überprüft und nachvollzogen. Der maßgebende Nachweis, aus welchem die erhöhten Einbindelängen resultieren, wird dargelegt. Es erfolgt ein Vergleich mit den Berechnungsergebnissen unter Verwendung des Globalsicherheitskonzeptes und eine Validierung der analytischen Ergebnisse mithilfe eines 2D-FE-Programms.

Keywords: Einbindetiefe, Teilsicherheitskonzept, tiefe Baugruben, Finite Elemente, GGU-Retain

Einleitung

Eine Vereinbarkeit von Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz spielt bei der Planung von Baumaßnahmen eine fortwährende Rolle. Bereits bei der Herstellung von Verbauwänden

beispielsweise im Zuge des Neubaus geplanter Infrastruktur Strecken könnte mit einer geringeren erforderlichen Einbindetiefe ein hoher Prozentsatz an Rohstoffen eingespart werden. Ein signifikanter Beitrag zum ressourcenschonenden Bauen könnte geliefert werden.

Teilsicherheitskonzept

Das bisher verwendete globale Sicherheitskonzept, das auf einem Vergleich der maximal möglichen Widerstände mit den tatsächlich wirkenden Lasten basiert, wurde abgeschafft [1]. Sobald das Verhältnis der beiden angesetzten Werte ausreichend groß ist, wurde von einer hinreichenden Sicherheit im System ausgegangen [2].

Durch die Implementierung des Teilsicherheitskonzeptes entstand hingegen eine Methode, bei welcher die vorhandene Systemsicherheit auf die Einwirkungs- und die Widerstandsseite aufgeteilt wird. Im Gegensatz zum globalen Sicherheitskonzept ergeben sich die Vergleichswerte (Bemessungswerte) der Einwirkungen und Widerstände durch eine Multiplikation beziehungsweise Division der charakteristischen Größen mit einem spezifischen Teilsicherheitsbeiwert. Sobald der Bemessungswert der Einwirkungen kleiner gleich dem Bemessungswert der Widerstände ist, besitzt das System eine ausreichende Sicherheit [3].

Analytische Berechnung der Einbindetiefe

Unter Annahme des neuen Sicherheitskonzeptes wird zur Berechnung der erforderlichen Einbindetiefe einer Baugrubenwand zuerst eine Einbindelänge als Startwert angenommen, welche in den folgenden Schritten im Zuge eines iterativen Prozesses optimiert wird [1]. Anhand des analytischen Berechnungsprogramms GGU-Retain kann diese nach dem klassischen Verfahren oder unter Berücksichtigung eines gebetteten Wandfußbereichs berechnet werden. Bei der Betrachtung des Iterationsprozesses werden hierbei mehrere Varianten unterschieden [4]. Der Iterationsprozess für die automatische Berechnung der erforderlichen Einbindetiefe unter Ansatz eines gebetteten Wandfußbereichs ist beispielhaft in der nachstehenden Abbildung gezeigt.

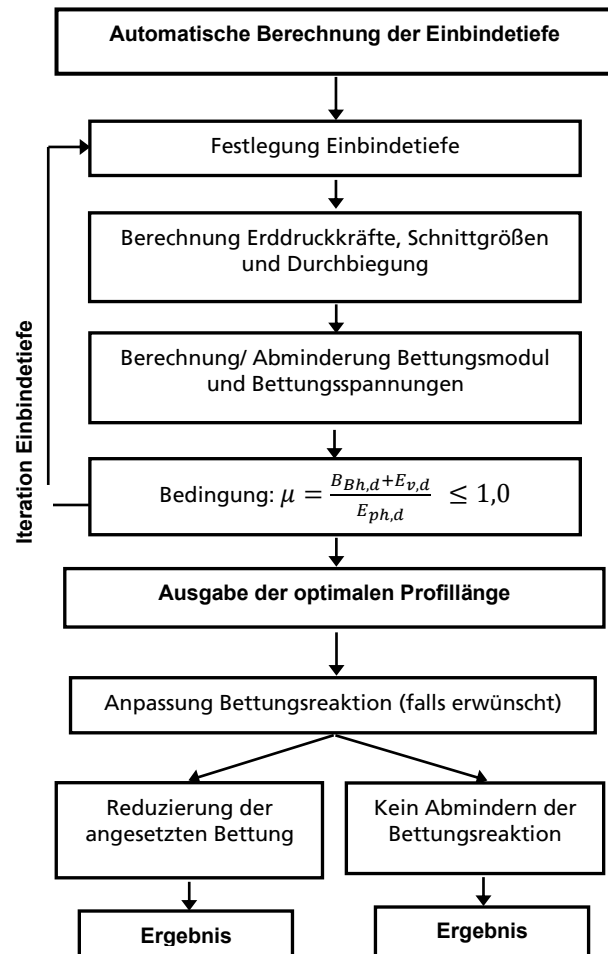


Abb. 1: Iterationsprozess zur Bestimmung der Einbindetiefe mit gebettetem Fuß in GGU-Retain

Im Zuge von einfachen händischen Vergleichsberechnungen konnten die Grundzüge des Iterationsprozesses korrekt nachvollzogen werden. Daraus resultiert, dass die vom Programm kalkulierte Einbindetiefe der tatsächlich minimal möglichen entspricht. Das analytische Berechnungsprogramm und dessen Iterationsprozess als eine Ursache für die erhöhten Einbindetiefen sind demnach auszuschließen.

Zur Erarbeitung weiterer möglicher Gründe werden tiefe Beispielbaugruben analysiert. Bei der Berechnung wurde das Bettungsmodulverfahren nach EB 102 angewendet [5]. Die Ausnutzung des Erdwiderlagers in der nachstehenden Abbildung zeigt eine Modifizierung im Spannungsverlauf des passiven Erddrucks (blaue Linie) im Zuge des Bodenschichtwechsels zum tertiären Ton. Dadurch verändern sich die Scherparameter,

sodass der Erdwiderstand über die Tiefe steiler ansteigt, was zu einer geringeren maximalen Spannungsordinate führt. Im Gegensatz dazu erhöht sich der Erdruchdruck ab dem Schichtwechsel aufgrund des geringeren Reibungswinkels im Ton und dem damit verbundenen kleineren Erdruchdruckbeiwert. Infolge der horizontalen Wandverformung und des angesetzten Bettungsmoduls werden Bettungsspannungen (grüne Linie) mobilisiert.

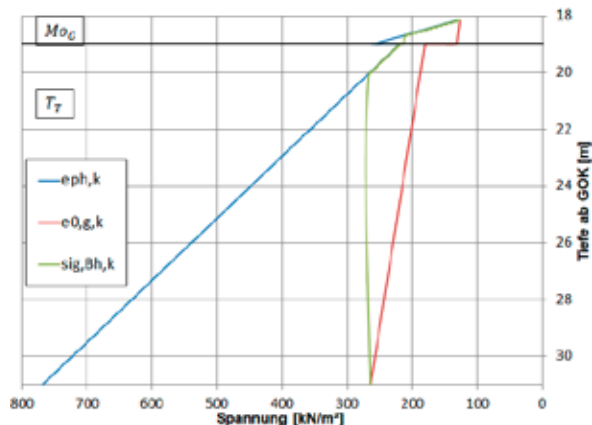


Abb. 2: Ausnutzung des Erdwiderstandes im Bauendzustand unter Verwendung charakteristischer Werte ab der Tiefe z_e bis zum Wandfuß mit dem Schichtwechsel bei der Tiefenkote $z = 19,0 \text{ m}$

Es stellt sich die Größe des passiven Erdrucks über die Tiefe als ein ausschlaggebendes Kriterium bei der Berechnung der Einbindelänge der Verbauwand dar.

Der maßgebende, die Einbindetiefe bestimmende Ausnutzungsgrad muss laut der analytischen Berechnungsergebnisse $\mu = 1,0$ sein. Unter Bildung von resultierenden charakteristischen Kräften kann bei der berechneten Profillänge kein derartiger Ausnutzungsgrad ermittelt werden. Der maßgebende Nachweis zur Bestimmung der Einbindetiefe muss somit unter Ansatz von Bemessungswerten durchgeführt werden. Die Einwirkungen werden hierfür mit einem Teilsicherheitsbeiwert multipliziert und damit einhergehend vergrößert. Gleichzeitig wird der passive Erdruchdruck durch einen Sicherheitsbeiwert dividiert und mit dem Anpassungsfaktor nach EB 22 multipliziert. Er wird somit stark abgemindert, sodass die Bemessungswerte der Bettungsspannungen $B_{Bh,d}$ in Summe mit dem

verbleibenden Erdruchdruck $E_{V,d}$ den passiven Erdruchdruck $E_{ph,d}$ lokal überschreiten.

Der erarbeitete maßgebende Nachweis zur Ermittlung der Einbindetiefe unter Berücksichtigung des Bettungsmodulverfahrens nach EB 102 wird anhand Gleichung 1.1 repräsentiert und beschreibt eine globale Betrachtung der resultierenden Spannungen (Bemessungswerte) über die Tiefe.

$$\frac{B_{Bh,d} + E_{V,d}}{E_{ph,d}} \leq 1,0 \quad (1.1)$$

Numerische Vergleichsberechnungen

Zusätzlich wurden numerische Berechnungen in PLAXIS 2D hinsichtlich des Verformungsverhaltens und der Ausnutzung des Erdwiderlagers durchgeführt.

Im Gegensatz zu den analytischen Berechnungsprogrammen werden hier die passiven Erdrücke aus der resultierenden Verformung der Verbauwand abgeleitet. Dadurch können unterhalb der Baugrubensohle hohe Erdwiderstände mobilisiert werden. Die numerischen Ergebnisse entsprechen jedoch nur dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, da bei der Berechnung keine Sicherheiten mit einkalkuliert werden.

Für Berechnungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit wurde im Zuge der $\varphi - c - \text{Reduktion}$, also einer sukzessiven Verringerung der Scherparameter (Reibungswinkel φ und Kohäsion c) bis zum Systemversagen, ein Sicherheitsfaktor errechnet [6]. Eine Verbindung zur Gesamtsystemsicherheit im Rahmen des Teilsicherheitskonzeptes kann dabei jedoch nicht hergestellt werden. Ein Grund hierfür spiegelt die hohe Sensitivität des numerisch generierten Sicherheitsfaktors gegenüber Systemänderungen wider. Zusätzlich wird durch die Reduzierung der Scherparameter das für die Berechnung von Baugruben einzuhaltende Nachweisverfahren ignoriert. Der analytisch

berechnete Grenzzustand des passiven Erddrucks wird nicht vollständig ausgenutzt, sodass eine Verringerung der Einbindetiefe demnach auch unter Berücksichtigung der numerischen Berechnungsergebnisse möglich wäre. Die Beaufschlagung der Sicherheitsbeiwerte erfolgt hierbei händisch.

Ergebnisse

Bei der Verwendung des globalen Sicherheitskonzeptes wurde zur Ermittlung des nutzbaren passiven Erddrucks nach EAB (1994) nur die im Grenzzustand erreichbare Ordinate des passiven Erddrucks durch einen Sicherheitsbeiwert geteilt [7]. Demgegenüber wird bei dem Teilsicherheitskonzept für den maßgebenden Nachweis unter Berücksichtigung aller gültigen Normen der Widerstand R_K durch einen entsprechenden Teilsicherheitsbeiwert dividiert und mit einem Anpassungsfaktor nach EB 22 multipliziert. Dieser wird verwendet, sofern die Wandfußverschiebungen vor dem Hintergrund der Gebrauchstauglichkeit reduziert ($\eta = 0,8$) werden müssen [7]. Aufgrund der bereits geringen Fußverschiebungen (FE-Modell Nachweis) ist die Verwendung eines höheren Anpassungsfaktors ($\eta = 1,0$) gewährleistet. Die Einwirkungen E_K werden ebenfalls mit einem Sicherheitsfaktor beaufschlagt. Die resultierenden Systemsicherheiten und der Einfluss des Anpassungsfaktors ergeben sich nach Tabelle 1. Aufgrund der gewählten Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungsseite und des Anpassungsfaktors auf der Widerstandsseite ergeben sich höhere Einbindetiefen, da die resultierenden Einwirkungen im Zähler zusätzlich zur Reduzierung der passiven Erddruckkraft im Nenner erhöht werden. Es werden damit höhere Systemsicherheiten miteinkalkuliert. Einen ebenfalls entscheidenden Einfluss auf die resultierende Einbindetiefe besitzen die vorhandenen geologischen Bodenverhältnisse und damit einhergehend die Scherparameter.

Teilsicherheitskonzept	Globalsicherheitskonzept
$\mu = \frac{1,125 \cdot E_k}{\frac{R_k}{1,3} \cdot 0,8} = 1,83 \cdot \frac{E_k}{R_k}$	$\eta = \frac{E_k}{\frac{R_k}{1,5}} = 1,50 \cdot \frac{E_k}{R_k}$
$\mu = \frac{1,125 \cdot E_k}{\frac{R_k}{1,3} \cdot 1,0} = 1,46 \cdot \frac{E_k}{R_k}$	

Tab. 1: Berechnung der resultierenden Systemsicherheiten anhand des Ausnutzungsgrades im Vergleich zwischen dem TSK (BS-T, GEO-3 und STR) und dem GSK

Vor allem der Reibungswinkel spielt dabei eine wichtige Rolle und kann je nach Ausmaß der Überkonsolidierung des Bodens erhöht werden. Eine Winkelvergrößerung desjenigen führt zu einer Vergrößerung des zugehörigen passiven Erddruckbeiwerts und somit zu einem höheren Erdwiderstand. Es können dadurch im Erdwiderlager höhere Bettungsspannungen mobilisiert werden, da für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit der Divisor, der die Grenzbedingung darstellt, vergrößert wird. Zudem reduziert sich die Erdruehdrukraft, sodass eine höhere Bettungskraft im Dividend bei geringerer Einbindetiefe angesetzt werden kann.

Fazit

Unter der Prämisse eines korrekten Iterationsprozesses kristallisieren sich neben der Verwendung des Teilsicherheitskonzeptes auch die geologischen Baugrundverhältnisse als ein maßgebender Aspekt heraus, der zu einer erhöhten Einbindetiefe führt. Bei der dargelegten Vergrößerung des Reibungswinkels werden Einsparpotentiale erkennbar, sodass eine Reduzierung der errechneten erforderlichen Einbindetiefe möglich ist. Der damit einhergehende positive Aspekt in Bezug auf die verstärkte Umsetzung ressourcenschonender Planungen bei Baumaßnahmen kann erzielt werden.

Literaturverzeichnis

- [1]: Hettler, A., Weißenbach, A. (2011): Baugruben – Berechnungsverfahren.- 405 S.; (Ernst W. + Sohn Verlag).
- [2]: Heibaum, M., Herten, M. (2007): Finite-Elemente-Methode für geotechnische Nachweise nach neuer Normung?.- Bautechnik 84, **9** (2007), S.627-635.
- [3]: Ziegler, M. (2017): Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau.- In: Witt, K.J. (2017) [Hrsg.], Grundbau-Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen, S. 1-44; (Ernst W. + Sohn Verlag).
- [4]: Buß, J. (2020): GGU – RETAIN (Version 10) Berechnung und Bemessung von Spundwänden, Trägerbohlwänden, Ortbetonwänden, FMI-Wänden und kombinierten Spundwänden.- 156 S.; Steinfeld (Civilservice GmbH).
- [5]: EAB (2012): Empfehlungen des Arbeitskreises Baugruben (2012) der deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), 5. Auflage.; Berlin (Ernst W. & Sohn Verlag).
- [6]: Brinkgreve, R.B.J, Zampich, L.M., RAGI MANOJ, N. (2019): PLAXIS 2D Connect Edition V20: Reference Manual.- 523 S.; Delft (Bentley Systems).
- [7]: EAB (1994): Empfehlungen des Arbeitskreises Baugruben (1994) der deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), 5. Auflage.; Berlin (Ernst W. & Sohn Verlag).

Autor, Coautoren

Melanie Lechner studierte erfolgreich im Bachelor Umweltingenieurwesen an der Technischen Universität München und begann dort anschließend ihr Masterstudium im Bereich Bauingenieurwesen. Dieses schloss sie im Januar 2021 mit dem Abschluss Master of Science ab.

Betreuer

Die Arbeit wurde am Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München unter Betreuung von M.Sc. Ulrich Schindler und apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Fillibeck angefertigt.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

NUMERISCHE SENSITIVITÄTSANALYSE DES „THERMAL INTEGRITY PROFILING“ FÜR ORTBETONBOHRPFÄHLE

Masterarbeit

Michael Lehle

Integritätsprüfungen zur Qualitätssicherung bei Bohrpfählen und anderen im Boden verbleibenden und damit einer Sichtprüfung unzugänglichen Gründungsbauteilen gewinnen immer mehr an Bedeutung. Das auf der Messung der beim Erhärten des Betons entstehenden Hydratationswärme basierende „Thermal Integrity Profiling“ (TIP) etabliert sich derzeit als Alternative oder Ergänzung zu anderen Verfahren. Der Grundsatz des „Thermal Integrity Profiling“ lautet, dass ein einwandfreier Bohrpfahl ein regelmäßiges Temperaturprofil über die Tiefe liefert. Dementsprechend können aus auftretenden thermischen Anomalien Rückschlüsse auf die Integrität des Bauteils gezogen werden. Da praktische Untersuchungen zu diesem Verfahren mit hohen Kosten verbunden sind, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Rechenmodell entwickelt, welches es erlaubt, das Verfahren hinsichtlich seiner Zuverlässigkeit bezogen auf die Aussagekraft auf die Integrität eines Bohrpfahls zu untersuchen. Es zeigt sich, dass das Verfahren für den Nachweis der gegebenen Integrität grundsätzlich geeignet ist. Beurteilungen zum Vorhandensein und zum Ausmaß von Fehlstellen sind jedoch aufgrund der Vielzahl an Randbedingungen, die die Ergebnisse beeinflussen, nur eingeschränkt und unter Einbezug weiterer Informationen möglich.

Keywords: Spezialtiefbau, Femmasse HEAT, Tiefgründungen, Integritätsprüfung, Hydratationswärme

Einführung und Zielsetzung

Weitestgehend allen Tiefgründungsarten im Spezialtiefbau ist gemein, dass diese im Verlaufe der Herstellung und auch danach nicht augenscheinlich hinsichtlich ihrer Ausführungsqualität untersucht werden können. Dies betrifft vor allem die Geometrie, die Lotreichtigkeit, die Betondeckung der Bewehrung und die Qualität des eingebauten Betons. Bleiben derartige

Fehlstellen (bspw. Entmischung des Betons oder Bodeneinschlüsse) unentdeckt oder werden ggf. nicht fachgerecht saniert, kann dies signifikante negative Auswirkungen auf die Tragfähigkeit sowie die Gebrauchstauglichkeit des hergestellten Bauteils haben.

In der Vergangenheit wurde zur Sicherstellung ausreichender Tragreserven oftmals auf eine Überdimensionierung der Bauteile gesetzt [1].

Aus umwelttechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten heraus wird heutzutage ein optimiertes Design und „schlankes“ Bauen von den verschiedenen Interessensvertretern am Bau bevorzugt.

Um weiterhin dem gestiegenen Sicherheitsbedürfnis von Bauherrn gerecht zu werden, kommen vermehrt sogenannte Integritätsprüfungen zum Einsatz [2]. Dabei handelt es sich um indirekte Aufschlussverfahren, die zu interpretierende Ergebnisse liefern, von denen aus Rückschlüsse auf die Integrität eines Bauteils gezogen werden können.

Ein mögliches Verfahren zur Prüfung der Integrität von Bohrpfählen ist das „Thermal Integrity Profiling“, welches auf der Messung der in der frühen Erhärtungsphase des Betons frei werdenden Hydratationswärme mittels Temperatursensoren basiert. Aus den sich über die Tiefe ergebenden Temperaturprofilen lassen sich so Aussagen über die Qualität des Pfahls ableiten.

Ziel der Arbeit ist es, den Einfluss von thermischen Anomalien hinsichtlich der Sensitivität des Thermal Integrity Profiling bei Bohrpfählen respektive der Aussagekraft dieses Verfahrens auf die gegebene Pfahlintegrität rechnerisch zu untersuchen. Dabei soll auch der Einfluss anderer Parameter wie beispielsweise der umgebende Boden und die Betonsorte quantifiziert werden. Die Berechnungen werden mit dem FE-Programm *Femmasse HEAT* durchgeführt.

Thermal Integrity Profiling (TIP)

Der als substanzieller Bestandteil im Beton enthaltene Zement setzt in der frühen Erhärtungsphase des Betons große Mengen an Energie um, welche in Form von Hydratationswärme mit einhergehenden Temperaturerhöhungen im noch jungen Bauteil auftreten. Das sogenannte „Thermal Integrity

Profiling“ (TIP) macht sich diesen Umstand zunutze, indem es die Temperaturen an diskreten, über die Länge und den Querschnitt eines Pfahls verteilten Punkten ggf. über einen bestimmten Zeitraum hinweg aufzeichnet.

Für die Temperaturmessung existieren derzeit drei unterschiedliche Verfahren. Es können einerseits Temperaturmesssonden (vgl. Abb. 1) zu einem oder mehreren ausgewählten Zeitpunkten in zuvor einbetonierten und über den Querschnitt verteilten Rohren eingeführt werden.



Abb. 1: Infrarottemperaturmesssonde [3]

Alternativ dazu können auch im Beton eingebettete, an der Bewehrung fixierte und damit „verlorene“ Temperatursensoren verwendet werden (vgl. Abb. 2). Das Messraster ist dabei initial vorgegeben, üblicherweise beträgt es rund 30 cm. Die dritte Möglichkeit und Gegenstand aktueller Forschungen ist die sogenannte faseroptische Temperaturmessung. Durch Nutzung von Lichtwellenleitern als lineare Messsensoren können hohe räumliche Messauflösungen (< 4 mm) erreicht werden [4].



Abb. 2: An Bewehrung befestigter Temperatursensor [5]

Die Grundannahme des TIP besteht darin, dass sich bei einem einwandfreien Bohrpfahl ein gleichmäßiger und ggf. aufgrund der Betoneinbringung leicht geneigter Temperaturverlauf über die Tiefe des Bauteils einstellt. Ist dies nicht der Fall und es ergeben sich Bereiche mit lokal reduzierten oder erhöhten Temperaturen, so kann von einer thermischen Anomalie ausgegangen werden, die es zu interpretieren gilt. Beispielsweise kann bei lokalen Temperaturreduzierungen eine Fehlstelle durch z. B. Bodeneinschlüsse in Betracht gezogen werden. Sinngemäß kann eine lokal erhöhte Temperatur ein Hinweis für eine Ausbauchung bzw. eine Vergrößerung des Querschnitts sein. Weiterhin werden Ansätze diskutiert, wie durch Einbezug anderer Herstellparameter (z. B. eingebrachter Betonmenge oder Steiggeschwindigkeit) die Geometrie des Bauteils nachgebildet werden kann.

Da es sich bei dem Thermal Integrity Profiling um ein indirektes Aufschlussverfahren handelt, kommt der Interpretation der Messergebnisse eine wesentliche Bedeutung zu. Basis der Bewertung ist meist eine sogenannte Referenztemperatur, d. h. die Temperatur, die über einen Pfahlabschnitt vorherrscht, bei dem davon ausgegangen werden kann, dass dieser einwandfrei ist. Ausgehend davon wird eine Temperaturabweichung relativ und absolut zu einzelnen Anomalien betrachtet. Weiterhin wird das Ausmaß, d. h. die Länge des von der Anomalie betroffenen Pfahlabschnitts beurteilt [6].

Modellentwicklung

Die numerische Untersuchung erfolgt im Rahmen der Masterarbeit mit dem zweidimensionalen FE-Programm *Femmasse HEAT*. Es wird einerseits ein Modell entwickelt, um das System Bohrpfahl in Boden realitätsnah abzubilden. Andererseits werden unterschiedliche Eingangsparameter recherchiert und erarbeitet. Für die Parameterstudie werden ein schnell härtender CEM I sowie ein sehr langsam reagierender

CEM III/A gewählt. Für den umgebenden Boden werden einerseits ein sehr wärmeleitfähiger wassergesättigter Sand und andererseits ein dämmender trockener Ton angesetzt. Durch die Wahl von Extremwerten bei den Eingangsparametern verstehen sich die Berechnungsergebnisse als Bandbreite, innerhalb der übliche Messergebnisse in der Praxis liegen können. Insgesamt werden drei Bohrpfahldurchmesser und vier Fehlstellengrößen untersucht.

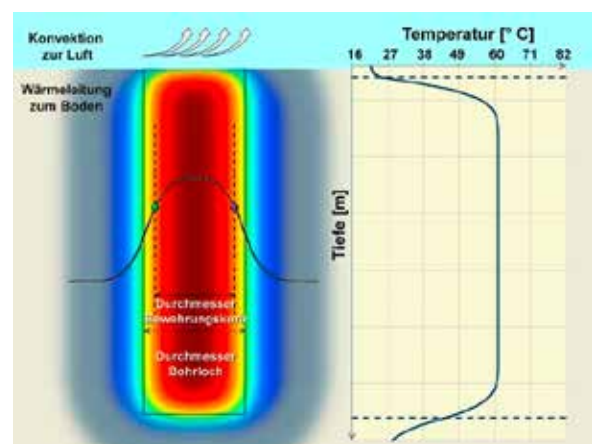


Abb. 3: Darstellung des Berechnungsmodells, schem. [7]

Ergebnisse

Aus den Berechnungen lassen sich im Wesentlichen die folgenden Erkenntnisse ableiten:

Bereits die Heterogenität des anstehenden Bodens und die damit variierenden wärmetechnischen Parameter der einzelnen Bodenschichten können zu signifikanten Temperaturunterschieden im Bereich von mehreren Kelvin führen.

Der sich bei einer gestaffelten Betoneinbringung bzw. aufgrund der Zeitabhängigkeit bei der Betonage einstellende Temperaturgradient ist sehr gering und messtechnisch kaum zu erfassen. Größere Differenzen sind nur bei sehr geringen Steiggeschwindigkeiten bzw. Unterbrechungen der Betonage zu erwarten.

Fehlstellen ab einer Größe von 300 x 300 mm im Schnitt lassen sich mit hinreichender Genauigkeit aus TIP-Ergebnissen differenzieren (vgl. Abb. 4). Oberflächliche Fehlstellen (d. h. 300 x 100 mm) sind nicht bzw. nur sehr schwer erfassbar bzw. zu differenzieren.

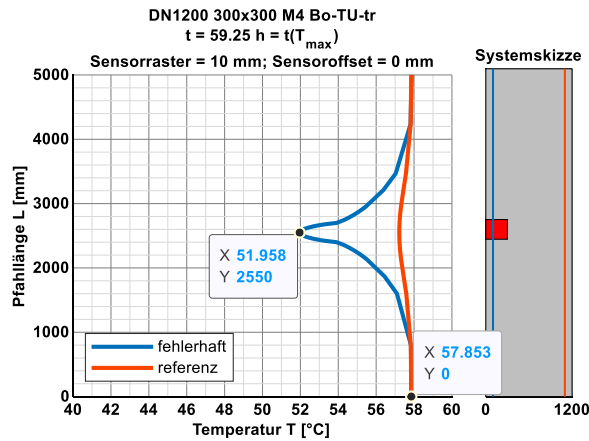


Abb. 4: Exemplarisches Temperaturprofil (DN1200, Fehlstelle 300 mm x 300 mm, sehr reaktiver Beton)

Fehlstellen gleicher Größe lassen sich bei kleineren Bohrpfahldurchmessern besser differenzieren als bei großen Durchmessern.

Wie in Abb. 5 deutlich zu erkennen ist, erzeugen Betone mit einer intensiven Hydratationswärmeentwicklung (M4) bezogen auf potenzielle Fehlstellen deutlich stärkere Temperaturdifferenzen als weniger reaktive Betonsorten (HW). Weiterhin ist die Temperaturdifferenz aufgrund von Fehlstellen vor dem Erreichen der Maximaltemperatur deutlich ausgeprägter.

Der umgebende Boden hat nur geringen Einfluss auf Temperaturdifferenzen, die sich aufgrund von Fehlstellen einstellen.

Die Unterlegung eines Sensorrasters führt dazu, dass insbesondere kleinere Fehlstellen deutlich schwieriger zu erkennen sind. Bei größeren Fehlstellen ist der Einfluss gering. Eine Reduktion des Rasters von 300 mm zu 500 mm führt nur zu unwesentlichen Differenzen.

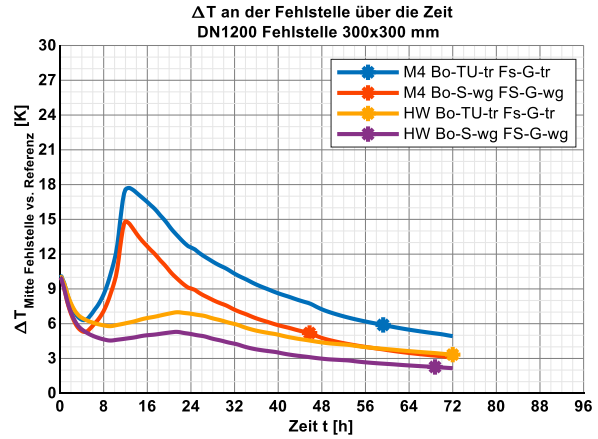


Abb. 5: Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen Fehlstelle und Referenztemperatur über die Zeit (DN1200, Fehlstelle 300 mm x 300 mm) Punkte = Erreichen d. Maximaltemperatur

Überlagerungseffekte bei Häufungen von Fehlstellen treten vor allem hinsichtlich des Ausmaßes auf. Die sich einstellenden Temperaturreduktionen aufgrund Überlagerung sind tendenziell eher gering.

Fazit

Das Thermal Integrity Profiling eignet sich grundsätzlich sehr gut, um die Integrität eines Pfahls zu beweisen, wenn keine thermischen Anomalien vorliegen. Umgekehrt können vorhandene Anomalien nicht grundsätzlich auf Fehlstellen zurückgeführt werden, da eine Vielzahl an Umgebungsbedingungen thermische Anomalien hervorrufen können. Insofern ist die Aufzeichnung möglichst vieler dieser Randbedingungen (bspw. Bodenprofil, Herstellprotokolle, Boden- u. Lufttemperaturen) unerlässlich, um eine Interpretation der Messergebnisse vorzunehmen.

Es empfiehlt sich zudem, die Messungen kontinuierlich über einen bestimmten Zeitraum und einem definierten Aufzeichnungsraster durchzuführen, da so die Erkennungsrate von Fehlstellen wesentlich verbessert werden kann.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte und für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [1]: Hartung, M. (1993) Qualitätssicherung bei der Pfahlherstellung in: Rodatz, W. [Hrsg.] Pfahl Symposium 1993. Braunschweig: Eigenverlag TU Braunschweig, S. 261–279.
- [2]: Beckhaus, K. (2020) Empfehlungen zur Bewertung von Integritätsprüfungen an tiefen Pfählen in: Stahlmann, J. [Hrsg.] Messen in der Geotechnik 2020. Braunschweig, S. 147–163.
- [3]: Mullins, G.; Winters, D. (2011) Infrared Thermal Integrity Testing: Quality Assurance Test Method to Detect Drilled Shaft Defects. <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/770.1.pdf> [Zugriff am: 28. Okt. 2020].
- [4]: Zhong, R.; Guo, R.; Deng, W. (2018) Optical-Fiber-Based Smart Concrete Thermal Integrity Profiling: An Example of Concrete Shaft in: Advances in Materials Science and Engineering 2018, S. 1–8. <https://doi.org/10.1155/2018/9290306>
- [5]: Klingmüller, O.; Mayer, C.; Schallert, M. (2016) Thermal Integrity Profiling - ein neues Verfahren zur Integritätsprüfung von Ortbetonpfählen.
- [6]: Moormann, C. (2020) Jahresbericht 2019 des Arbeitskreises „Pfähle“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) in: Bautechnik 97, H. 2, S. 133–149. <https://doi.org/10.1002/bate.202000002>
- [7]: Mullins, G. Thermal Integrity Profiling of Concrete Deep Foundations <https://slideplayer.com/slide/14283080/> [Zugriff am: 16. Nov. 2020].

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Arbeitsgruppe "Beton" der EFFC und DFI (2018) Leitfaden über Kontraktorbeton für Tiefgründungen. 2. Aufl. https://www.bauindustrie.de/media/documents/2018-09-28_DAS_TremieGuide-DE_V1.1s.pdf [Zugriff am: 9. Nov. 2020].
2. Kempfert, H.-G. [Hrsg.] (2012) Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle" – EA-Pfähle. 2. Aufl. Berlin: Ernst.
3. Witt, K. J. [Hrsg.] (2018) Grundbau-Taschenbuch – Teil 2: Geotechnische Verfahren. 8. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn.
4. Röhling, S. (2009) Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme. 2. Aufl. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik.

Autor

Michael Lehle, M. Eng.

seit 2021 Bauleiter, Implenia Spezialtiefbau GmbH, München

2014 – 2021 Studium des Bauingenieurwesens an der Hochschule München

Betreuer

Die Arbeit wurde am Lehrstuhl für Baustoffkunde der Hochschule für angewandte Wissenschaften München angefertigt und von Herrn Prof. Dr.-Ing. Thorsten Stengel betreut.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ENTWICKLUNG EINER ZUVERLÄSSIGEN METHODE ZUR NACHTRÄGLICHEN PUTZMÖRTELGRUPPENBESTIMMUNG ANHAND DER CHEMISCHEN ZUSAMMENSETZUNG

Masterarbeit

Marcus Lindner

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob unbekannte Putzproben durch eine chemische Analyse einer Putzgruppe zugeordnet werden können. Dazu werden Bindemittel und Gesteinskörnungen sowie Putzmörtel analysiert. Grundlage dieser Arbeit ist die Zusammensetzung von Putzen nach DIN 18550-2:1985-01. [1] Im ersten Schritt werden chemische Analysedaten der Bindemittel und Gesteinskörnungen durch Anfragen bei der Baustoffindustrie und durch Verwendung verschiedener Literaturquellen zusammengetragen. Aus diesen Bandbreiten der jeweiligen Edukte können die chemischen Erwartungswerte der einzelnen Putzgruppen errechnet werden. Genauer betrachtet werden dabei die Elemente Eisenoxid (Fe_2O_3), Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Sulfat (SO_3). Im Weiteren werden Putzmörtel mit definierter Zusammensetzung hergestellt und an einen Probekörper aufgetragen. Nach der Erhärtungszeit werden davon Proben entnommen und chemisch analysiert. Anschließend erfolgt ein Vergleich der dabei erhaltenen Messergebnisse mit den zuvor aufgestellten Erwartungswerten. Dabei konnte festgestellt werden, dass eine Zuordnung der Putze unter bestimmten Rahmenbedingungen möglich ist. Aufgrund der großen Vielfalt der möglichen Edukte sind jedoch Einschränkungen nötig, um eine Putzgruppenbestimmung zu ermöglichen. Diese Arbeit beschränkt sich deswegen auf die Bindemittel Kalkhydrat, Kalkteig, Putz- und Mauerbinder, Portlandzement, Stuckgips und Putzgips.

Keywords: Putz, Putzmörtel, chemische Analyse, Festmörtelanalyse, Putzgruppenbestimmung

Einführung

Bei Sanierungs- und Restaurierungsarbeiten stoßen Planer und Bauherrn oft auf Putze, deren

Beschaffenheit und Zusammensetzung unbekannt ist. Zur Bestimmung von Putzgruppen sind bis dato keine genormten Verfahren vorhanden. Auch in der Literatur sind hierfür keine Methoden

zu finden. Am cbm (Centrum für Baustoffe und Materialprüfung der Technischen Universität München) werden Putzgruppen bisher nur über den Sulfatgehalt abgeschätzt.

Viele bekannte Analysen beschäftigen sich mit der Identifizierung und Quantifizierung von Zement in Betonen, so auch die Festbetonanalyse nach DIN 52170-2-4:1980-02. [2] Abhängig von der Salzsäurelöslichkeit des Zuschlags kann damit unter Umständen der Zementgehalt bestimmt werden. Weitere für Putze ebenso relevante Bindemittel, wie Kalk und Gips werden bei dieser Methode nicht berücksichtigt. Somit ist sie für die Untersuchung von Putzmörteln ungeeignet.

Eine Klassifizierung der vorhandenen Putze ist sowohl für Planer als auch für Bauunternehmen von großem Interesse, um eine wirtschaftliche Sanierung bzw. Umnutzung von Bestandsgebäuden durchführen zu können. Zum einen können Putzschichten brandschutztechnische Aufgaben übernehmen (Erhöhung der Betondeckung von Bewehrungsstäben etc.) und zum anderen ist die Beschaffenheit der Putze relevant für eine korrekte Planung von Sanierungsarbeiten. Unverträglichkeiten beim Überarbeiten vorhandener Putzflächen können durch eine konkrete Bestimmung der Putzgruppe bzw. der Zusammensetzung vermieden werden. Außerdem können durch eine Bestimmung von Putzgruppen bestehende Putzschichten oftmals erhalten werden, da diese den neuen Anforderungen entsprechen. Auf eine aufwendige und kostspielige Erneuerung von Putzen kann dadurch gegebenenfalls verzichtet werden. Somit ist die nachträgliche Bestimmung alter Putzproben eine Aufgabenstellung, welche in der Praxis beim Bauen im Bestand stets von großer Bedeutung ist.

Als Grundlage zur Bestimmung der Putzgruppen dienen die in der DIN 18550-2:1985-01 angegebenen Zusammensetzungen.

Methode

Es wird untersucht, ob unbekannte Putzproben durch eine chemische Analyse einer Putzgruppe zugeordnet werden können. Dazu werden Bindemittel und Gesteinskörnungen sowie Putzmörtel analysiert.

Im ersten Schritt werden chemische Analysedaten der Bindemittel und Gesteinskörnungen durch Anfragen bei der Baustoffindustrie und durch Verwendung verschiedener Literaturquellen zusammengetragen. Aus diesen Bandbreiten der jeweiligen Edukte können die chemischen Erwartungswerte der einzelnen Putzgruppen errechnet werden. Genauer betrachtet werden dabei die Elemente Eisenoxid (Fe_2O_3), Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Sulfat (SO_3).

Im Weiteren werden Putzmörtel mit definierter Zusammensetzung hergestellt und an einen Probekörper aufgetragen. Nach der Erhärtungszeit werden davon Proben entnommen und chemisch analysiert. Anschließend erfolgt ein Vergleich der dabei erhaltenen Messergebnisse mit den zuvor aufgestellten Erwartungswerten.



Abb. 1: Beispiel eines Probekörpers mit entnommener Probe

Ergebnisse

Ähnlich wie bei den bisherigen Analysen am cbm ist der Sulfatgehalt für die hier erarbeitete Methode ein entscheidender Parameter. Dennoch zeigte sich in der Vergangenheit, dass durch den Sulfatgehalt als einzigen Indikator eine

Putzgruppe nicht immer eindeutig bestimmbar ist. Deshalb werden für diese Arbeit weitere Messgrößen berücksichtigt. Die Bestimmung von Putzgruppen kann entsprechend dem folgenden Flussdiagramm erfolgen. Mit dieser Methode ist es möglich, dass mehrere Putzgruppen, beispielsweise PII und PIII, als Ergebnis genannt werden müssen. Auch eine Unterscheidung der

Untergruppen von PIV ist nicht immer eindeutig möglich.

Das Ergebnis kann somit durch die Angabe von zwei Putzgruppen erfolgen. Sollte diese Unschärfe unzureichend für die jeweiligen Anforderungen sein, sind weitere Untersuchungen notwendig.

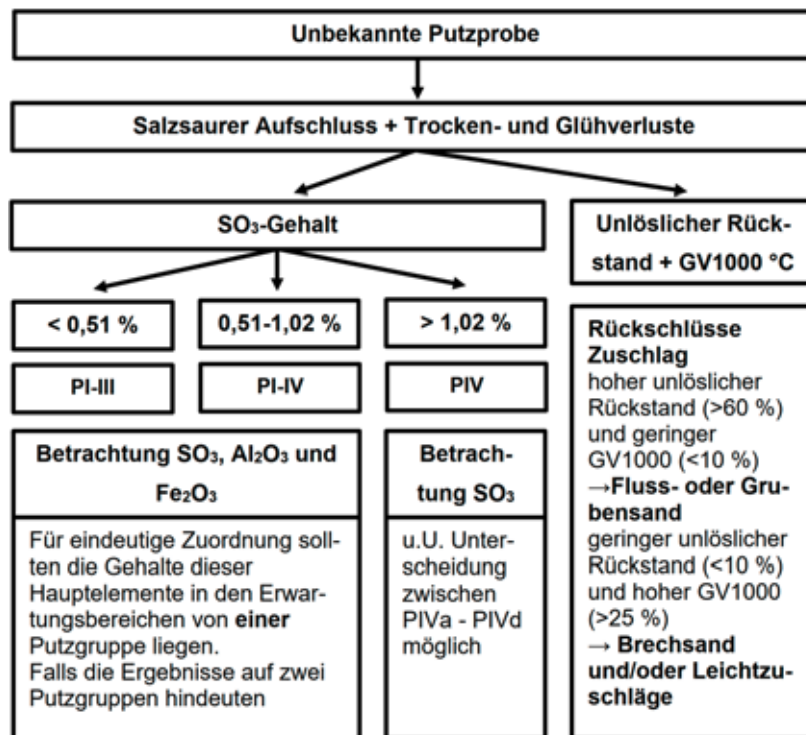


Abb. 2: Flussdiagramm Vorgehensweise Putzgruppenbestimmung

Aufgrund der großen Vielfalt an verwendeten Putzmörteln und möglichen Edukten, können die Bandbreiten in der chemischen Zusammensetzung der Putzgruppen sehr groß ausfallen. Aus diesem Grund ist es möglich, dass die Putzgruppe nicht eindeutig bestimmt werden kann. Auch eine Unterscheidung der Untergruppen ist oftmals nicht möglich, da sich die Bereiche sehr ähneln. Die Untergruppen sind jedoch zumeist irrelevant in Hinblick auf den Brandschutz und möglicher Sanierungsmaßnahmen. Da die Gesteinskörnungen, bezogen auf das System Putzmörtel, den größten Anteil ausmachen, kann die große verfügbare Diversität von Gruben-, Fluss- und Brechsanden einzelne Parameter, beispielsweise den Eisenoxidgehalt, stark verzerren. Fallen einzelne Messergebnisse

aus den erwarteten Wertebereichen, können diese für eine Bestimmung der Putzgruppe nicht mehr herangezogen werden. Dennoch ist eine Bestimmung von Putzmörteln, mit Gesteinskörnungen entsprechend der getroffenen Annahmen, durch diese Methode zielführend.

Schwieriger ist die Bestimmung bei neuartigen Werk trockenmörteln. Diese werden bezüglich der erforderlichen Eigenschaften zusammengesetzt. Das Verfahren der chemischen Analyse hängt jedoch stark von der Zusammensetzung der Putze ab. Beispielsweise wird ein Werk trockenmörtel vom Hersteller in PI der ehemaligen Putzgruppen eingeordnet. Die chemische Analyse zeigt folglich große Anteile an Aluminium und Eisenoxid, welche weit außerhalb

des Erwartungsbereichs liegen. Grund dafür ist die Verwendung von hochhydraulischen Kalken bei der Herstellung, welche nach DIN18550-2:1985-01 [1] für die Putzmörtelgruppe I nicht vorgesehen sind. Dennoch beziehen sich die Anfragen zur Putzgruppenbestimmung zumeist auf ältere, vermutlich traditionell auf der Baustelle angemischte Putze. Bei neueren Bauwerken, welche mit Werkrockenmörteln verputzt sind, liegen oft bessere Dokumentationen über den

verwendeten Putz vor, was eine nachträgliche Bestimmung hinfällig macht.

Zusammenfassend können Putze, welche nach DIN18550-2:1985-01 [1] hergestellt wurden, meist gut bestimmt werden. Bei der Analyse von neuen Werkrockenmörteln stößt diese Methode jedoch an ihre Grenzen. Im Folgenden sind die Ergebnisse von vier hergestellten Mörteln der Mörtelgruppe III dargestellt, welche eindeutig bestimmt werden können.

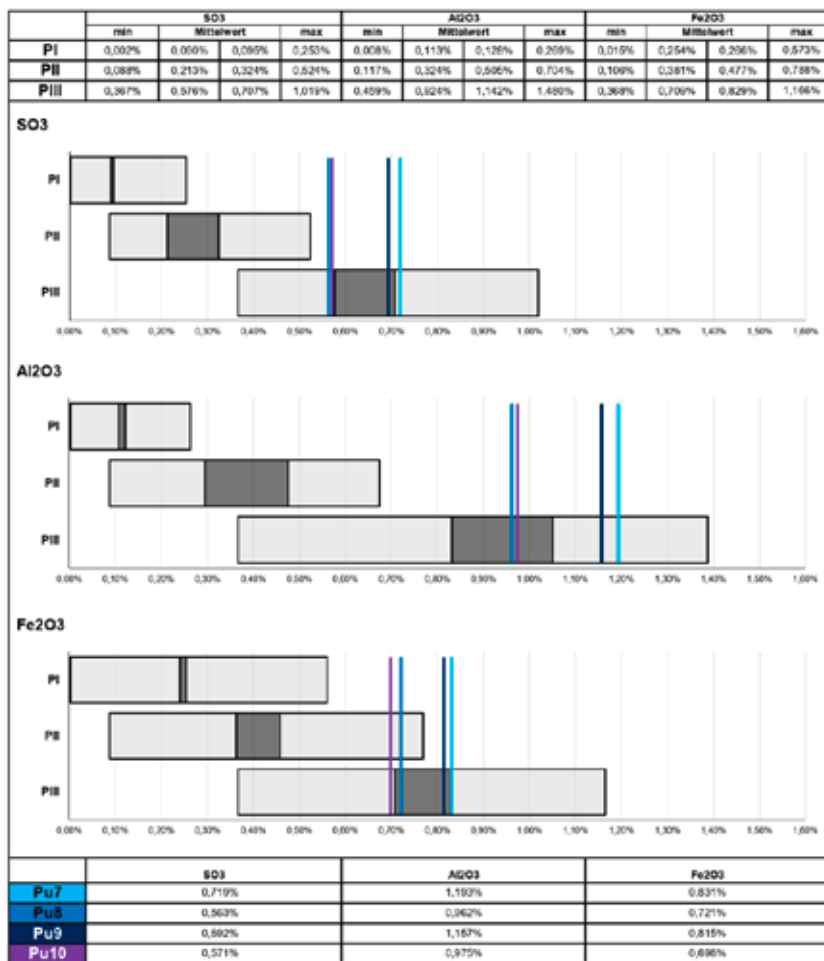


Abb. 3: Mörtelproben der Gruppe III mit Darstellung der chemischen Erwartungswerte der Putzgruppen I-III

Fazit und Ausblick

Sollte die Putzgruppenbestimmung durch chemische Analyse keine eindeutigen Ergebnisse liefern, könnten noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Weiterführend könnte beispielsweise die mineralogische Zusammensetzung des Putzes mittels XRD (X-Ray

Diffraction) bestimmt werden. Dadurch könnten durch den Nachweis von Zementhydratphasen Rückschlüsse auf das Vorhandensein des Bindemittels Zement gezogen werden. Eine weitere Möglichkeit zur genaueren Einteilung ist eine Druckfestigkeitsprüfung.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: DIN e.V. (Hrsg.) (DIN 18550-2:1985-01, 1985): DIN 18550-2:1985-01, Putz; Putze aus Mörteln mit mineralischen Bindemitteln, Teil 2: Ausführung, Beuth-Verlag, Berlin, 1985.
- [2]. DIN e.V. (Hrsg.) (DIN 5217-2-4:1980-02, 1980): DIN 52170-2-4:1980-02, Bestimmung der Zusammensetzung von erhärtetem Beton, Teil 2-4, Beuth-Verlag, Berlin, 1980.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. DIN 18550-2:1985-01 Putz; Putze aus Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Ausführung

Autor

Marcus Lindner (B.Eng.)

Bildungsweg:

seit 10/2017	Masterstudium Bauingenieurwesen (Note: 1,9) Technische Universität München
10/2013-09/2017	Bachelorstudium (Dual) Bauingenieurwesen (Note: 1,3) Hochschule München
08/2013-07/2016	Ausbildung zum Maurer (Note: sehr gut) Ed. Züblin AG, Direktion Bayern in München
09/2011-07/2013	Fachgebundene Hochschulreife Fachoberschule Ingolstadt

Berufserfahrung

seit 08/2016	Werkstudent Firma Lindner Bau GmbH
--------------	------------------------------------

Auszeichnungen:

10/2016	Bester Berufsabschluss 2016 in Oberbayern. IHK für München und Oberbayern
04/2018	1. Preis für die beste Gesamtnote der Bachelor-Absolventen. Professor Georg Nemetschek-Stiftung
04/2018	Joseph Rank Preis für eine Bachelorarbeit auf dem Gebiet des Humanen und Umweltgerechten Bauens

Prüfer/Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München.

Prüfer: Dr. rer. nat. Harald Hilbig

Betreuer: M.Sc. Marco Decker

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

EXPERIMENTELLE KLEINVERSUCHE AN PLANHOCHLOCH-ZIEGELN UND ZIEGELSCHERBEN MITTELS OPTISCHER 3D-MESSTECHNIK

Masterarbeit

Nathalie Niesser, Rebecca Baum

Aufgrund des spröden und anisotropen Materialverhaltens von Planziegelmauerwerk kann mit konventioneller Messtechnik das komplexe Last-Verformungs-Verhalten oft nicht ausreichend genau erfasst werden. Im Gegensatz hierzu bieten 3D-Analysen mittels digitaler Bildkorrelation die Möglichkeit, das Last-Verformungs-Verhalten des Probekörpers als Flächenkomponente abzubilden, wodurch detailliertere Aussagen über das Materialverhalten von Planziegelmauerwerk, insbesondere des Ziegelscherbens ermöglicht werden. Letzteres wurde im Zuge dieser Masterarbeit auf Grundlage experimenteller Versuche an Ziegelscherben untersucht. Dabei wurden sowohl Druck- als auch Biegezugversuche an Scherbenelementen eines Planhochlochziegels mittels optischer 3D-Messtechnik durchgeführt. Ziel war es, die wesentlichen Festigkeitseigenschaften und das Last-Verformungs-Verhalten des Ziegelscherbens zu charakterisieren. Zudem sollten die Untersuchungsergebnisse in Form der einaxialen Arbeitslinie ausgewertet und mittels einer Ansatzfunktion approximiert werden.

Keywords: anisotropes Ziegelmaterial, 3D-Messtechnik, digitale Bildkorrelation, Druck- und Biegezugversuche, Planhochlochziegel, Elastizitätsmodul, Querdehnzahl

Grundlagen der optischen 3D-Messtechnik

Das optische Messsystem arbeitet auf Basis der Wellenlängen des sichtbaren Lichts. Dadurch sind schnelle Messungen mit einer hohen Messpunktdichte, ohne rückwirkende Beeinflussungen von elektromagnetischen Feldern oder akustischen Wellen, möglich [1]. Im Wesentlichen besteht das optische Messsystem

für 3D-Messungen aus mehreren Hochgeschwindigkeitskameras, einer Beleuchtungseinheit und einer Steuerungs- bzw. Auswerteeinheit. Standardmäßig wird für die Beleuchtungseinheit ein kurzwelliges blaues Licht verwendet, welches stärker zu Reflexionen neigt und Flächen wesentlich sichtbarer erscheinen lässt (siehe Abb. 1) [2].

Damit das System eventuelle Abbildungsfehler erkennen kann, ist einerseits eine Kalibrierung der Kameras mithilfe von Kalibrierplatten (Siemens-

stern, Punktgitter, Graukarte), andererseits ein ständiger Vergleich zwischen dem Kamerabild und einem vorher definierten Muster in der Objektebene erforderlich ([3, 4, 5]). Zudem muss vor Messbeginn auf die Oberfläche des Prüfkörpers ein stochastisches Punktemuster aufgebracht werden, das bspw. durch Besprühen mittels eines weißen Lacks erfolgen kann (siehe Abb. 1).

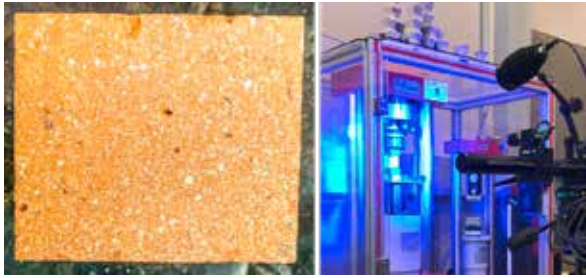


Abb. 1: Versuchsdurchführung der Druckfestigkeitsuntersuchungen eines Ziegelelements mit 40x40 mm

Die Zuordnung von Bildpunkten erfolgt auf der Basis von Grauwerten (rasterorientierten Informationen) [6]. Das System bestimmt anschließend mittels des Triangulationsverfahrens die Grauwertverteilungen für tausende Teilbereiche eines jeden Kamerabildes. Die Software wertet hierbei die erfassten Bilddaten über die digitale Bildkorrelation im unverformten und verformten Zustand des Prüfkörpers aus [2]. Somit können Verschiebungen und Oberflächendehnungen über den gesamten Prüfzeitraum analysiert werden [7]. Folglich werden subpixelgenaue Positionen der korrespondierenden Messpunkte in allen Bildern ausgewertet und die zugehörigen 3D-Koordinaten berechnet [7].

Danach werden anhand von mathematischen Verfahren wie der Kreuzkorrelation die Verschiebungen einzelner Punkte innerhalb der erzeugten Matrix aus Grauwerten durch eine automatische Bildzuordnung erfasst. Dadurch können Rückschlüsse auf die Ähnlichkeit der Messsignale zwischen Ursprungsbezugsbild und Verformungszustand geschlossen werden [2]. Als Ergebnisdarstellung entsteht ein digitales Oberflächenmodell des Prüfkörpers mit einer entsprechenden Fehlfarbandarstellung (siehe Abb. 2).

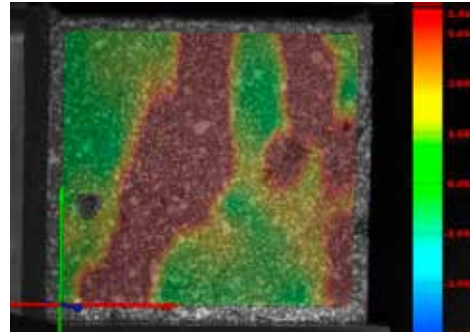


Abb. 2: Darstellung der Hauptformänderung eines Ziegelelements während eines Druckversuches als Fehlfarben

Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Mauerwerk

Damit das einaxiale Materialverhalten von Mauerwerk mathematisch simuliert werden kann, wurde ein spezieller Spannungs-Dehnungsansatz von *Jäger et al.* [8] auf Basis von physikalischen Kennwerten (Mauerwerksdruckfestigkeit f , zugehörige Dehnung ε_f) und mathematischen Parametern konzipiert (Gl. (1)).

$$\sigma = f \left(c \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} - (c - 1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right)^n \right) \quad (1)$$

Hierbei kann der Parameter $c \geq 1$ als Maß für die Steifigkeitsvariation interpretiert werden. Der Exponent $n < 1$ bzw. $n \leq c/(c - 1)$ stellt eine Nichtlinearität dar und kann als ein Maß für die Duktilität angesehen werden, wenn die Neigung der Spannungs-Dehnungslinie im Punkt $(f | \varepsilon_f)$ gleich null ist [8].

Vorteil dieser Funktion ist, dass sowohl ein rein elastisches als auch quasi-duktilen Materialverhalten abbildbar und zugleich mathematisch geschlossen integrierbar ist [8]. Beispielhaft ist in Abb. 3 der Spannungs-Dehnungsverlauf für lineares ($c = 1$) sowie nichtlineares (quasi-duktilen) Materialverhalten ($c, n = 2$) dargestellt.

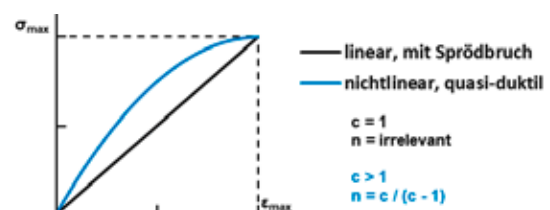


Abb. 3: Formen der einaxialen Arbeitslinie von Mauerwerk [8]

Experimentelle Untersuchungen an Ziegelementen

Ziel der Versuche ist die Charakterisierung der wesentlichen Materialeigenschaften der Ziegelscherben (wie bspw. Elastizitätsmodul, Querdehnzahl und Spannungs-Dehnungs-Linie) mittels digitaler Bildkorrelation. Hierfür wurden für die Druckversuche in Abhängigkeit der Strangpressrichtung Scherbenelemente mit der Größe 40 x 40 mm aus Planhochlochziegeln mit unterschiedlichen Festigkeitsklassen (SFK 6 und SFK 10) herausgeschnitten (siehe Abb. 4). Als Prüfkörper für die Biegezugversuche wurden in Anlehnung an [9] Scherben aus denselben Ziegeln wie bei den Druckversuchen mit einer Abmessung von 40 x 160 mm zugeschnitten (siehe Abb. 5).

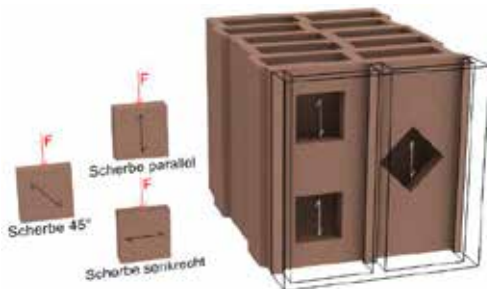


Abb. 4: Lage der Scherbenelemente der Druckfestigkeitsversuche

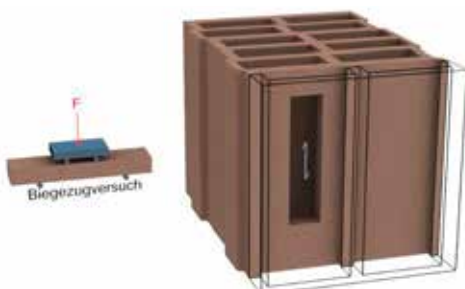


Abb. 5: Lage der Scherbenelemente der Biegezugversuche

Biegezugversuche

Neben der Biegezugfestigkeit soll durch die Biegezugversuche auch der Elastizitätsmodul des Scherbens bestimmt werden. Dabei wurden zwölf Ziegelscherben getestet, welche als Vierpunktbiegeversuch gleichmäßig in den Drittelpunkten belastet wurden.

Da eine Proportionalität der Krümmung (κ) des Biegebalkens zur vorhandenen Biegesteifigkeit des Balkenquerschnitts (EI) besteht, kann die Krümmung und das Biegemoment durch die Biegesteifigkeit miteinander verknüpft werden. Somit kann durch die Krümmung die Gl. (2) zur Berechnung des Elastizitätsmoduls aufgestellt werden [10]:

$$\kappa = \frac{M}{EI} \text{ bzw. } E = \frac{M}{\kappa I} \quad (2)$$

Die Krümmung in Gl. (2) lässt sich unter Annahme vom Ebenbleiben des Querschnitts (Bernoulli-Hypothese) über den Betrag der max. Stauchung ε^- und max. Dehnung ε^+ in Relation zur Höhe des Balkens h ermitteln (Gl. (3)).

$$\kappa = \frac{|\varepsilon^-| + \varepsilon^+}{h} \quad (3)$$

Da der Elastizitätsmodul sich auch über die Differenzierung einer Ausgleichsgerade im linearen Bereich ermitteln lässt, wurde eine Plausibilitätsprüfung der über die Krümmung bestimmten Elastizitätsmoduln durchgeführt (siehe Abb. 6). Dabei konnte festgestellt werden, dass diese nahezu deckungsgleich sind und eine maximale Abweichung von 3,8% aufwiesen.

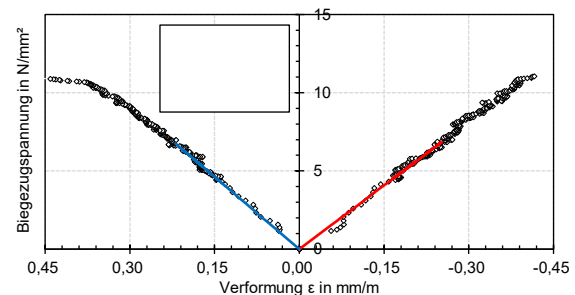


Abb. 6: Darstellung der Messergebnisse des Biegezugversuchs eines Probekörpers

Druckfestigkeitsversuche

Aufgrund des anisotropen Materialverhaltens wurden die Druckversuche in die drei unterschiedlichen Prüfrichtungen senkrecht, parallel und um 45° gedreht zur Strangrichtung (siehe Abb. 5) durchgeführt. Um die Spannungs-Dehnungsverläufe der Druckversuche realitätsnah beschreiben

zu können, wurden - mithilfe von numerischen Approximationen an die Messdaten - die Materialparameter wie Elastizitätsmodul und Querdehnzahl ermittelt.

Voraussetzung für den Ansatz nach *Jäger et al [8]* ist ein linear-proportionales Verhalten der Messdaten, bei denen der Ursprung der Funktion stets bei (0|0) liegt. Um den Steigungsverlauf der Ansatzfunktion jedoch bestmöglich in einem begrenzt auszuwertenden Bereich der Messungen zu charakterisieren, wurde die Funktion durch einen variablen Startwert σ_{min_Var} und ε_{min_Var} erweitert (Gl. (4)).

$$\sigma = f \left(c \frac{\varepsilon - \varepsilon_{min_Var}}{\varepsilon_f} - (c - 1) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{min_Var}}{\varepsilon_f} \right)^n \right) + \sigma_{min_Var} \quad (4)$$

Durch die zusätzlichen Parameter nähert sich die Funktion bis zu einer maximalen Spannung an die Messdaten an und extrapoliert dabei den Verlauf der Funktion, der nicht durch Messungen beschrieben wird (siehe Abb. 7, schwarzer Graph).

Die Bestimmung des E-Moduls erfolgte durch mathematisches Differenzieren der approximierten Spannungs-Stauchungslinie (siehe Abb. 7, roter Graph).

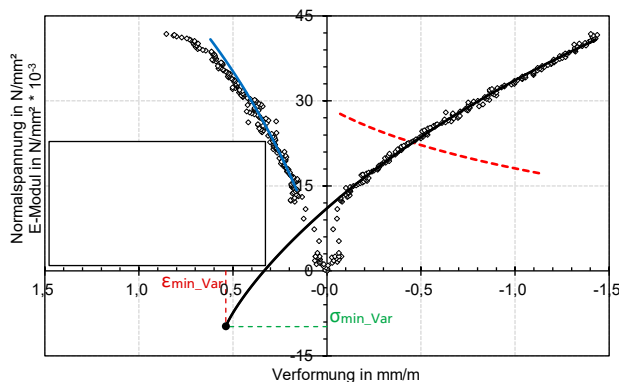


Abb. 7: Approximation eines Ziegelements

Es wurde ebenfalls untersucht, inwiefern eine Ermittlung der Dehnung über die approximierte Arbeitslinie möglich ist, um einen Rückschluss auf die Querdehnzahl ziehen zu können. Dazu wurden die ermittelten Ansatzfunktionen nach der Stauchung $\varepsilon_{Stauchung}(\sigma)$ aufgelöst und über den Faktor der Querdehnzahl ν an die Dehnung

$\varepsilon_{Dehnung}(\varepsilon_{Stauchung})$ der Spannungs-Dehnungslinie angenähert. Diese berücksichtigt durch eine zusätzliche Variable $\varepsilon_{Dehnung_Var}$, dass nicht von einem linear-proportionalen Materialverhalten im Anfangsbereich der Messungen ausgegangen werden konnte (Gl. (5), Abb. 7, blauer Graph).

$$\varepsilon_{Dehnung}(\sigma \varepsilon_{Stauchung}) = \varepsilon_{Stauchung}(\sigma) \nu + \varepsilon_{Dehnung_Var} \quad (5)$$

Zusammenfassung

In den durchgeführten experimentellen Untersuchungen dieser Masterarbeit konnten durch den Einsatz der digitalen Bildkorrelation grundlegende Erkenntnisse über das Materialverhalten der entsprechenden Ziegelscherben gewonnen werden. Dabei wurde bei den Druckversuchen - mithilfe von Approximationen an die Messdaten - die Materialparameter wie Elastizitätsmodul und Querdehnzahl ermittelt. Entsprechend der Reihenfolge der Druckfestigkeiten der Laststellungen des Planziegels der SFK 6 bzw. 10 (senkrecht = 21,62 N/mm² bzw. 36,43 N/mm², parallel = 11,73 N/mm² bzw. 20,20 N/mm², 45° geneigt zur Strangrichtung = 16,07 N/mm² bzw. 28,91 N/mm²), sind diese auf die Größen der Elastizitätsmoduln übertragbar. Es kann dabei festgehalten werden, dass die Elastizitätsmoduln aus den Biegezugversuchen und aus den Druckversuchen mit der maßgebenden Prüfrichtung senkrecht zur Strangrichtung vergleichbare Werte mit einer maximalen Abweichung von 14 % ergeben. Durch die Arbeit konnte gezeigt werden, dass mittels digitaler Bildkorrelation die wesentlichen Materialeigenschaften auf Mesoebene, d.h. des Ziegelscherbens, bestimmt werden können. Diese können bspw. als Eingangsgrößen für Finite-Elemente-Analysen herangezogen werden, womit vorhandene Tragreserven des Planziegelmauerwerks besser erfasst werden können. Auf diese Weise wäre eine wirtschaftlichere Ausnutzung des Baustoffs *Planziegel* möglich, was zum einen die Anwendung dieser Bauweise stärkt und zum anderen mittelständische Unternehmen (v.a. Ziegelhersteller) und somit das Baugewerbe fördert.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Ekbert Hering, Rolf Martin. Optik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Grundlagen und Anwendungen: mit zahlreichen Bildern, Tabellen, Beispielen. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2017.
- [2] Wassili Schuth, Michael Buerakov. Handbuch optische Messtechnik: Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung. Hanser, München, 2017.
- [3] Janek Möller. Entwicklung eines Prüf- und Messstandes für die Kalibrierung optischer Systeme. Hochschule München, 2017.
- [4] GOM GmbH. ARAMIS v6 Benutzerhandbuch - Software. GOM GmbH, Braunschweig, 2020.
- [5] Ulrich Schmidt. Professionelle Videotechnik: Analoge und digitale Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehetechnik, HDTV, Kameras, Displays, Videorecorder, Produktion und Studiotechnik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 4., aktualisierte und erweiterte Auflage, 2005.
- [6] Folke Santel. Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Erstellung von Oberflächenmodellen für Bodenerosionsversuche. Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, 2001.
- [7] InfraTec GmbH. Kombination von digitaler Bildkorrelation und Thermografiemessung. Technologie Zentrum Dresden GmbH, Dresden, 2020.
- [8] Wolfram Jäger, Todor Vassilev. Ein neues Materialgesetz zur wirklichkeitsnahen Beschreibung des Baustoffverhaltens von Mauerwerk. Universität Dresden, Lehrstuhl für Tragwerksplanung, o.J.
- [9] DIN EN 1015-11:2020-01: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel, deutsche Fassung EN 1015-11:2019
- [10] P. Knödel. Elastizitätslehre - Biegebalken. Fachhochschule Augsburg, 2013.
- [11] Helmut Naumann, G. Schröder, Martin Löffler-Mang. Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik. Hanser, s.l., 7., vollständig überarb. u. erw. Aufl. edition, 2014.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Jürgen Beyerer, Fernando Puente León, and Christian Frese. Automatische Sichtprüfung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
2. GOM GmbH. GOM Materialprüfung. GOM GmbH, Braunschweig, 2020.
3. Christoph Skotarek. Optische Verformungsmessung an heterogenen Werkstoffsystemen. Universität Kassel, 2020.
4. Christian Glock. Traglast unbewehrter Beton- und Mauerwerkswände: Nichtlineares Berechnungsmodell und konsistentes Bemessungskonzept für schlanke Wände unter Druckbeanspruchung. Technische Universität Darmstadt, 2004.
5. Jäger und Marzahn. Mauerwerk: Bemessung nach DIN 1053-100. Bauingenieur-Praxis. Ernst & Sohn, Berlin, 2010.
6. Thomas Bethmann, Folkmar Luhmann. Kleinste-Quadrate-Zuordnung mit erweiterten geometrischen Transformationen. Organ der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V, 2011.
7. Roland Greule. Licht und Beleuchtung im Medienbereich. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2015.
8. Lothar Papula. Mathematische Formelsammlung: Für Ingenieure und Naturwissenschaftler mit zahlreichen Rechenbeispielen und einer ausführlichen Integraltafel. Springer Vieweg, Wiesbaden, 11., überarb. Aufl., 2014.

9. Esra Bas. Einführung in Wahrscheinlichkeitsrechnung, Statistik und Stochastische Prozesse. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020.
10. Wolfram Jäger. Mauerwerk Kalender 2017: Befestigungen, Lehmmauerwerk. Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2017.
11. Sabine Freyburg. Instandsetzung von Ziegelmauerwerk: Schadensbilder und Ursachen - Anforderungen an Sanierziegel. Bauhaus-Universität Weimar, 2012.

Autoren:

Nathalie Niesser (geb.: 27.08.1994)

04/2019 – Heute **Studium Master Bauingenieurwesen - 4. Semester**
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Angestrebter Abschluss: Master of Engineering

03/2014 – 09/2019 **Studium Bachelor Bauingenieurwesen**
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Abschluss: Bachelor of Engineering

Rebecca Baum (geb.: 08.08.1995)

10/2019 – Heute **Studium Master Bauingenieurwesen - 3. Semester**
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Angestrebter Abschluss: Master of Engineering

03/2019 – 09/2019 **Studium Master Bauingenieurwesen - 1. Semester**
Technische Hochschule Nürnberg
Angestrebter Abschluss: Master of Engineering

10/2015 – 03/2019 **Studium Bachelor Bauingenieurwesen**
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Abschluss: Bachelor of Engineering

Betreuer

Die Arbeit wurde im Labor für konstruktiven Ingenieurbau (KIB) der OTH-Regensburg angefertigt.

Laborleiter: Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer

Betreuer im Labor: Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer, Jonathan Schmalz M.Eng.

Die Arbeit wurde mit Teilnahmeurkunden ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNGEN ZUM EINSATZ VON RECYCLINGBETONMEHL ALS FÜLLER, REAKTIVER BETONZUSATZSTOFF ODER BINDER MIT DEM ZIEL DER ZEMENTREDUKTION

Masterarbeit

Florian Parhofer

Nachhaltigkeit gewinnt im Baugewerbe zunehmend an Bedeutung und die konventionelle Zementproduktion, einer der klimaschädlichsten Industriezweige Deutschlands, wird immer kritischer betrachtet. Ziel dieser Arbeit ist es, den Zementanteil im Beton durch eine Substitution mit sehr fein aufgemahlene ($< 63 \mu\text{m}$) rezyklierten Betonmehl (RC-Mehl) zu verringern und somit CO_2 Emissionen aus der Klinkerproduktion einzusparen, ohne dabei die Betonqualität zu verringern. Hierbei wird der Einfluss des RC-Mehls als Füller und Betonzusatzstoff erforscht. Bei praktischen Versuchen an Mörtelprismen werden die Füllereigenschaften von RC-Mehl, eine Zementsubstitution und eine mögliche Reaktivierung des RC-Mehls beleuchtet. Um die praktischen Ergebnisse zu unterlegen wird das RC-Mehl zudem mit physikalischen Laborverfahren analysiert.

Es zeigt sich, dass RC-Mehl vergleichbare Füllereigenschaften wie Kalkstein oder Quarzmehl besitzt. Bei einer Zementreduktion kann man erkennen, dass, um dieselben Festigkeiten zu erreichen, eine Addition der doppelten Menge, im Vergleich zum reduzierten CEM I Zementes, an RC-Mehl nötig ist (k -Wert demnach ca. 0,5). Der Einsatz von chemischen Betonzusatzmitteln weist hauptsächlich einen Einfluss auf dem neuen Zement und nur einen geringen Effekt auf die Hydratation des RC-Mehl auf. Eine Karbonatisierung des RC-Mehls deutet keinen eindeutigen Einfluss auf die Festigkeiten an, verringert aber die Trockendichte und erhöht die kapillare Wasseraufnahme. Eine thermische Aktivierung von RC-Mehl, welches dann als Füller eingesetzt wird, verbessert alle Festbetoneigenschaften erheblich, die Hydraulizität des RC-Mehls erreicht aber nicht das Niveau von Zement. Die Zunahme der Festigkeiten könnte auf die Neubildung von Klinkerphasen oder auf die starke Wasserbindung des gebrannten RC-Mehls zurückzuführen sein.

Keywords: Recyclingbeton, Recyclingbetonmehl, feine rezyklierte Gesteinskörnung, RC-Mehl, RC-Gesteinskörnung, nachhaltige Betontechnologie, Zementreduktion, CO_2 Reduktion, Betonzusatzstoff

Einleitung

Während grober Betonbruch zunehmend als Ersatz für natürliche Gesteinskörnung Verwendung findet, dürfen rezyklierte Brechsande und Feinanteile auf Grund negativer

Eigenschaften aktuell nicht in neuem Recyclingbeton wiederverwendet werden. An diesem Punkt setzt die vorliegende Arbeit an. Aufgabenstellung ist, die feinen Anteile des Betonbruches gezielt dazu zu verwenden, den Zementanteil im Beton zu verringern, indem der

rezyklierte Altbeton als Füller oder reaktiver Betonzusatzstoff eingesetzt wird. Die Literaturergebnisse zu diesem Gebiet werden mit grundlegenden Erkenntnissen aus der Zementchemie zusammengefasst und durch eigene Untersuchungen ergänzt. Langfristig soll diese Arbeit dazu beitragen, den Einsatz von RC-Mehl in der Betonindustrie zu etablieren und somit natürliche Ressourcen zu sparen und gleichzeitig die CO₂ Emissionen zu verringern.

Physikalische Laboranalytik

Um den Untersuchungsrahmen der praktischen Versuche einzugrenzen und die Ergebnisse besser beurteilen zu können, kommen physikalischen Laborverfahren zum Einsatz. Die voruntersuchten und für die praktischen Experimente verwendeten RC-Mehle werden aus einem abgebrochenen Standardbeton sowie einem deutlich jüngeren Beton eines Fertigteilwerkes hergestellt. Die folgenden Laborverfahren wurden angewandt:

- IR-Spektroskopie (FTIR),
- Röntgenvielkristalldiffraktometrie (XRD)
- Rasterelektronenmikroskopie (REM)
- Röntgenspektroskopie (EDX)
- Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)
- Thermogravimetrie (TG)
- Differenz-Thermogravimetrie (DTG)
- Photometrie (UV/VIS)

Im RC-Mehl aus einer Abbruchbaustelle können auf Grundlage der vorhergehenden Untersuchungen keine reaktiven Klinkerphasen mehr nachgewiesen werden und auch bei Wasserzugabe zeigt sich keinerlei Zeichen für Reaktivität. Die Konzentrationen an Chlorid, Sulfat und Nitrat sind unter den gesetzlichen Grenzwerten und erlauben einen Einsatz des RC-Mehls als Gesteinskörnung, Füller oder Betonzusatzstoff.

Bei einer Karbonatisierung steigt nicht nur der Anteil an Calciumcarbonat, sondern auch an

freiem SiO₂ (vgl. Abb. 1), was darauf hindeuten könnte, dass festigkeitsbildende C-S-H Phasen des Altbetons durch die Kombination von Mahlung und Karbonatisierung in ihre Oxide zerfallen. Diese Oxide könnten für eine erneute Bildung von Klinkerphasen zur Verfügung stehen.

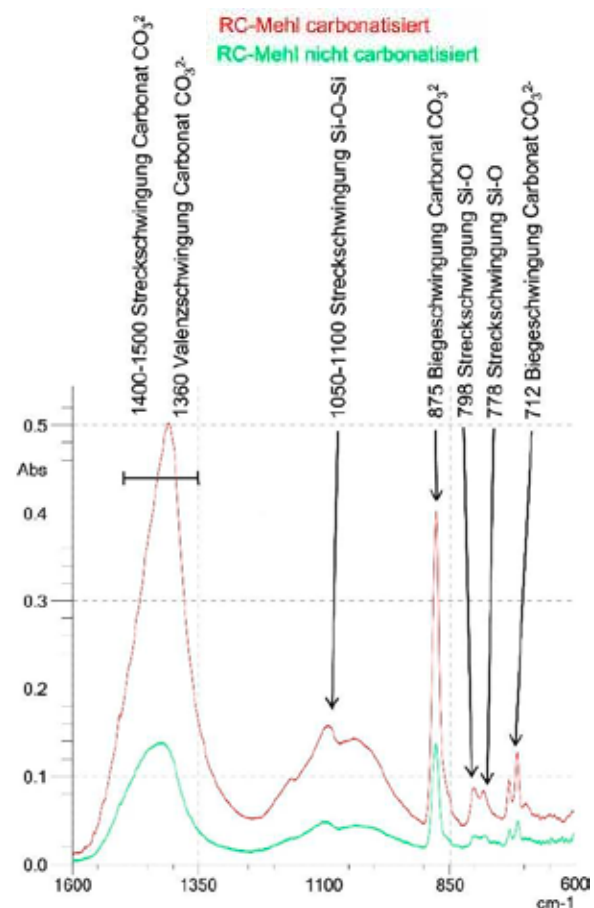


Abb. 1: FTIR Spektrum des RC-Mehls in carbonatisierter und nicht carbonatisierter Form mit Fokus auf den Schwingungen von Karbonat und Si-Verbindungen

Bei einer chemischen Aktivierung des RC-Mehls mit CaCl₂ · 2 H₂O, Na₂SO₄ · 10 H₂O und CaO, zeigt nur der Einsatz von CaCl₂ · 2 H₂O eine schwache Neubildung von C-S-H Phasen an.

Eine thermische Aktivierung führt zu einer Dissoziation des Calciumcarbonates und zu einem Rückgang an freiem SiO₂, welcher bei einer Brenntemperatur von 900°C seinen Maximalwert findet. Zudem deuten die FTIR Untersuchungen eine Neubildung von C₂S aus den Oxiden und eine Bildung von C₃S aus alten C-S-H Phasen an, wie in Abb. 2 zu erkennen ist.

Die Temperatur mit dem größten Potenzial zur Neubildung von Klinkerphasen scheint nach FTIR 850°C zu sein.

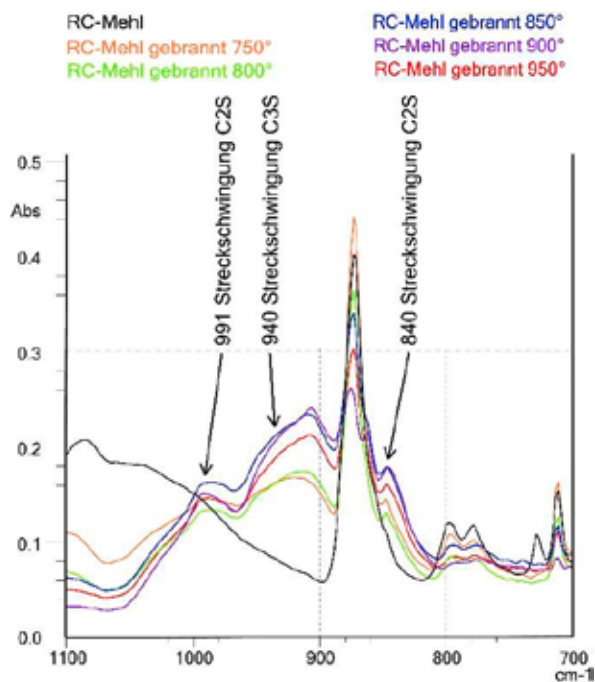


Abb. 2: FTIR Spektrum des RC-Mehles unbehandelt und 2 Stunden scharf gebrannt bei 750°C bis 950°C mit Fokus auf die Schwingungen der Klinkerphasen

Während TG und DTG Untersuchungen eher auf eine Neubildung von Klinkerphasen bei tieferen Temperaturen um 725°C hindeuten (siehe hierzu den Rückgang des Massenverlustes pro Minute bei 725°C in Abb. 3).

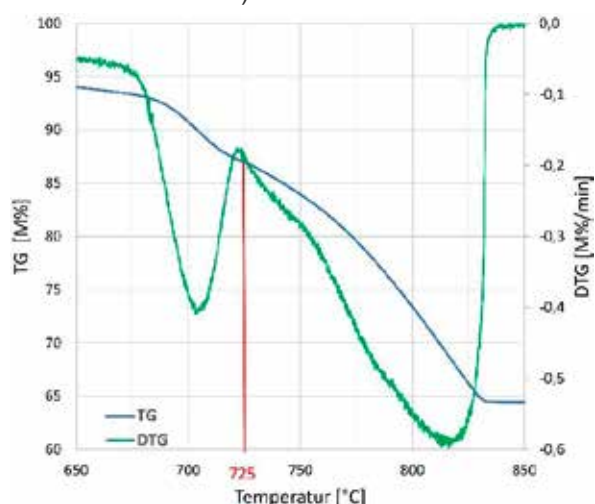


Abb. 3: TG (Massenverlust in %) und DTG (Massenverlust in %/min) Kurve von RC-Mehl im Temperaturbereich von 650°C bis 850°C bei einer Heizrate von 2,0 Kelvin pro Minute

Das thermisch aktivierte RC-Mehl zeigt bei

Wasserszugabe im FTIR Spektrum zwar einen Verbrauch der neu gebildeten Klinkerphasen an, aber es kann keine Neubildung von C-S-H Phasen nachgewiesen werden.

Praktische Versuche

Als Grundlage der praktischen Versuche dienen Mörtelprismen (40 mm x 40 mm x 160 mm), welche in Anlehnung an die DIN 196-1 [1] hergestellt werden. Von der Zusammensetzung der Norm wird bei einem Einsatz von RC-Mehl in der Art abgewichen, dass Teile des Zementes bzw. der Gesteinskörnung, je nach Versuchsreihe, durch RC-Mehl substituiert werden. Es wird ein w/z -Wert = 0,5 (Wasser-Zement Wert, bei Versuchsreihen, wo das RC-Mehl nicht als Binder betrachtet wird), als auch ein w/b -Wert = 0,5 (Wasser-Binder Wert, bei Versuchsreihen, in denen das RC-Mehl als Binder betrachtet wird) eingestellt. Die Verarbeitbarkeit wird bei Bedarf mit Fließmittel sichergestellt. Nach einer Wasserlagerung von 28 bzw. 56 Tagen werden die Feucht- und Trockendichte, sowie die kapillare Wasseraufnahme gemäß DIN EN 1015-18 [2], Biegezug- und Druckfestigkeit gemäß DIN 196-1 [1] bestimmt. Insgesamt werden 7 Versuchsreihen durchgeführt.

- Versuchsreihe:** Vergleich der Füllereigenschaften von RC-Mehl mit Kalkstein und Quarzmehl
- Versuchsreihe:** Untersuchung zur Reduktion von Zement durch Substitution mit RC-Mehl
- Versuchsreihe:** Erforschung des Einflusses von chemischen Zusatzmitteln auf Füllereigenschaften
- Versuchsreihe:** Untersuchung des Einflusses einer gezielten Karbonatisierung von RC-Mehl
- Versuchsreihe:** Nachforschung zu dem Einfluss einer Temperaturbehandlung (750°C - 950°C) auf die Füllereigenschaften
- Versuchsreihe:** Untersuchungen zu thermisch aktiviertem RC-Mehl als Binder
- Versuchsreihe:** Untersuchung des RC-Mehl stammend aus dem Fertigteilwerk (Füllereffekte, Zementreduktion, thermische Aktivierung), Vergleich mit RC-Mehl aus Abbruch

Zusammenfassung

Das **RC-Mehl aus dem Abbruch** besitzt nach der Versuchsreihe 1 vergleichbare Füllereigenschaften wie Kalkstein oder Quarzmehl. Somit kann die Druckfestigkeit des Referenzmörtels durch den Einsatz von RC-Mehl um bis zu 21 % ($R_{C56} = 59,1$ [N/mm²]) erhöht werden. Bei einer Zementreduktion von 10 M% bis 20 M% in der Versuchsreihe 2 zeigt sich, dass, um ähnliche Biegezug- und Druckfestigkeiten wie die Mörtelprismen des Referenzmörtels ($\emptyset R_{f28} = 7,7$ [N/mm²], $\emptyset R_{C28} = 49,0$ [N/mm²]) zu erreichen, eine Addition der doppelten Menge an RC-Mehl nötig ist. Die Anrechenbarkeit auf den Zementgehalt wird für puzzolanische Betonzusatzstoffe über den k-Wert ausgedrückt. Für RC-Mehl könnte demnach, ohne alle normativen Untersuchungen in Gänze vorgenommen zu haben, ein k-Wert von ca. 0,5 vermutet werden.

Der Einsatz von chemischen Betonzusatzmitteln hat gemäß Versuchsreihe 3 hauptsächlich einen Einfluss auf den neuen Zement und trägt kaum zu einer Reaktivierung von RC-Mehl bei. Rein durch die Verwendung von CaCl₂ können höhere Druckfestigkeiten (bis $\emptyset R_{C28} = 53,4$ [N/mm²]) erreicht werden. Bei einer Zugabe von CaCl₂ in Stahlbeton ist aber die erhöhte Korrosionsgefahr durch die Chloridionen zu beachten. Eine gezielte Karbonatisierung des RC-Mehls zeigt nach Versuchsreihe 4 keinen eindeutigen Einfluss auf die Festigkeiten. Dies steht im Gegensatz zu Literaturergebnissen, welche eine erhöhte Dichte, geringeres Schwinden und einen positiven Einfluss auf die Festigkeit anzeigen [3].

Thermisch aktiviertes RC-Mehl verbessert alle Festbetoneigenschaften bei einem Einsatz als Füller erheblich (siehe Versuchsreihe 5). Hierbei muss beachtet werden, dass das RC-Mehl nicht auf den w/z-Wert angerechnet wird. Die höchsten Festigkeiten ($\emptyset R_{f28} = 8,5$ [N/mm²], $\emptyset R_{C28} = 58,0$ [N/mm²]) werden bei der größten untersuchten Brenntemperatur von 950°C und einer

Substitution von 20 M% Zement durch 40 M% RC-Mehl erreicht (w/z-Wert = 0,5 bzw. hier bei Anrechnung von RC-Mehl w/b-Wert = 0,33). Die Zunahme der Festigkeiten könnte auf eine Neubildungen der Klinkerphasen C₂S und C₃S zurückzuführen sein, welche mittels FTIR-Spektroskopie nachgewiesen werden können. Aber auch die starke Wasserbindung des gebrannten RC-Mehls könnte zu der Erhöhung der Festigkeit beitragen. Wird thermisch aktiviertes RC-Mehl nicht als Füller, sondern wie in Versuchsreihe 6 als Binder mit vollständiger Anrechnung auf den w/z-Wert von 0,5 eingesetzt (\rightarrow w/b-Wert = 0,5 und w/z-Wert > 0,5) führt dies zu einer Beeinträchtigung aller Festbetoneigenschaften. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass auch thermisch aktiviertes RC-Mehl nur zu einem geringen Teil hydraulische Reaktivität zeigt.

Das **RC-Mehl aus dem Fertigteilwerk** zeigt bei gleichen Versuchsbedingungen etwas geringere (aber noch praktikable) Festigkeiten als das RC-Mehl aus Standardbeton, was potenziell auf die ehemalige silikatische Gesteinskörnung des Ausgangsbetons zurückzuführen ist. Darüber hinaus zeigt sich aber ein vergleichbares Verhalten, was durchweg positiv zu werten ist.

Die Verwendung von RC-Mehl für eine Verringerung des Zementanteils im Beton hat aus wirtschaftlicher und umwelttechnischer Sicht enormes Potential. Aus dem ehemals zu deponierenden Feinanteilen des Betonabbruchs wird somit eine wertvolle Ressource. Der Energieaufwand für die Mahlung und eine Temperaturbehandlung liegen deutlich unter dem der Neuherstellung von Zement. Weitere Forschungen zu einem gestuften Brennvorgang und einer verbesserten Karbonatisierung des RC-Mehls könnten zusammen mit einer Betonrezeptur mit optimierter Packungsdichte einen baldigen praktischen Einsatz ermöglichen. Weiterführende Forschungen zu Dauerhaftigkeit, Frost-Tau und Chloridwiderstand sind an der HM bereits angelaufen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: DIN-Normenausschuss, Europäisches Komitee für Normung: DIN EN 196-1 – Prüfverfahren für Zement, Deutsche Fassung EN 196-1:2016.
- [2]: Deutsches Institut für Normung, e.V.: DIN EN 1015-18 – Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk Teil 18: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme, Europäische Norm EN 1015-18:2003
- [3]: Xuan, D.; Zhan, B.; Poon, C.S.: „Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates“. In: Cement and Concrete Composites 65 (2016)

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Brigitte Nagy: Auswirkungen der chemischen und thermischen Aktivierung von rezykliertem Abbruchmaterial auf die Festigkeit im RC Festmörtel, Hochschule München, Masterarbeit, 2019
2. Anette Müller: Baustoffrecycling – Entstehung - Aufbereitung - Verwertung. IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2018.
3. Bogas, J.A.; Brito, J. de; Ramos, D.: Freeze–thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates, Journal of Cleaner Production 115 (2016)
4. Caijun Shia, Robert L. Day: Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators Part II. Reaction products and mechanism, The University of Calgary, Calgary, 2000
5. Zhang, J.; Shi, C.; Li, Y. et al.: Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar, Construction and Building Materials 98 (2015)

Autor

Florian Parhofer

seit 2020	Mitarbeiter am Institut für Material- und Bauforschung (IMB) der Hochschule München
2018 - 2020	Masterstudium Bauingenieurwesens an der Hochschule München, Abschluss M. Eng.
2014 - 2018	Bachelorstudium Bauingenieurwesens an der Hochschule München, Abschluss B. Eng.
2013 - 2014	Bachelorstudium der Geowissenschaften an der TUM
2005 - 2013	Abitur (AHR), Nymphenburger Gymnasium, München

Betreuer

Ich bedanke mich ganz herzlich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Andrea Kustermann, welche die Professur der Bauchemie an der Fakultät 02 der Hochschule München leitet. Weiterer Dank gilt Herrn M. Sc. Benjamin Wolf und Frau Dr. rer. nat. Johanna de Reese für die Betreuung dieser Masterarbeit und die Einführung in die analytische Chemie. Herrn Martin Lutz und Herrn Peter Failer danke ich für ihre praktische Unterstützung bei der Durchführung der Versuchsreihen im Labor und wertvollen Gedankenregungen.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

TRITTSCHALLÜBERTRAGUNG VON STAHLBETON-BODENPLATTEN IN DARÜBERLIEGENDE, SCHUTZBEDÜRFTIGE RÄUME

Bachelorarbeit

Lena Rappert

Eine Vorbemessung der Trittschallübertragung einer Stahlbeton-Bodenplatte in darüberliegende, schutzbedürftige Räume ist nach den derzeit geltenden Regelwerken nur einschränkt möglich. Diese kommt jedoch in der baupraktischen Anwendung relativ häufig vor, wie z. B. bei Tiefgaragen mit darüberliegenden Wohnräumen. Deshalb wird das aktuelle Berechnungsverfahren des *bewerteten Norm-Trittschallpegels* $L'_{n,w}$ nach *DIN 4109-2:2018-01* für diesen umgekehrten Beanspruchungsfall durch den Vergleich mit eigenen Gebäudemessungen verifiziert. Als Ergebnis der Überprüfung wird der geltende Korrekturwert K_T im Massivbau zwar grundsätzlich bestätigt, gleichzeitig erscheint aber die Einführung eines eigenständigen Korrekturwertes für den Skelett- bzw. Mixbau sinnvoll. Ergänzend wird in Anlehnung an *DIN EN ISO 12354-2:2017-11* und unter Verwendung der Schallberechnungssoftware *BASTIAN* ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem die Trittschallübertragung - entgegen des in der DIN beschriebenen Regelfalles - von unten nach oben, in Form eines Prognosewertes für den *bewerteten Norm-Trittschallpegel*, möglichst gut vorhergesagt werden kann. Das entworfene Simulationsmodell bietet einen praxisorientierten Berechnungsansatz und liefert auf Basis der vorliegenden Messwerte plausible Prognosewerte.

Keywords: Trittschallübertragung von unten nach oben, Bodenplatte, DIN 4109-2:2018-01, bewerteter Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$, Korrekturwert K_T , DIN EN ISO 12354-2:2017-11, Simulationsmodell

Problemstellung und Zielsetzung

Nach *DIN 4109-2:2018-01, Schallschutz im Hochbau - Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen* [1] ist eine Vorbemessung der Trittschallübertragung von Stahlbeton-Bodenplatten in darüberliegende, schutzbedürftige Räume nur eingeschränkt möglich. Daher

soll das derzeitige Berechnungsverfahren verifiziert und ggf. modifiziert werden. Ergänzend wird ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem, in Anlehnung an *DIN EN ISO 12354-2:2017-11* [2] und unter Verwendung der Schallberechnungssoftware *BASTIAN*, die Trittschallübertragung von unten nach oben möglichst gut vorhergesagt werden kann.

Messtechnische Untersuchung

Für die messtechnische Untersuchung und die sich daran anschließende theoretische Berechnung der Trittschallübertragung in darüberliegende, schutzbedürftige Räume wird an fünf geeigneten Objekten mit insgesamt 17 Einzelsituationen der *bewertete Norm-Trittschallpegel* gemäß *DIN EN ISO 16283-2:2018-11* [3] bestimmt. Abb. 1 zeigt die Messsituation mit den Schallübertragungswegen vom Senderaum (SR) in den Empfangsraum (ER).

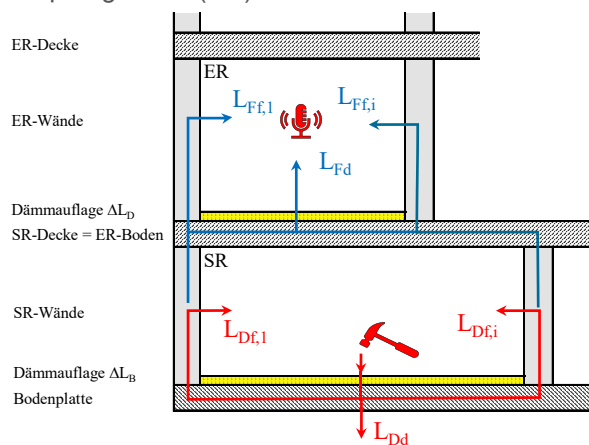


Abb. 1: Messsituation mit den Schallübertragungswegen

Verifizierung des Korrekturwertes K_T

Bei der Trittschallübertragung von unten nach oben wird bei der Anregung der Bodenplatte ein Teil der Anregungsenergie in die darunterliegende Schicht abgeleitet. Weiterhin gelangt der Trittschall nur durch die umgebenden Wandflächen in die darüberliegenden Etagen. Dieser Umstand wird bei der theoretischen Berechnung der Trittschallübertragung durch den Korrekturwert K_T ausgedrückt [1].

Gemäß *DIN 4109-2:2018-01* ergibt sich der *bewertete Norm-Trittschallpegel* $L'_{n,w}$ bei unterschiedlichen Raumanordnungen zu [1]:

$$L'_{n,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w - K_T \text{ [dB]}$$

Der *äquivalente bewertete Norm-Trittschallpegel* $L_{n,eq,0,w}$ der Rohdecke ist von der *flächenbezogenen Masse* m' abhängig. ΔL_w entspricht der *bewerteten Trittschallminderung* durch eine Deckenauflage. Im Massivbau ist zur Berücksichtigung des Übertragungsweges von unten nach oben ein

$K_T = 10$ dB definiert. Für reine Skelettbauten sowie für Mischformen aus Skelett- und Massivbauweise, die im Folgenden als Mixbauweise bezeichnet werden, ist kein K_T vorgesehen [1]. Für die Überprüfung des K_T werden die Einzelsituationen daher in Massiv- und Mixbauweise differenziert.

Die Verifizierung des Korrekturwertes erfolgt durch den Vergleich des messtechnisch bestimmten $L'_{n,w,M}$ mit dem theoretisch bestimmten $L'_{n,w,B}$ des *bewerteten Norm-Trittschallpegels* ohne Einbezug von K_T .

Damit im Massivbau der berechnete *bewertete Norm-Trittschallpegel* auch mit einem neuen Korrekturwert $K_{T,massiv}$ auf der sicheren Seite liegt, wird nach Methode I der $K_{T,massiv I}$ aus dem kleinsten Abstand zwischen $L'_{n,w,B}$ und $L'_{n,w,M}$ der einzelnen Messsituationen bestimmt (siehe Abb. 2).

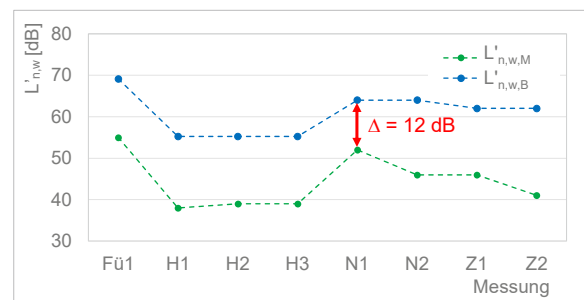


Abb. 2: $K_{T,massiv I}$ aus der Differenz von $L'_{n,w,B}$ und $L'_{n,w,M}$

Als Ergebnis dieser Analyse ergibt sich:

$$K_{T,massiv I} = \Delta \min(L'_{n,w,B} - L'_{n,w,M}) = 12 \text{ dB}$$

Bei Methode II wird der neue Korrekturwert $K_{T,massiv II}$ durch den Vergleich der beiden Wertegruppen $L'_{n,w,B}$ und $L'_{n,w,M}$ in Abhängigkeit von m' ermittelt. Daraus ergibt sich $K_T = f(m')$. Unter der Annahme, dass die jeweiligen Funktionswertgruppen gleichverteilt um einen Mittelwert streuen, wird $K_{T,massiv II}$ über die Normalverteilung bestimmt. Dazu wird zunächst die Standardabweichung für die beiden Wertegruppen berechnet und anschließend durch die Wahl geeigneter Quantilgrenzen $K_{T,massiv II}$ ermittelt. Da auch für diesen Fall der berechnete *bewertete Norm-Trittschallpegel* auf der sicheren Seite liegen soll, wird der Quantilwert mit 90 % bzw. 10 % so gewählt,

dass alle $L'_{n,w,M}$ unterhalb und alle $L'_{n,w,B}$ oberhalb der gewählten Grenzen liegen. Abb. 3 zeigt neben diesen Wertegruppen zusätzlich die beiden Quantil-Geraden und als gepunktete Linien die beiden Regressionsgeraden.

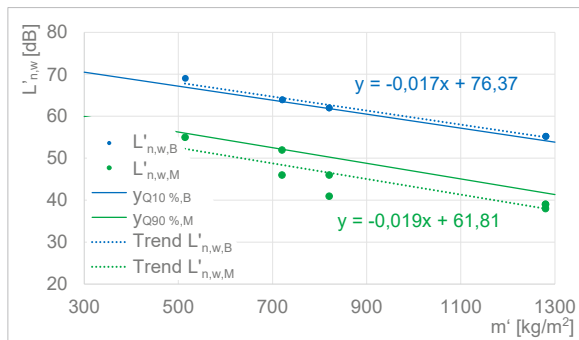


Abb. 3: $L'_{n,w,B}$ und $L'_{n,w,M}$ in Abhängigkeit von m'

Bedingt durch die unterschiedlichen Steigungen der beiden Quantil-Geraden ergibt sich der von m' abhängige Korrekturwert $K_{T,massiv II}$ zu:

$$K_{T,massiv II} = Y_{B,10\%} - Y_{M,90\%} = 0,002 \cdot m' + 10,0 \text{ [dB]}$$

Für Bodenplatten mit $m' \approx 930 \text{ kg/m}^2$ führen beide Ermittlungsmethoden mit ca. 12 dB zu vergleichbaren Ergebnissen. Der im Massivbau geltende Korrekturwert $K_T = 10 \text{ dB}$ [1] wird somit durch beide Ermittlungsmethoden grundsätzlich bestätigt.

Die Vorgehensweise für die Bestimmung alternativer Korrekturwerte für die Mixbauweise erfolgt analog zur Ermittlung im Massivbau. Nach Methode I ergibt sich für $K_{T,mix I} = 11,0 \text{ dB}$. Da sich in der vorliegenden Datenbasis die Einzelsituationen für diese Bauart nur durch zwei unterschiedliche m' voneinander unterscheiden, kann die Bestimmung nach Methode II nicht vollständig verwirklicht werden. Sie wird daher vereinfacht, wodurch sich ein von m' unabhängiger $K_{T,mix II}$ ergibt, der für die Quantilwerte 84 % bzw. 16 % den Wert $K_{T,mix II} = 10,3 \text{ dB}$ annimmt.

Die beiden vorgestellten Lösungsmethoden liefern mit $K_{T,mix} \approx 11 \text{ dB}$ nahezu gleiche Ergebnisse. Es zeigt sich, dass sowohl für die Mixbauweise als auch für den Skelettbau ein eigenständiger Korrekturwert K_T sinnvoll erscheint.

Entwicklung eines Simulationsmodells

In den Messungen wird festgestellt, dass der Großteil der Trittschallübertragung von unten nach oben über die Raumflanken erfolgt. Die *DIN EN ISO 12354-2:2017-11* verfolgt in ihrer Berechnungssystematik einen ganzheitlichen Ansatz, mit dem insbesondere auch die Flankenübertragungswege berücksichtigt werden [2]. Deswegen soll ein Simulationsmodell in Anlehnung an diese Norm entwickelt werden, mit dem der gemessene Trittschallpegel mit einer möglichst guten Vorhersagequalität prognostiziert werden kann. Dazu werden die Prognosewerte des besten Modells mit den Ergebnissen der durchgeführten Trittschalldämmmessungen verglichen und statistisch ausgewertet. Im Idealfall ergibt sich daraus ein linearer funktionaler Zusammenhang, der durch eine Ausgleichsgerade beschrieben werden kann.

Eine Berechnung nach *DIN EN ISO 12354-2:2017-11* ist nur von oben nach unten und über lediglich eine Stoßstelle hinweg möglich [2]. Um dennoch die Besonderheiten der Schallübertragung von unten nach oben rechnerisch abbilden zu können, wird das Gebäudemodell gedanklich „auf den Kopf gestellt“ (siehe Abb. 4).

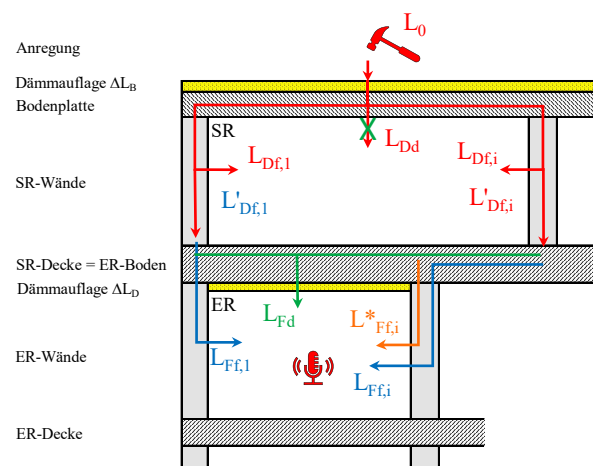


Abb. 4: Ausgangslage der Modellbildung

Da Send- und Empfangsraum immer nur durch ein Bauteil voneinander getrennt sein dürfen, wird der Schallübertragungsweg in drei Stufen

unterteilt und anschließend rechnerisch zusammengesetzt:

- 1. Berechnungsstufe: oBs
(offen-Bodenplatte-Senderaum)
- 2. Berechnungsstufe: eDs
(Empfangsraum-Decke-Senderaum)
- 3. Berechnungsstufe: sDe
(Senderaum-Decke-Empfangsraum)

Alle in die Modellberechnung einfließenden Pegelwerte werden nach *DIN EN ISO 12354-2: 2017-11* mit Hilfe der Software *BASTIAN* als *Einzelwerte* ermittelt.

Zur Abbildung unterschiedlich komplexer Raumsituationen werden drei verschieden aufwendige Modellvarianten entwickelt und anschließend bewertet:

- Modell A: Berücksichtigung der primären Wandflankenemissionen $L_{Ff,i}$ im ER
- Modell B: zusätzlich zu Modell A Berücksichtigung der Emissionen über den ER-Boden L_{Fd}
- Modell C: zusätzlich zu Modell B Berücksichtigung der Schallemissionen über die nicht unterfangenen ER-Wandflanken $L^*_{Ff,i}$

Von diesen Modellen wird dasjenige mit der besten Korrelation zu den Messwerten ausgewählt und anschließend über eine Regressionsgerade der lineare funktionale Zusammenhang in Form eines *prognostizierten Messwertes* $L'_{n,w,Mp}$ ermittelt. Als Maßstab zur Beurteilung der Modellqualität dienen die Korrelation zwischen Mess- und Prognosewerten sowie die örtliche Lage der Funktionspunkte, die sich möglichst nahe an der Ausgleichsgerade befinden sollten. Für die vorliegende Datenbasis wird bei Verwendung der Modellvariante B mit 0,89 die beste Korrelation erzielt, wodurch auch eine lineare statistische Abhängigkeit bestätigt wird. Die Funktion für den *prognostizierten Messwert* $L'_{n,w,Mp}$ ergibt sich aus der Regressionsgeraden zu:

$$L'_{n,w,Mp} = 1,09 \cdot L'_{n,w(P,Bk)} + 30,01 \text{ [dB]}$$

$L'_{n,w(P,Bk)}$ stellt dabei den prognostizierten, *bewerteten Norm-Trittschallpegel* gemäß Prognosemodell B dar.

Der lineare Zusammenhang wird auch durch einen schmalen Abweichungskorridor ($\pm 10\%$) untermauert, der im Genauigkeitsbereich von *BASTIAN* liegt und in dem sich alle Funktionswerte befinden (siehe Abb. 5).

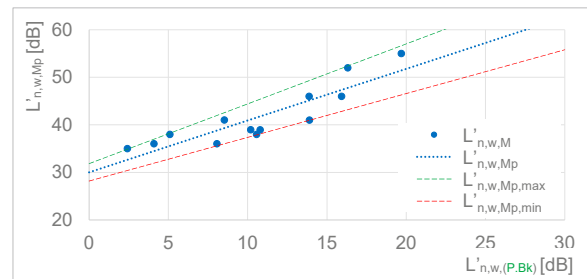


Abb. 5: Ausgleichsgerade mit zugehörigem Fehlerkorridor

Insgesamt lässt sich mit dem entworfenen *Simulationsmodell* - ganz ohne Fallunterscheidung in *Massiv-/Mixbau* - der zu erwartende $L'_{n,w,Mp}$ auf Basis der durchgeführten Untersuchungen *relativ präzise* vorhersagen. Nach einer ersten Einschätzung stellt dieses Verfahren, unter Verwendung der *BASTIAN*-Ergebnisse, einen praxisorientierten Lösungsansatz zur Berechnung der Trittschallübertragung von unten nach oben dar. Zur Absicherung sind weitere vergleichende Untersuchungen notwendig.

Fazit

Der alternativ ermittelte $K_T = f(m')$ liefert mit $K_{T,massiv II}$ bzw. $K_{T,mix II}$ einen vielversprechenden Ansatz, um die Trittschallübertragung von unten nach oben deutlich besser vorbemessen zu können, als es derzeit über den pauschalen K_T -Zuschlag gemäß *DIN 4109-2: 2018-01* erfolgt. Das unter Verwendung der Software *BASTIAN* an *DIN EN ISO 12354-2: 2017-11* angelehnte *Simulationsmodell* ist zwar deutlich aufwendiger in der Erstellung, bildet aber die physikalischen Wirkmechanismen *realitätsnäher* ab. Beide beschriebenen Methoden sind somit für die Vorbemessung der Trittschallübertragung von Bodenplatten in darüberliegende Räume gut geeignet.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 4109-2:2018-01, Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderung. Ausgabe Januar 2018
- [2]: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 12354-2:2017-11, Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen. Ausgabe November 2017
- [3]: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 16283-2:2018-11, Akustik-Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 2: Trittschalldämmung. Ausgabe November 2018

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Fischer, H.-M.; Schneider, M.: Handbuch zu DIN 4109 - Schallschutz im Hochbau – Grundlagen - Anwendung - Kommentare. Beuth Kommentar. 2019
2. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 12354-1:2017-11, Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen (ISO 12354-1:2017). Ausgabe November 2017
3. DataKustik GmbH: BASTIAN - Das bauakustische Planungssystem Version 2.3.103 [Software]. 2017

Autor

Rappert, Lena

Nach ihrem Abitur an der Christian-von-Bomhard-Schule in Uffenheim im Jahr 2016 nahm Lena Rappert ein Studium im Fach „Bauingenieurwesen“ an der Technischen Hochschule Georg Simon Ohm in Nürnberg auf, das sie im Jahr 2020 mit dem Bachelor of Engineering erfolgreich abschloss. Seit dem Wintersemester 2020/21 setzt sie ihre Ausbildung mit einem Masterstudium im Fachbereich „Internationales Bauwesen“ ebenfalls an der Technischen Hochschule Nürnberg fort.

Betreuer

Die Arbeit wurde an der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm unter Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann und Dipl.-Ing. (FH) Wolff Fülle (Wolfgang Sorge, Ingenieurbüro für Bauphysik) angefertigt.

Die Arbeit wurde mit dem 3. Preis ausgezeichnet.

ANALYTISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DER VORSPANNKRAFT AUF DIE ÜBERTRAGUNG EINER TORSIONSBEANSPRUCHUNG IN TROCKENEN FUGEN

Bachelorarbeit

Anneka, Seuß

Den Kern der Arbeit bilden analytische Untersuchungen, anhand derer der Einfluss der Vorspannkraft auf die Übertragung einer Torsionsbeanspruchung in trockenen sowie geschliffenen Fugen untersucht wird. Die Umsetzung der zugrunde liegenden Thematik wird durch ein eigenständig entwickeltes analytisches Tool mittels der Programmiersprache Python gewährleistet. Die Berechnungen erfolgen nach zwei unterschiedlichen Ansätzen, einem flächenorientierten und einem steifigkeitsorientierten. Das erarbeitete Tool erlaubt es beliebige Profilquerschnitte und variable Torsionsbelastungen zu untersuchen. Anhand von Anwendungsbeispielen können Gesetzmäßigkeiten zwischen der Vorspannkraft und der Geometrie der untersuchten Bauteilquerschnitte festgestellt werden. Eine erfolgreiche Validierung des entwickelten Programms gelingt anhand einer experimentellen Versuchsreihe. Als Ergebnis liegt ein analytisches Werkzeug vor, welches es erlaubt, für beliebige Querschnitte bei einer vorgegebenen Torsionsbelastung die nötige Vorspannkraft zu ermitteln, um die Funktionsfähigkeit der trockenen Fuge im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten.

Keywords: Vorspannkraft, Anpressdruck, Python, Torsionsbeanspruchung, analytische Untersuchungen, Stahlbetonbau, Trockenfuge

Mechanische Grundlagen

Die Oberflächenbeschaffenheit von Fugen stellt ein zentrales Kriterium zur Funktionsfähigkeit einer Trockenfuge dar. Die Fugen werden daher mittels eines CNC – Schleifverfahrens bearbeitet, um eine möglichst ebene Oberfläche zu gewährleisten. Anhand von Untersuchungsreihen, welche in [1] veröffentlicht wurden,

empfiehlt es sich ein Reibbeiwert für geschliffene Fugen von $\mu=0,56$ anzusetzen. Es wird nicht mehr zwischen Haft- und Gleitreibung unterschieden. Der Wert für die Reibung liegt dennoch über dem in der Literatur [2] vorgegebenen Wert für sehr glatte Betonoberflächen von 0,50.

Bauweise mit Trockenfugen

Eine hohe Präzision und Qualität an die Ebenheit der Kontaktflächen der mit Spannstählen aneinandergesetzten Einzelsegmente ist durch das CNC – Präzisionsschleifverfahren gewährleistet. Schäden, wie zum Beispiel das Abplatzen von Beton an der Fuge, werden so gering wie möglich gehalten. Eine gewisse Unebenheit von wenigen Zehntelmillimetern ist dennoch vorhanden, darf aber nicht weiter überschritten werden.



Abb. 1: Betonoberfläche nach dem Schleifen

Die Bauweise mit Trockenfugen bietet den Vorteil, dass keine zeitlichen Verzögerungen während des Bauablaufs auftreten. Die Ausbildung einer Trockenfuge kann zudem bei jeder Witterung erfolgen. Das zeitabhängige Verhalten von Beton, wie beispielsweise Kriechen, Schwinden oder das Abfließen der Hydratationswärme, kann außerdem nachträglich durch das CNC Schleifen korrigiert werden. Der große Nachteil ist allerdings, dass der Korrosionsschutz für den Spannstahl nicht von vornherein besteht und deshalb einer intensiven Betrachtung bedarf.

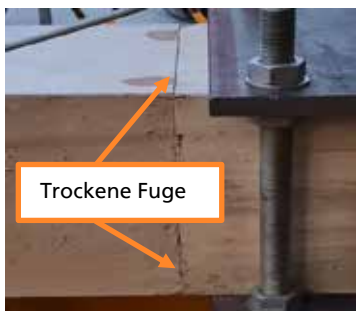


Abb. 2: Trockene Fuge zwischen zwei Bauteilen

Zustimmung im Einzelfall für Trockenfugen

Entsprechend den Regelungen in [2] und [3] werden trockene Fugen zur Übertragung von Biegemomenten, Querkräften sowie Normalkräften normtechnisch nicht erfasst. Die Verwendung dieser Bauweise erfordert in Deutschland daher eine Zustimmung im Einzelfall und somit projektspezifische umfangreiche Untersuchungen der Verhaltensweise der Trockenfuge.

Implementierung

Es wird der Versuch der analytischen Ermittlung der mindestens notwendigen Vorspannkraft unternommen, um die Übertragung einer Torsionsbeanspruchung über die trockene Fuge eines Bauteils mit beliebiger Querschnittsgeometrie zu gewährleisten. Ein Programm in der Programmiersprache Python wird eigens dafür realisiert.

Die Berechnung des Anpressdruckes erfolgt unter anderem an anspruchsvollen C – Profilen, wobei zwei verschiedene Ansätze, welche als Variante 1 beziehungsweise Variante 1a und Variante 2, gewählt werden. Die Berechnungen nach Variante 1 und 1a erfolgen flächenorientiert, die nach Variante 2 erfolgt steifigkeitsorientiert. In beiden Varianten erfolgt die Aufteilung des Gesamtquerschnittes in drei Teilquerschnitte. Der Unterschied zwischen der Variante 1 und der Variante 1a liegt in einer variierenden Aufteilung und Zuordnung der Gesamtfläche zu den Teilflächen. Die Aufteilung der Variante 2 erfolgt wie in Variante 1a. Um den Unterschied deutlich zu machen, ist Abbildung 3 zu betrachten.

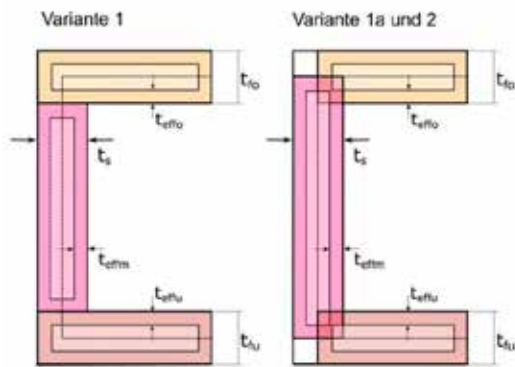


Abb. 3: Graphische Veranschaulichung der Flächenaufteilung anhand eines C – Profils

Das implementierte Tool ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt und soll die Arbeitsweise des Tools erläutern.

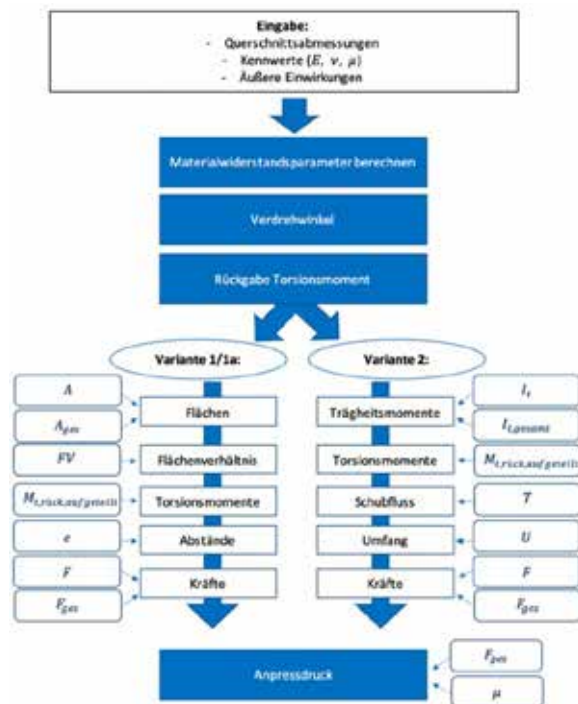


Abb. 4: Ablaufdiagramm des Python Codes

Die Eingabe der Querschnittsabmessungen und der Kennwerte der zu betrachtenden Profilquerschnitte erfolgt zu Beginn. Ebenso müssen zunächst die äußeren Einwirkungen, welche in Form eines Torsionsmomentes in das implementierte Programm einfließen, definiert werden.

Die Berechnung der Materialwiderstandsparameter, also der Torsionssteifigkeiten GI_t und

des Torsionswiderstandsmomente W_t für die Teilquerschnitte erfolgt im Anschluss. Unabhängig von der gewählten Variante wird der Verdrehwinkel φ und das rückstellende Torsionsmoment $M_{t,rück}$ bestimmt.

Die Variante 1a wurde aufgrund von vergleichbaren Ergebnissen der Varianten 1 und 1a priorisiert, da die Teilflächendefinition durch die jeweiligen Mittellinien begrenzt wird und somit der Aufteilung, welche in der Literatur [4] zu finden ist, entspricht, siehe hierzu Abbildung 3. Die Ermittlung der Vorspannkraft bzw. des Anpressdruckes erfolgt über ein Momentengleichgewicht zwischen dem äußeren Torsionsmoment und dem rückstellenden Torsionsmoment. Mit Hilfe des anteiligen rückstellenden Torsionsmoment der Teilquerschnitte und des gemittelten Hebelarms e wird dabei die erforderliche Reibungskraft F für die Teilquerschnitte bestimmt. Eine Addition der Reibungskräfte führt zur Ermittlung der Gesamtreibungskraft F_{ges} .

Die Variante 2 stellt eine steifigkeitsbezogene Alternative dar. Die Aufteilung des rückstellenden Torsionsmomentes $M_{t,rück}$ auf die Teilquerschnitte erfolgt dabei über die Torsionsträgheitsmomente I_t der einzelnen Teilquerschnitte. Im Vergleich zu Variante 1a entfällt nun ein Großteil des Torsionsmomentes auf den Steg, da dieser eine größere Torsionssteifigkeit aufweist als die beiden Flansche. Die notwendige Gesamtreibungskraft F_{ges} resultiert aus der Summe der Einzelkräfte, die anhand des Schubflusses T und des Umfangs U der Einzelquerschnitte bestimmt werden, siehe hierzu Abbildung 5.

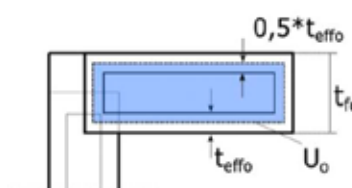


Abb. 5: Beispielhafte Veranschaulichung des Umfangs U

Unter Berücksichtigung des Reibbeiwertes μ folgt aus der Gesamtreibungskraft F_{ges} für beide Varianten die notwendige Vorspannkraft P .

Strukturelle Abhängigkeiten der Vorspannkraft

Die Durchführung von Berechnungsuntersuchungen ergeben für beide Varianten eine Unabhängigkeit der Vorspannkraft P von der Bauteillänge l und der Betonfestigkeitsklasse des untersuchten Bauteils. Es stellen sich darüber hinaus für alle durchgeführten Anwendungsbeispiele bei der Variante 1a kleinere Werte der Vorspannkraft P ein als bei Variante 2. Eine nähere Betrachtung der Ergebnisse der Variante 1a zeigt eine indirekt proportionale Abhängigkeit der Vorspannkraft P zur Gesamtfläche A_{ges} . Die größte Vorspannkraft P resultiert bei der kleinsten Gesamtfläche A_{ges} . Für die Variante 2 können dahingegen keine eindeutigen Gesetzmäßigkeiten identifiziert werden. Es kann zusätzlich festgestellt werden, dass die Differenz des errechneten Anpressdruckes P zwischen den Varianten 1a und 2 bei einer gleichmäßigen Aufteilung der Gesamtfläche A_{ges} und des gesamten Torsionsträgheitsmomentes $I_{t,ges}$ auf die einzelnen Teilflächen am größten ausfällt.

Experimentelle Validierung

Eine Validierung des analytischen Programms erfolgt anhand einer Versuchsreihe. Die Ergebnisse der Experimente werden dabei infolge eines Torsionsversuchs an einem quadratischen Bauteil mittels des entwickelten Programms bestätigt. In Tabelle 1 ist exemplarisch das Ergebnis eines Versuchs dargestellt.

Die sich einstellende Abweichung ergibt sich aus der fehlenden Berücksichtigung der Querkraftübertragung in der trockenen Fuge des Programms.

Torsionsversuch		
Einwirkendes Torsionsmoment: $M_t=1,3 \text{ kNm}$		
Vorspannkraft experimentell	Vorspannkraft analytisch	Abweichung
24,45 kN	22,86 kN	7 %

Tab. 1: Darstellung der Ergebnisse aus dem Torsionsversuch

Trockenfugen in der Praxis

In Deutschland finden trockene Fugen vor allem im Windturmbau und bei Infrastrukturbauwerken Anwendung. Vorgefertigte, halbrunde Schalensegmente werden mit Hilfe von Vorspanngliedern zu einem bis zu 150 m hohen Turm zusammengefügt. Zwischen den einzelnen Segmenten werden trockene Fugen ausgebildet und somit der Zeitbedarf zur Errichtung eines Windturms minimiert. Die Anbindung des im Bau befindlichen Terminal 3 des Frankfurter Flughafens erfolgt durch ein Personen-Transport-System, welches auf einem eigenen Fahrweg verkehrt. Dieser Fahrweg wird in einer vorgespannten Segmentbauweise und trockenen Fugen zwischen den Segmenten realisiert.

Ergebnis und Ausblick

Es ist gelungen, ein funktionsfähiges analytisches Programm für die Bestimmung der notwendigen Vorspannkraft für Bauteile mit beliebigen Querschnittsformen zu entwickeln. Dieses erlaubt erste Gesetzmäßigkeiten zwischen der Vorspannkraft und den geometrischen Querschnittseigenschaften abzuleiten und somit bereits in der Entwurfsphase erste Optimierungsbetrachtungen durchzuführen. Eine experimentelle Validierung bestätigt die Gebrauchstauglichkeit des Programms. Die noch fehlende Berücksichtigung der Querkraftübertragung in der trockenen und geschliffenen Fuge wird in einer Weiterentwicklung des Programms eingearbeitet. Trockenfugen stellen eine innovative Lösung der Fugenausbildung in der Segmentbauweise dar und erlauben eine wirtschaftliche und bauzeitoptimierte Realisierung von Ingenieurbauwerken.

Literaturverzeichnis

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. N. V. Tue und M. Rieger, „Bemessungskonzept PTS-Fahrweg mit trockener Fuge,“ Graz, 2020.
2. *DEUTSCHE NORM DIN 1045: Beton und Stahlbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2008.
3. *DEUTSCHE NORM DIN EN 1992-1-1, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010*, Januar 2011.
4. F. Leonhardt, *Vorlesungen über Massivbau Teil 1 - Grundlagen zur Bemessung im Stahlbetonbau*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1984.
5. J. Dankert und H. Dankert, *Technische Mechanik*, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2011.
6. A. Böge und W. Böge, *Technische Mechanik, Statik - Reibung - Dynamik - Festigkeitslehre - Fluidmechanik*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.

Autor

Angaben zum Autor

- Name: Anneka Seuß

Schulische Ausbildung

- 2015: Abitur, Schiller-Gymnasium in Hof

Akademische Ausbildung

- ab 2018: Universität der Bundeswehr München, Studienrichtung Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, B.Sc.

Berufliche Laufbahn

- 2015 – 2017: Freiwilliger Wehrdienst bei der Marine
- ab 2017: Beginn der Offizierslaufbahn der Marine

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Braml

Universität der Bundeswehr München
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Professur für Massivbau

Leo Lapidus, M.Sc.

Universität der Bundeswehr München
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Professur für Massivbau

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ERWEITERTE IMPERATIVE MODELLPRÜFUNG EIN VISUELLER PROGRAMMIERANSATZ FÜR EINE BENUTZERFREUNDLICHE MVD GENERIERUNG UND VALIDIERUNG

Bachelorarbeit

Felix Sirtl

In den letzten Jahren hat sich innerhalb der Baubranche der Trend zur Digitalisierung verstärkt. Dies hat zu Effizienzsteigerungen, aber auch zu neuen Herausforderungen geführt. So können bei der Nutzung digitaler Gebäudemodelle als primäre Datenquelle vielfältige BIM-Arbeitsabläufe umgesetzt werden. Auf der anderen Seite ist die automatisierte Qualitätskontrolle dieser Modelle eine Herausforderung für Unternehmen. Gründe dafür sind die zugrunde liegenden, komplexen Standards und fehlende Software, die diese Komplexität für Fachanwender intuitiv händelbar macht. Dies führt dazu, dass ein Fachanwender sowohl bei der anwendungsfallbezogenen Datenaufbereitung als auch bei der Überprüfung digitaler Modelle vor große Schwierigkeiten gestellt wird. Ziel dieser Arbeit ist es gewesen einen Prototyp zu entwickeln, der es Fachanwendern erlaubt, die Datenbasis eines Gebäudemodells für einen konkreten Anwendungsfall anzupassen und außerdem Modelle automatisiert zu überprüfen. Um dem Anwender eine intuitive Benutzung der Applikation zu ermöglichen, ist eine Programmiersprache entwickelt worden. Der damit ausgestattete Prototyp bietet dadurch einen generellen Ansatz, um Gebäudemodelle anwendungsbezogen und nach Benutzervorgaben zu filtern und zu validieren.

Keywords: Building Information Modeling, Modellansichtsdefinitionen, automatisierte Qualitätskontrolle

Digitalisierung des Baugewerbes

Die Baubranche befindet sich mitten im Wandel der Digitalisierung. Die Bundesregierung will bei neu zu planenden, öffentlichen Bauprojekten den Einsatz von Building Information Modeling (BIM) verpflichten [1]. Auch mittelständische Unternehmen der Baubranche in Deutschland sehen in digitalen Anwendungen großes Potenzial [2]. BIM beschreibt dabei eine umfassende Methodik zur

Planung, Ausführung und Bewirtschaftung eines Bauvorhabens. Im Zentrum steht ein digitales Modell, das den gesamten Lebenszyklus eines Bauvorhabens abbildet und aus dem gespeicherte Informationen genutzt werden können [3]. Dies sind sowohl geometrische Informationen zur 3-dimensionalen Darstellung als auch semantische Informationen, die von den Kosten und Materialeigenschaften einzelner Bauteile bis hin

zur Berechnung vorhandener Lasten reichen können.

Datenaustausch und -kontrolle

Das Resultat der BIM-Methodik sind digitale Modelle, die aus umfangreichen Datenbeständen bestehen. Für den Austausch von Inhalten zwischen Fachanwendern zu einem bestimmten Zeitpunkt ist ein vollständiger Datentransfer dieser Modelle jedoch ineffizient. Daher wurden Filtermöglichkeiten entwickelt, die es einem Anwender erlauben, den Informationsradius auf für einen spezifischen Prozess relevante Teilbereiche einzugrenzen. Beispielsweise benötigt der Austausch von statischen Eigenschaften eines Gebäudes gänzlich andere Informationen als für eine Kostenkalkulation desselben Modells notwendig wären. Diese Filtermöglichkeiten werden als Modellansichtsdefinitionen (MVD) bezeichnet [4].

Die Fülle an gespeicherten Informationen in einem digitalen Modell hat kontinuierlich zugenommen. Analog zu dieser Entwicklung sind auch die Einsatzmöglichkeiten von MVDs gestiegen. Neben der Festlegung von bestimmten Datensätzen für einen Austausch zwischen Fachexperten werden MVDs mittlerweile für das automatisierte Sicherstellen von Datenqualität verwendet [5]. Ein Beispiel dieser Qualitätskontrolle ist das Überprüfen aller Fenster eines Modells auf einen verpflichtenden Mindestwert des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert). Besitzt ein Modell mehrere hundert Fenster, würde das manuelle Prüfen aller Elemente zu einem unwirtschaftlichen Zeit- und Ressourcenaufwand führen.

Neue Anwendungsfälle sowie eine fortschreitende Erweiterung dieser bewirken, dass Fachanwender vorhandene Funktionen nicht ausnutzen können. Abbildung 1 verdeutlicht die Komplexität und kontraintuitive Programmierung einer MVD-Datei. Vollständige MVD-Dateien bestehen dabei oftmals aus mehreren hundert Zeilen Code.

```
<TemplateRule Parameters="O_PsetName[Value]='Pset_wallCommon'
AND O_PName[Value]='IsExternal'
AND O_PSingleValue[Value]=TRUE"/>
<TemplateRules operator="and">
  <TemplateRule Parameters="T_PsetName[Value]='Pset_wallCommon'
  AND T_PName[Value]='IsExternal'
  AND T_PSingleValue[Value]=TRUE"/>
  <TemplateRules operator="not">
    <TemplateRule Parameters="O_PsetName[Value]='Pset_wallCommon'
    AND O_PName[Value]='IsExternal'"/>
  </TemplateRules>
</TemplateRule>
```

Abb. 1: Auszug einer MVD-Datei, in dem Wände auf Außenwände eingeschränkt werden [adaptiert aus 4]

Resümee des heutigen Stands

MVDs stellen sicher, dass digitale Modelle auf eine benötigte Auswahl an Informationen reduziert werden können. Der Auszug in Abbildung 1 zeigt die Komplexität der Umsetzung. Die Tatsache, dass jeder Austausch von digitalen Gebäudemodellen auf Basis von Einschränkungen vorgenommen wird, verdeutlicht hingegen die Notwendigkeit in der Praxis. Zahlreiche Forschungsprojekte über die MVD-Thematik unterstreichen die Relevanz [6,7,8]. Die Betrachtung dieser Arbeiten zeigt, dass Funktionen, wie die automatisierte Validierung von Daten eines Gebäudemodells, mit besonderem Augenmerk bedacht werden. Im Rahmen meiner Bachelorarbeit habe ich ein Konzept entwickelt, das dem Fachanwender auf intuitive Weise erlauben soll, digitale Modelle zu filtern und die Qualität der gefilterten Daten zu überprüfen. Die Realisierung des erarbeiteten Konzepts erfolgt mittels eines Prototyps. Dieser kann erfolgreich die Daten digitaler Gebäudemodelle filtern und überprüfen.

Extended Imperative Model Checking

Der Bedarf in der Praxis und die zeitgleich komplizierte Umsetzung sind die primäre Motivation für die Entwicklung einer neuen Herangehensweise für die MVD-Methodik gewesen. Das entwickelte Extended Imperative Model Checking (EIMC-) Konzept basiert dabei auf einem imperativen Programmierparadigma, welches eine intuitivere Nutzung als die Variante des MVD-Formats gewährleisten soll. Dafür werden die Funktionen in einem Filterungs- und einem Überprüfungsbereich abgebildet. Die Filterung reduziert die Datenbasis eines Modells

auf einen konkreten Anwendungsfall. Die Überprüfung kann die Datenkonsistenz der im Filterungsteil ausgewählten Elemente daraufhin in gewünschter Weise automatisiert kontrollieren.

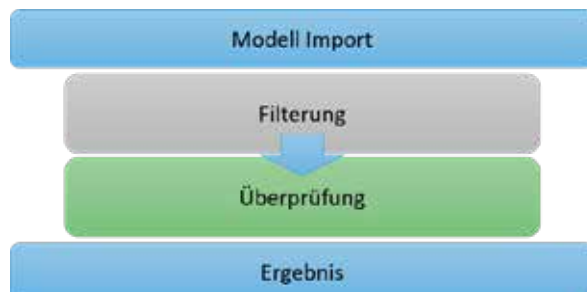


Abb. 2: Schematische Darstellung des EIMC-Konzepts

Grundlagen der Programmierung

Die Umsetzung des Konzepts basiert auf der open-source Anfragesprache QL4BIM [9]. Diese ermöglicht es einem Anwender digitale Gebäudemodelle zu analysieren. So können mit kurzen Anweisungen Abfragen erstellt werden. Das Beispiel in Auflistung 1 zeigt, wie mit zwei Zeilen QL4BIM-Code ein Modell importiert und eine Reduzierung mittels des TypeFilter-Operators auf alle Wandelemente eines Modells vorgenommen werden kann.

```

1 entities = ImportModel ( "C:\Testmodel.ifc" )
2 walls = TypeFilter ( entities is IfcWall)
  
```

Auflistung 1: Beispiel einer Abfrage in QL4BIM, die alle Wände eines Modells selektiert [5]

EIMC-Konzept

QL4BIM als Grundlage habe ich dahingehend erweitert, dass eine Validierung von Datensätzen ermöglicht werden kann. Dies wird mit verschiedenen neu implementierten Operatoren bewerkstelligt. Diese überprüfen geforderte Wertzuweisungen in den entsprechenden Datenstrukturen. Der konzipierte XCheck-Operator ermöglicht beispielsweise eine Überprüfung der Werte von Eigenschaften und Attributen eines Modells. Auflistung 2 zeigt ein Beispiel der EIMC Programmierung. In Zeile 1

wird zunächst die zu untersuchende Datei ausgewählt. In Zeile 2 wird das ausgewählte Modell auf Elemente des Typs Wand hin gefiltert. Mit dem neu entwickeltem XCheck-Operator wird daraufhin in Zeile 3 überprüft, ob der U-Wert kleiner als 1.3 ist.

```

1 entities = ImportModel ( "C:\Testmodel.ifc" )
2 wall = TypeFilter ( entities is IfcWall )
3 a = XCheck ( wall.ThermalTrancemittance < 1.3,
  "PSet_WallCommon" )
  
```

Auflistung 2: Beispiel einer Abfrage in EIMC, die alle selektierten Wände auf den Wärmeübergangskoeffizienten überprüft

Prototyp EIMC-VP

Um das Ziel einer hohen Nutzerfreundlichkeit gewährleisten zu können, habe ich eine Applikation erstellt. Der Prototyp EIMC-VP nutzt visuelle Programmierung, um dem Anwender das Erstellen syntaktisch korrekter Abfragen zu erleichtern. Zudem ermöglicht er eine direkte Ausführung der erstellten Abfrage an einem Gebäudemodell. Das Zusammenstellen von einzelnen Blöcken (siehe Abbildung 3) repräsentiert dabei eine Abfrage des EIMC-Codes. Die Benutzeroberfläche des Prototyps wurde mithilfe der Programmibliothek Blockly [10] erstellt. Diese erleichtert es, eine eigene visuelle Programmiersprache zu kreieren, in der anstelle von textuellem Programmcode Blöcke zur Generierung von Programmelementen verwendet werden [10].

Anwendungsfall

Aus einer Auswahl an verschiedenen Blöcken kann der Nutzer eine Abfrage erstellen. Die einzelnen Blöcke sind dabei so implementiert, dass eine Aneinanderreihung syntaktisch inkorrektur Blöcke nicht möglich ist. Abbildung 3 zeigt die Benutzeroberfläche des Prototyps. Verschiedene Kategorien beinhalten eine thematisch sortierte Auswahl an Blöcken, aus welchen die Beispielsabfrage in Abbildung 3

erstellt ist. Der „Modell-Import“-Block ermöglicht den Zugriff auf eine digitale Modelldatei. Die zwei folgenden Filterungsblöcke dienen zur Filterung des Modells. Der erste Filterungsblock selektiert alle Fenster des Modells. Der zweite Filterungsblock selektiert unabhängig von der ersten Filterung alle Außenwände des Gebäudes. Alle gefilterten Elemente werden daraufhin in der Überprüfung auf die geforderten Werte hin kontrolliert. In unserem Fall wird überprüft, ob jedes Fenster einen U-Wert kleiner oder gleich 1.3 besitzt und jede Außenwand kleiner oder gleich 0.24. Fenster oder Außenwände, die einen abweichenden U-Wert besitzen, werden nach der Ausführung der Überprüfung in einer Textdatei mit einer eindeutig zuordenbaren Identifikationsnummer gespeichert und können über den „Report File“-Button heruntergeladen werden.

Nutzen in der Baubranche

Das Arbeiten mit einem digitalen Gebäudemodell ist für viele, insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen der Baubranche noch immer eine neue Erfahrung und Herausforderung [1,2]. Daher ist es wichtig, Funktionen zur Datenreduktion und Qualitätssicherung benutzerfreundlich anbieten

zu können. In der Praxis kann die Applikation vielfältig eingesetzt werden. Mitarbeiter eines Unternehmens können beispielsweise ihre eigene Arbeit, die eingehenden Daten eines externen Zulieferers oder ausgehende Daten, die das Unternehmen für Unteraufträge oder nachgelagerte Aufgaben verlassen, überprüfen und somit Fehlerquellen minimieren.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Konzept von EIMC soll dem Anwender eine benutzerfreundliche Kontrolle der Datenqualität in einem digitalen Gebäudemodell ermöglichen. Der Prototyp EIMC-VP vereinfacht die textuelle Programmierung von Modellansichten durch den Gebrauch einer visuellen Programmierung. Die Applikation kann genutzt werden, um automatisierte Validierungen an Gebäudemodellen durchzuführen. Zum heutigen Zeitpunkt können zahlreiche Abfragen und entsprechende Check-Berichte erstellt werden. Weitere Implementierungen sehen eine Vereinfachung des Vokabulars vor, so dass neben „Wärmedurchgangskoeffizient“ beispielsweise auch „U-Wert“ und „Wärmedämmwert“ eingegeben werden können.

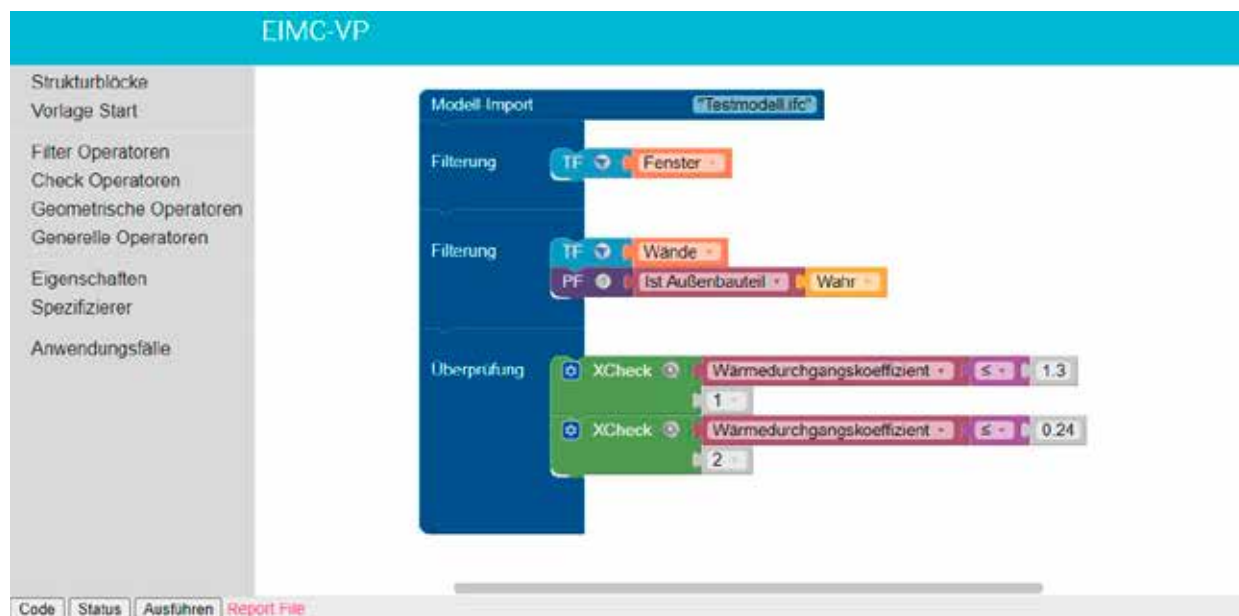


Abb. 3: Arbeitsbereich des Prototyps EIMC-VP mit einer erstellten Abfrage

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte und für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2015). *Stufenplan Digitales Planen und Bauen*. Verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile
- [2] Mittelstand-Digital. (2018). *Digitalisierung der mittelständischen Bauwirtschaft in Deutschland - Statusevaluation und Handlungsempfehlungen*. Verfügbar unter: https://kommunikation-mittelstand.digital/content/uploads/2018/10/Status-Quo_Digitalisierung_Bauwirtschaft.pdf.
- [3] Borrmann, A., König, M., Koch, C. & Beetz, J. (Hrsg.) (2015). *Building Information Modeling Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden: Springer-Verlag.
- [4] buildingSMART. (2021). *Model View Definition (MVD) - An Introduction*. Verfügbar unter: <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/mvd/>.
- [5] Chipman, M., Liebich, T. & Weise, M. (2016). *mvdXML: Specification of a standardized format to define and exchange Model View Definitions with Exchange Requirement and Validation Rules*. Verfügbar unter: https://standards.buildingsmart.org/MVD/RELEASE/mvdXML/v1-1/mvdXML_V1-1-

Abbildung 3: Arbeitsbereich des Prototyps EIMC-VP mit einer erstellten Abfrage

- [6] Abualdenien, J. & Borrmann, A. (2019). A meta-model approach for formal specification and consistent management of multi-LOD building models. *Advanced Engineering Informatics*, 40, 135–153. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.04.003>
- [7] Zhang, C., Beetz, J. & Weisen, M. (2015). Interoperable validation for IFC building models using open standards. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 20(2), 24-39.
- [8] Baumgärtel, K., Pirnbaum, S., Pruvost, H. & Scherer, R. (2016). Automatic BIM filtering using Model View Definitions. *In CIB W78 conference*, Brisbane, Australia.
- [9] Daum, S. (2018). *Konzeption einer raum-zeitlichen Anfragesprache für die Analyse und Prüfung von 4D-Gebäudeinformationsmodellen*. (Doctoral dissertation, Technische Universität München).
- [10] Blockly. (2021). *Introduction to Blockly*. Verfügbar unter: <https://developers.google.com/blockly/guides/overview>.

Autor

Sirtl Felix, Bachelor of Science, Technische Universität München, Masterstudent im Fachbereich Bauingenieurwesen an der Technischen Universität München

Seit 2020	Masterstudent des Bauingenieurwesens an der TU München
Seit 2019	Werkstudent bei der Softwarefirma thinkproject
2016 - 2020	Bachelorstudent des Umweltingenieurwesens an der TU München
2015	Erlangen der Hochschulreife am Karls gymnasium Bad Reichenhall
1996	Geburt in Bad Reichenhall

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation an der Technischen Universität München, Prof. André Borrmann. Die Betreuung erfolgte durch M.Sc. Jimmy Abualdenien. Die Bachelorarbeit ist in Kooperation mit der Firma thinkproject entstanden. Besonderer Dank gilt dabei dem zweiten Betreuer der Bachelorarbeit Dr. Simon Daum.

Die Arbeit wurde mit dem 1. Preis ausgezeichnet.

INGENIEURTECHNISCHE GRUNDLAGEN FÜR DIE AUSBILDUNG VON EINSATZKRÄFTEN ZUR TECHNISCHEN RETTUNG BEI VERSCHÜTTUNGSUNFÄLLEN IM TIEFBAU

Bachelorarbeit

Hannes Nicolas Valentin

Unfälle auf Baustellen sind im Baugewerbe keine Seltenheit. Neben Personenschäden gibt es deutschlandweit jährlich auch immer wieder Todesfälle bei derartigen Unfällen zu beklagen. Sowohl für das Baustellenpersonal als auch für die zur Rettung eingesetzten Einsatzkräfte stellen solche Szenarien trotzdem eine Ausnahmesituation dar. Als besonders komplex gelten Verschüttungsunfälle bei Tiefbauarbeiten, denn die fehlende Erfahrung und das nicht vorhandene Fachwissen im Bereich des Tiefbaus sowie der Geotechnik stellen Einsatzkräfte bei einem Verschüttungsunfall vor enorme Herausforderungen. Insbesondere zwei Faktoren führen oftmals zu einer erheblichen Eigengefährdung der Rettungskräfte: Die Fehleinschätzung der Standsicherheit des anstehenden Bodens und eine nicht ausreichende Sensibilisierung für die besonderen Gefahren, die Rettungsmaßnahmen im Tiefbau mit sich bringen. Für diese Problematik gibt es hierzulande allerdings kaum Fachliteratur, die sich mit der technischen Rettung bei Verschüttungsunfällen im Tiefbau beschäftigt. Deshalb ist es nötig, entsprechendes ingenieurtechnisches Wissen für die Ausbildung von Rettungskräften bei derart komplexen Einsätzen zu erarbeiten und letztlich auch zur Verfügung zu stellen.

Keywords: Baustellen, Unfälle, Verschüttungsunfälle im Tiefbau, Tiefbauunfall, Verbau, Einsatzkräfte, Rettungskräfte, Ausbildung

Unfallgeschehen im Tiefbau

Die Gesamtunfallzahlen und die Unfallwahrscheinlichkeit in der Tiefbaubranche sind im Vergleich zu anderen Fachrichtungen des Bauhauptgewerbes zwar deutlich geringer, jedoch darf insbesondere bei Verschüttungs-

unfällen im Tiefbausektor die Schwere der Unfallfolgen für die Betroffenen nicht außer Acht gelassen werden [1]. Deutschlandweit lässt sich im Betrachtungszeitraum von Januar 2017 bis November 2019 mit einem Anteil von 79 Prozent die Verschüttung von Personen in Gräben und

Baugruben als Hauptunfallursache im Tiefbau-sektor ausmachen [2]. Dabei forderten derartige Verschüttungsunfälle in diesem Zeitraum deutschlandweit sieben Menschenleben [2].

52 Prozent aller Verschüttungsunfälle sind auf die Baustellenörtlichkeit „Graben“ zurückzuführen [2]. In der Regel werden Personen in Gräben von 0,90 m bis 5,00 m Tiefe verschüttet [2]. Im Mittel ereignen sich Verschüttungsunfälle in einem Graben mit 2,20 m Tiefe [2].

Aufgrund der stumpfen Krafteinwirkung durch die Erdmasse, die durch den Verschüttungsmechanismus auf den Körper wirkt, sind oftmals diverse Frakturen oder Verletzungen von Organen zu erwarten. Diese gehen zumeist mit einem erheblichen Blutverlust von 1500 ml bis 5000 ml einher [3]. Zum Vergleich: Im Körper eines 70 kg schweren Erwachsenen zirkulieren zirka 5000 ml Blut [4]. Folglich muss bei einer Verschüttungshöhe eines aufrechtstehenden Arbeiters ab dem Oberschenkel von einem potenziell lebensbedrohlichen Verletzungsmuster ausgegangen werden.

Ausgangssituation der Einsatzkräfte

Aufgrund der geringen Einsatzzahlen bei derartigen Unfällen mangelt es den Einsatzkräften an Erfahrung bei der Rettung von Verschütteten nach einem Tiefbauunfall. Zudem stellt ein Verschüttungsunfall im Tiefbau ein enorm anspruchsvolles Einsatzszenario dar. Dies birgt auch ein hohes Maß an Risiken und Gefährdungen für die Einsatzkräfte vor Ort. Des Weiteren mangelt es den Einsatzkräften oftmals an geotechnischem Grundwissen, was eine Fehleinschätzung der Gefährdungslage zur Folge haben kann.

Hinzu kommt die fehlende Sensibilität aufgrund weniger Erfahrungswerte bei derartigen Rettungsfällen, was oft dazu führt, dass Einsatzkräfte bei der Rettung eines Verschütteten unbewusst eine zu hohe Eigengefährdung in Kauf nehmen. Um die Retter für die Gefahren bei Tiefbauunfällen zu sensibilisieren, wären

entsprechende fachliche Ausbildungsunterlagen vonnöten, an denen es hierzulande allerdings mangelt.

Geotechnisches Grundwissen für Ausbilder von Einsatzkräften

Den Ausbildern von Einsatzkräften soll mit dieser Bachelorarbeit ein breites geotechnisches Grundwissen an die Hand gegeben werden, um künftig eine fundierte Ausbildung und entsprechende Gefahrenabschätzung zu ermöglichen.

Eine entscheidende Bedeutung nimmt hierbei die Benennung und Klassifizierung der Böden nach der DIN EN ISO 14688-1:2020-11 ein. Vor allem die Feldversuche nach DIN EN ISO 14688-1:2020-11 zur Bestimmung von plastischen Eigenschaften von feinkörnigen Böden und grobkörnigen Böden mit feinkörnigen Nebenbestandteilen sind zur Einschätzung des anstehenden Bodens im Einsatzverlauf heranzuziehen. Die genannten Feldversuche eignen sich insbesondere durch die einfache und schnelle Durchführbarkeit. Dabei sollen vornehmlich die Eigenschaften der Böden (z. B. Konsistenz) ermittelt werden, die für dessen Standfestigkeit maßgebend sind.

Kenntnisse über die Bodenklassifizierungen nach DIN 18196:2011-05 sind für Ausbilder von Einsatzkräften ebenfalls von Bedeutung, da diese normativen Vorgaben einen schnellen Überblick ermöglichen, wenn es um die Bestimmung von Eigenschaften bestimmter Bodengruppen geht.

Von den aufgeführten Eigenschaften der DIN 18196:2011-05 sind vor allem die Scherfestigkeit, die Durchlässigkeit, die Wichte, die Erosionsempfindlichkeit und unter Umständen die Zusammendrückbarkeit und die Frostempfindlichkeit für den Anwendungsfall heranzuziehen.

Dabei wird zur Gefahrenabschätzung im Einsatzverlauf die Benennung und Klassifizierung des Bodens mit Hilfe der DIN EN ISO 14688-1:2020-11, insbesondere durch Feldversuche, in Kombination mit der Unterscheidung von bindigen und nicht bindigen Böden nach DIN 1054:2010-12 präferiert. Für die schnelle Abschätzung der Eigenschaften des angesprochenen Bodens empfiehlt sich zusätzlich die Anwendung einer vereinfachten Darstellung der Tabelle 4 aus der DIN 18196:2011-05. Aus dieser können charakteristische Eigenschaften der einzelnen Bodengruppen entnommen werden, die dann zur Gefahrenabschätzung im Einsatzverlauf herangezogen werden können.

Erddruckkräfte

Die wirkenden Erddruckkräfte auf einen Rettungsverbau lassen sich im Feld nur sehr schwer abschätzen. Deshalb sollten Einsatzkräfte dahingehend geschult werden, auf welche Verbauvarianten im Ernstfall zurückgegriffen werden kann. Dabei sind jene Varianten zu bevorzugen, die auf die speziellen Anforderungen im Tiefbau abgestimmt und entsprechend (erd-)statisch ausgelegt sind.

Für die Dimensionierung eines Rettungsverbaus sollte der aktive Erddruck angesetzt werden. In Anlehnung an die DIN 1055-2:2010-11 wird daher folgendes angesetzt: Bodengruppe TA (ausgeprägt plastischer Ton), Reibungswinkel $\varphi = 15^\circ$, Wichte $\gamma = 19,5 \text{ kN/m}^3$. Alle anderen Parameter werden so gewählt, dass diese Unsicherheiten bei der Einschätzung des anstehenden Bodens im Feld und der Einwirkung ungünstiger Einflüsse (z. B. Oberflächenlasten) Rechnung tragen.

Diese, in der Regel auf der sicheren Seite liegenden, Annahmen zur Dimensionierung eines Rettungsverbaus sind nötig, um einen sicheren Einsatz an einer Vielzahl von Einsatzorten gewährleisten zu können.

Einsturzarten von Grabenwänden

Das Versagen eines während des Bauablaufs eingebrachten Verbaus infolge Überlastung durch den wirkenden Erddruck ist nicht die Hauptunfallursache für Verschüttungsunfälle im Tiefbau [2]. Als Hauptunfallursache lässt sich vielmehr das *Versagen einer Grabenwand* ausmachen [2]. Was umgangssprachlich als „Einsturz der Grabenwand“ bezeichnet wird, ist aus ingenieurtechnischer Sicht ein hochkomplexes Thema und beruht im Allgemeinen auf einer nicht ausreichenden Böschungsstandsicherheit [5]. Dies führt dazu, dass ein Gleitkörper entlang einer sich ausbildenden Gleitfuge abrutschen kann [5].

Der eigentliche Böschungsbruch erfolgt in einer Vielzahl der Fälle lautlos und ohne Ankündigung durch Rissbildung o. Ä. [5]. Durch die senkrechten Graben- oder Grubenwände bildet sich zumeist eine böschungsparellele Gleitfuge (vgl. Abb. 6) aus, wodurch das Abrutschen des Gleitkörpers eher einem Abkippen gleicht [5].



Abb. 6: Lokaler Böschungsbruch mit annähernd böschungspareller Gleitfuge [2]

Insbesondere Witterungseinflüsse oder das Vorherrschen von Verfüllungen und Auffüllungen können sich negativ auf die Böschungsstandsicherheit auswirken.

Einsatztaktik

Tiefbauarbeiten bergen ein hohes Gefahrenpotential. Bei einem Böschungsbruch können durch abrutschende Gleitkörper freiliegende oder kreuzende Medienleitungen beschädigt werden. Dabei geht insbesondere von Gasleitungen, Abwasserleitungen, Fernwärmeleitungen, Telekommunikationsleitungen und spannungsführenden Leitungen eine enorme Gefährdung aus. Bei mechanischen Beschädigungen solcher Medienleitungen können daraus nicht nur Verletzungs- und Gesundheitsgefahren resultieren, sondern auch die Böschungsstandsicherheit negativ beeinflusst werden. Nicht außer Acht gelassen werden sollte zudem die Gefährdung durch herabfallende Gegenstände und die Absturzgefahr an der Böschungskante.

Oberflächenlasten wirken einerseits destabilisierend auf die Böschungsstandsicherheit, andererseits erzeugen sie einen Zusatzdruck. Bei Rettungsmaßnahmen sollten deshalb Oberflächenlasten vermieden werden. Als Ableitung der DIN 4124:2012-02 im Themenbezug wird empfohlen: Werden zur Rettung Gerätschaften und/oder Fahrzeuge eingesetzt, ist sowohl bei verbauten als auch bei unverbauten Gräben oder grabenähnlichen Baugruben unabhängig vom Gesamtgewicht oder der Oberflächenbefestigung ein Abstand von $\geq 2,00$ m zur Graben- oder Böschungskante einzuhalten. Im Bereich von $\leq 0,6$ m sind beim Betreten der Graben- oder Böschungskante zusätzliche lastverteilende Maßnahmen vorzusehen.

Rettungsverbau

Nachdem ein Böschungsbruch stattgefunden hat, sind die angrenzenden Graben- und Grubenwände (senkrechte Böschung) grundsätzlich als nicht standsicher zu bewerten. Damit sind Gräben oder grabenähnliche Baugruben während der Rettungsmaßnahmen schon bei geringen Tiefen konsequent zu verbauen.

Als Rettungsverbau eignen sich vor allem ein senkrechter Verbau in Anlehnung an den senkrechten Normverbau oder der Einsatz von randgestützten Grabenverbauern. Der Einsatz von mittig gestützten Grabenverbauern oder mittig gestützten Verbautafeln wird aus ingenieurtechnischer Sicht nicht empfohlen.

Der Einsatz von randgestützten Grabenverbauern wird vor allem durch den Zeitvorteil gegenüber eines senkrechten Verbaus empfohlen. Aufgrund des Transport- und Einbauaufwandes klassischer randgestützter Grabenverbauern wird der Einsatz von Alu-Leichtverbausystemen präferiert.

Fazit

Der Faktor Zeit ist bei der Rettung eines Verschütteten der entscheidende Aspekt. Eine ausführliche Bodenansprache ist daher während des Einsatzverlaufes nicht durchführbar. Aus diesem Widerspruch ergibt sich jedoch der Leitsatz, den diese Bachelorarbeit herausstellen soll: Einsatzkräfte müssen so ausgebildet werden, um mit möglichst geringem Zeitaufwand die Haupteigenschaften des anstehenden Bodens ermitteln und daraus auf mögliche Gefahren für die Einsatzkräfte schließen zu können.

Aus der Einschätzung des Bodens und der Örtlichkeit muss durch die Einsatzkräfte die geeignetste Verbauvariante gewählt werden. Von besonderer Bedeutung ist dabei die vorherige Ausbildung der Einsatzkräfte, um im Einsatzfall trotz des Zeitdrucks eine sichere Ausführung des Rettungsverbaus gewährleisten zu können.

Fach- und Einsatzkräfte in den USA beschäftigten sich in den vergangenen Jahren ebenfalls mit Verschüttungsunfällen im Tiefbau. Daher sollten künftig Untersuchungsergebnisse und Erkenntnisse ausgetauscht und verglichen werden.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Kallache, M.: Schriftliche Mailauskunft, Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau), Berlin, Oktober (2020).
- [2]: Münch, V.: Das Unfallgeschehen bei Arbeiten in und an Baugruben und Gräben. Verschüttung, Absturz und herabfallende lose Gegenstände als Hauptunfallursachen, BauPortal. Fachmagazin der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (2020) 1, 36–39.
- [3]: Luxem, J., Runggaldier, K., Karutz, H., et al.: Notfallsanitäter heute. 6. Auflage, Elsevier. Urban & Fischer, München (2016) 1298 S.
- [4]: Huch, R., Jürgens, K.: Mensch, Körper, Krankheit. Anatomie, Physiologie, Krankheitsbilder. 8. Auflage, Elsevier. Urban & Fischer, München (2016) 512 S.
- [5]: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hrsg.): BAW-Merkblatt. Dammspektion (MDI). Ausgabe 2017, veröffentlicht durch die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe (2017), 6–44.
- [6]: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.): DIN 18196:2011-05. Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Berlin (2011) 13 S.
- [7]: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.): DIN EN ISO 14688-1:2020-11. Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2018). Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2018, Berlin (2020) 40 S.
- [8]: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.): DIN 1054:2010-12. Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1, Berlin (2010) 105 S.
- [9]: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.): DIN 1055-2:2010-11. Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Bodenkenngrößen, Berlin (2010) 12 S.
- [10]: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.): DIN 4124:2012-02. Baugruben und Gräben – Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten, Berlin (2012) 44 S.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.): DIN 4124:2012-02. Baugruben und Gräben – Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten, Berlin (2012) 44 S.
2. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.): DIN 18196:2011-05. Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Berlin (2011) 13 S.
3. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.): DIN EN ISO 14688-1:2020-11. Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2018). Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2018, Berlin (2020) 40 S.
5. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (Hrsg.): DGUV Regel 101-604. Branche Tiefbau, veröffentlicht durch die Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau), Berlin (2019a), 175 S.

Autor

Hannes Nikolas Valentin wurde 1998 in Kulmbach geboren. Im Juni 2017 erwarb der Autor die Fachhochschulreife in der technischen Ausbildungsrichtung an der Adalbert-Raps-Schule in Kulmbach. Im Anschluss daran begann Hannes Nikolas Valentin im Oktober 2017 das Studium im Bachelor-Studiengang „Allgemeines Bauingenieurwesen“ an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg, das er voraussichtlich im Wintersemester 2020/2021 abschließen wird. Während des Studiums war er durchgängig als Werksstudent in verschiedenen Fachrichtungen tätig. Seit März 2020 ist Hannes Nikolas Valentin in einem Kulmbacher Rohrleitungsbauunternehmen beschäftigt.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt im Studiengang Bauingenieurwesen an der Fakultät Design der Hochschule Coburg. Fachlich betreut wurde die Bachelorarbeit von Herrn Prof. Dr. Egbert Keßler.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

MIT DIGITALEN TOOLS ZU EINEM ZUKUNFTSORIENTIERTEN BRÜCKENBAU - ENTWICKLUNG EINES BIM-BASIERTEN GESAMTMODELLS ZUR UNTERSTÜTZUNG DER ENTWURFS- UND GENEHMIGUNGSPLANUNG EINGLEISIGER BAHNBRÜCKEN IN FERTIGTEILBAUWEISE IN ANLEHNUNG AN DIE EISENBAHNÜBERFÜHRUNG BEI BURGHEIM

Masterarbeit

Timur Weilbach-Eyüboğlu

In Rahmen der Masterarbeit „Mit digitalen Tools zu einem zukunftsorientierten Brückenbau“ wird ein digitales parametrisiertes Gesamtmodell einer in Fertigteilbauweise geplanten Eisenbahnüberführung erstellt. Anhand des Modells wird es möglich, standardisierte Brückenbauwerke in Fertigteilbauweise mit frei wählbaren Abmessungen vollautomatisch zu generieren und im Rahmen eines BIM-Prozesses abzubilden, zu planen und umzusetzen. Das Modell ist für alle am Projekt Beteiligten zugänglich, verwaltbar und dient zur Generierung des Bauwerksplans, zur Massenermittlung und kann auch zur statischen Bemessung herangezogen werden. Die Masterarbeit zeigt auf, wie Prozesse im Bauwesen durch die Kombination der BIM-Methode und der Fertigteilbauweise zukünftig optimiert werden können.

Die Digitalisierung prägt zunehmend unsere Alltags- und Arbeitsstrukturen. Auch vor dem Bauwesen machen diese Veränderungen nicht halt. Die Entwicklung neuer Technologien und Verfahren schreitet rasant voran und eröffnet zahlreiche Chancen. Die Umstellung auf digitale Methoden stellt einerseits Betriebe vor Herausforderungen, andererseits bietet die Digitalisierung beim Planen und Bauen großes Potenzial.

BIM – Building Information Modeling

Die BIM-Methode ist eine softwaregestützte, kooperative Arbeitsweise, welche die Vorteile der Digitalisierung nutzen möchte. Sie eröffnet die Möglichkeit, dass die Bereiche Ideenentwicklung, Planung, Bauausführung, Verwaltung und Nutzung gemeinsam an einem digitalen Gesamtmodell eines Projekts arbeiten. Dieses soll alle Informationen zu einem Bauwerk erfassen, verknüpfen und für alle am Projekt beteiligten Personen verwaltbar machen. BIM

verspricht nicht nur eine deutliche Effizienzsteigerung, sondern auch einen hohen Qualitätsstandard. [1]

Vorteile der Fertigteilbauweise

Bei der Fertigteilbauweise wird der überwiegende Teil der notwendigen Bauteile in einem Fertigteilwerk hergestellt. So entfallen mögliche negative Einflussfaktoren wie Wetter, Außentemperaturen oder lagespezifische Einschränkungen (wie enge Zufahrten, wenige Lagerflächen). Für das Bauvorhaben bedeutet der Einsatz von Fertigteilen optimale Qualität und zeitliche Planungsmöglichkeiten.

Die Stärken der Fertigteilbauweise sind insbesondere bei den Projekten im Bereich des Brückenbaus von Eisenbahnüberführungen erkennbar. Um im Zuge einer Gleistrasse ein Brückenbauwerk zu erstellen, ist die Sperrung des Gleisabschnittes notwendig. Ziel ist, diese Sperrzeiten auf ein Minimum zu reduzieren, um schnellstmöglich wieder einen fließenden Zugverkehr zu gewährleisten. Fertigteilbrücken bieten den Vorteil, dass die benötigten Bauteile termingerecht geliefert und mit geringem Zeitaufwand montiert werden können und führen somit zu einem großen Gewinn hinsichtlich des Zeitaufwandes sowie der durch Sperrungen entstehenden Kosten.

Einsatz von BIM im Fertigteilbau

Die Prozessabschnitte für die Herstellung von Fertigteilbrücken sind gut planbar und mit der BIM-Arbeitsweise kombinierbar. Sobald die Freigabe der Bemessung und die fertigen Konstruktionszeichnungen im Modell hinterlegt sind, können Betreiber von Fertigteilwerken auf das Modell zugreifen und die Informationen direkt an Bewehrungsroboter zur Verlegung der Bewehrung und Vorbereitung der Betonage übermitteln. Für Projekte wie Fertigteilbrückenbauwerke ist die Arbeitsweise mit BIM ideal, weil es sich um Brückenbauwerke mit vergleichsweise geringem Schwierigkeitsgrad

handelt und sich die Prozessschritte recht zügig abwickeln lassen.

Entwicklung eines parametrisierten Gesamtmodells

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein digitales parametrisiertes Gesamtmodell einer Eisenbahnüberführung in Fertigteilbauweise konzipiert.

Die Software *Revit*, in deren Rahmen das parametrisierte BIM-basierte Gesamtmodell generiert wird, eröffnet Möglichkeiten für eine zwei- sowie dreidimensionale Arbeitsweise. Das Programm bietet die nötigen Werkzeuge für alle Bereiche der Planungsabwicklung von Bauvorhaben, von der Modellierung komplexer geometrischer Querschnitte bis zur Erstellung eines Bewehrungsplanes [2]. Programmiert wird visuell in dem in *Revit* enthaltenem Add-In *Dynamo*.

Zielsetzung ist, das Grundmodell als Ausgangspunkt für weitere Brückenbauwerke nutzen zu können. Durch die Angabe der globalen Parameter eines Brückenbauwerks (z. B. Länge, Breite oder Schiefwinkligkeit) im *Dynamo Player* (s. Abb. 1) werden die Brückenbestandteile generiert, zu einem Modell zusammengefügt und der Bauwerksplan erzeugt. Die Brückenbestandteile werden durch elf einzelne programmierte Module (z. B. Brückengeometrie: s. Abb. 2 etc.) errechnet. In Abbildung 2 werden die komplexen Zusammenhänge bei der Modul-Erstellung ersichtlich.



Abb. 1: Steuermaske der globalen Parameter, hier: 02 – Brückengeometrie im Add-In *Dynamo Player*

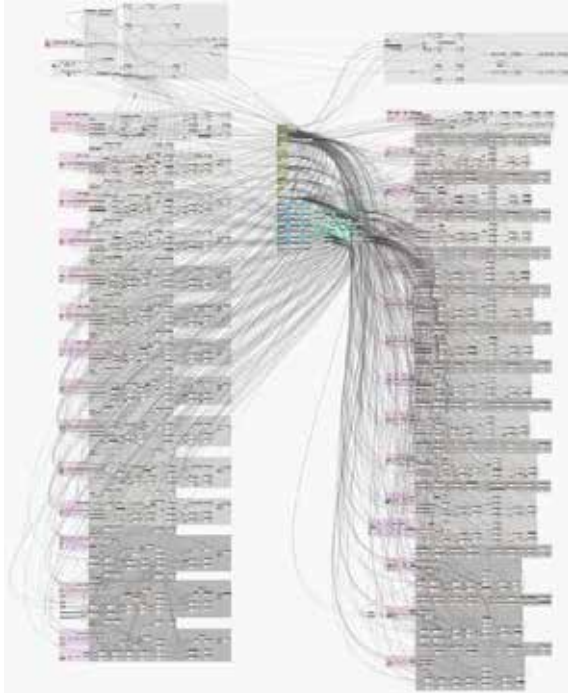


Abb. 2: Übersicht über Bestandteile des Moduls: 02 – Brückengeometrie im Add-In *Dynamo*

Das Gesamtmodell wird als Volumenmodell erstellt, welches zur Generierung des Bauwerksplanes und zur Massenermittlung herangezogen wird (s. Abb. 3).

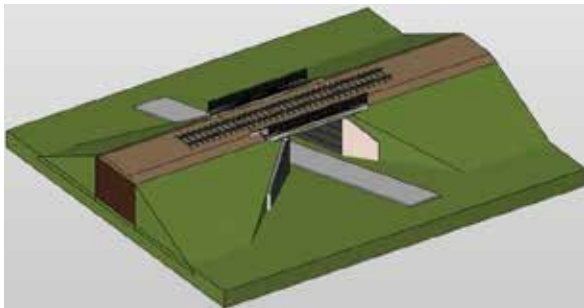


Abb. 3: 3D-Gesamtmodell

Aus dem Gesamtmodell werden die maßgebenden Ansichten, Schnitte und schließlich Pläne vollautomatisch erzeugt, welche insbesondere für die Leistungsphasen 3 und 4 des Leistungsbildes Objektplanung für Ingenieurbauwerke und Verkehrsanlagen von Bedeutung sind (z. B. Längsschnitt C-C: s. Abb. 4., Grundriss Überbau: s. Abb. 5, Grundriss Widerlager: s. Abb. 6). Es werden also ein fertiger Bauwerksplan (Übersicht s. Abb. 7) und ein Gesamtmodell, welches alle grundlegend

wichtigen Informationen für die weiteren Prozessphasen beinhaltet, erstellt.

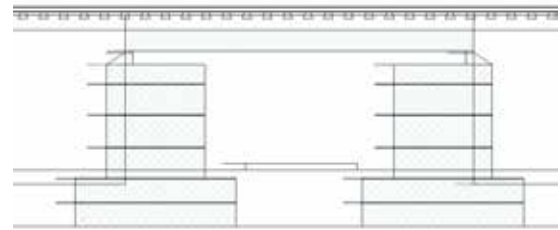


Abb. 4: Längsschnitt C-C

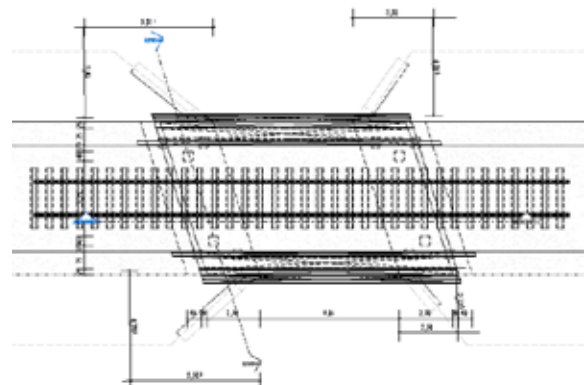


Abb. 5: Grundriss OK FT Überbau

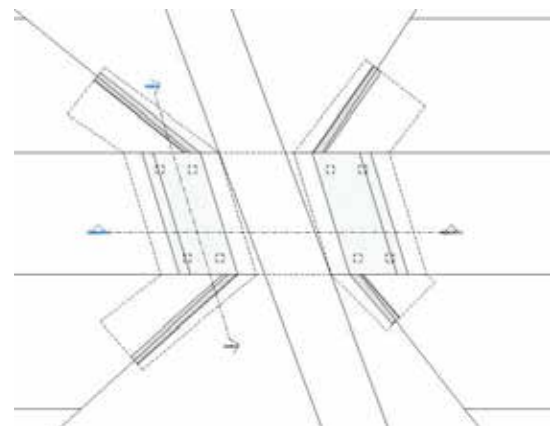


Abb. 6: Grundriss OK FT Widerlager

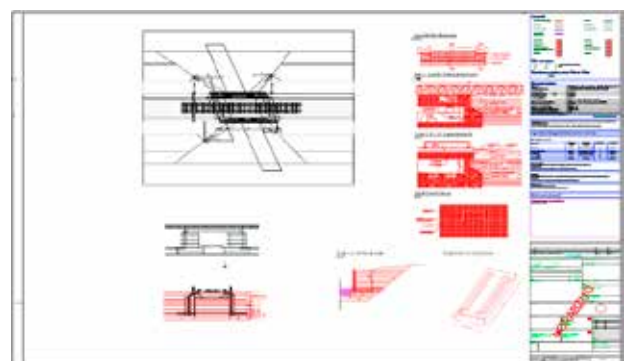


Abb. 7: Automatisch erzeugter Bauwerksplan

Schnittstelle zur Statik

Des Weiteren wird bei der Modellierung automatisch ein Berechnungsmodell miterzeugt (s. Abb. 8). Letzteres wird für die Übertragung an die Software *SOFiSTiK* verwendet, um eine statische Bemessung durchführen zu können. Im Rahmen der Masterarbeit wird die Schnittstelle zur *SOFiSTiK* erzeugt und deren Funktionsfähigkeit bewiesen (s. Abb. 9).

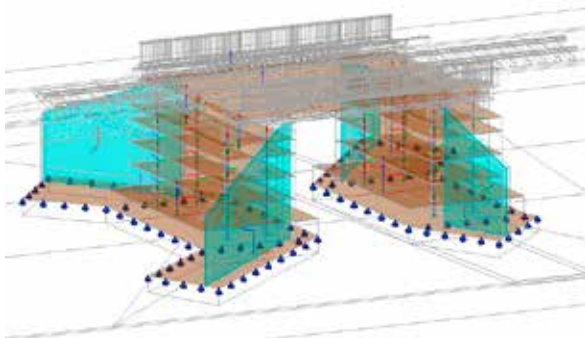


Abb. 8: 3D-Berechnungsmodell mit Flächenlagerung

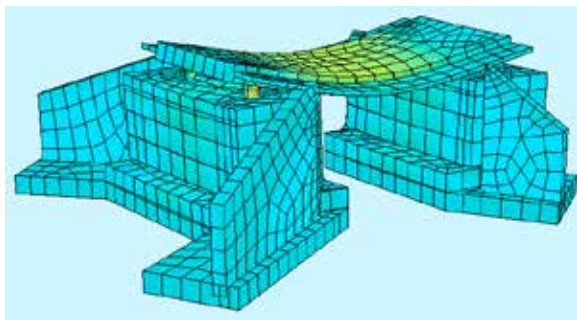


Abb. 9: SOFiSTiK: Darstellung der Verformung infolge Konstruktionseigengewicht

Im Anschluss ist es möglich, Ergebnisse der Bemessung von *SOFiSTiK* nach *Revit* zu reimportieren und für die Bewehrung der Bauteile und zur Erstellung der Konstruktionszeichnungen zu verwenden. Die Ergebnisse können zur Mengenermittlung und Erstellung der Ausschreibungsunterlagen herangezogen werden und an entsprechende Programme – beispielsweise Orca AVA oder iTWO – weitergeleitet werden.

Einsatz des parametrisierten Modells in der Entwurfs- und Genehmigungsplanung

Das Gesamtmodell, das im Rahmen des BIM-Prozesses erstellt wurde, bietet die Möglichkeit, die gesamte Planung für die beschriebene Fertigteiltrückerbauweise zu übernehmen. Wird das Modell als Stand-alone-Lösung genutzt, ist es möglich, mit der BIM-Arbeitsweise den gesamten Entwicklungsprozess eines Projekts zu steuern und zu begleiten. Diese Lösung bietet die größtmöglichen Vorteile sowohl des BIM-Prozesses als auch der Fertigteiltrückerbauweise: eine enorme Zeit- und Kostenersparnis, eine Reduktion von Aufwand im Planungsprozess und eine Minimierung von Risiken.

Des Weiteren ist es möglich, lediglich Teile des Bauwerks wie den Überbau oder die Widerlager zu erstellen. Die Bauwerksplanerzeugung kann ebenfalls eigenständig auf beliebige Projekte angewendet werden.

Die zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Masterarbeit zur Verfügung stehenden digitalen Tools bieten Lösungen und Möglichkeiten, die Prozesse bei der Planung und Durchführung von Bauwerken weitestgehend zu automatisieren. BIM kann hierbei sehr vielfältig genutzt werden. Die Schnittstelle zwischen Architektur und Statik, das Erstellen von Konstruktionszeichnungen, die Bauphasenplanung und die Erstellung von Leistungsverzeichnissen sind nur ein paar wenige der zahlreichen Möglichkeiten, in welchen die BIM-Methodik zum Tragen kommt.

Auch in späteren Bauprozessen kann von der Nutzung der Daten aus BIM-Modellen profitiert werden. Die Automatisierung des Betriebs eines Bauwerks auf Grundlage der im Modell hinterlegten Daten oder die Nutzung von Daten älterer Gebäude zum Aufschluss über Optimierungsmöglichkeiten z. B. hinsichtlich externer Einflussfaktoren wie Nutzerverhalten oder

Energieverbrauch sind nur zwei Beispiele dafür, wie Gebäude so leistungsstärker und funktionaler gestaltet werden können.

Implementierung von BIM in der Praxis

Die digitale Planung von Bauprojekten in allen Bereichen wird sich in den nächsten Jahren als neuer Standard etablieren. Für die Implementierung des BIM-Systems in der Praxis sind verschiedene Maßnahmen betreffend die EDV und Arbeitsweisen von Unternehmen notwendig.

Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz von BIM sind die Verfügbarkeit der erforderlichen Software sowie das nötige Know-how zur Nutzung dieser Software und die Kompatibilität von ausgetauschten Daten. Notwendig ist eine klare Aufgabenverteilung und eine

partnerschaftliche, kooperative und transparente Kommunikation zwischen Projektbeteiligten in allen Planungsphasen. Zudem müssen Stellenpläne so umstrukturiert werden, dass sie den veränderten Anforderungen gerecht werden (beispielsweise BIM-Koordinator oder BIM-Manager).

Zusammenfassend birgt die BIM-Methode, wenn sie von Unternehmen flächendeckend implementiert und umgesetzt wird, große Vorteile für alle an Bauprojekten beteiligten Personen und verkörpert den Weg in eine digitale, zukunftsorientierte, risikoarme und effiziente Zusammenarbeit bei der Realisierung von Bauwerken. Nichtsdestotrotz bleibt die Ingenieurleistung als zielgerichtete kritische Hinterfragung konkreter Problemstellungen unter Beachtung gegebener Randbedingungen und Anforderungen weiterhin ein fundamentaler Bestandteil der digitalisierten Arbeitsweise.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, *Stufenplan Digitales Planen und Bauen. Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken*, Berlin, 2015.
- [2]: Autodesk GmbH, *Überblick Revit*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.autodesk.de/products/revit/overview> (Zugriff am: 16. Dezember 2019).

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Gesellschaft zur Digitalisierung des Planens, Bauens und Betriebens mbH, *Stufenplan/BIM-Leistungsniveau ab 2020*. [Online]. Verfügbar unter: <https://bim4infra.de/stufenplan/> (Zugriff am: 16. Dezember 2019).
2. Autodesk GmbH, *Überblick Revit*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.autodesk.de/products/revit/overview> (Zugriff am: 16. Dezember 2019).
3. Autodesk GmbH, *Visuelle Programmierung mit Dynamo*. [Online]. Verfügbar unter: <https://blogs.autodesk.com/bimblog/visuelle-programmierung-mit-dynamo/> (Zugriff am: 16. Dezember 2019).
4. Autodesk GmbH, *Dynamo Package Manager* [Online]. Verfügbar unter: <https://dynamopackages.com/> (Zugriff am: 16. Dezember 2019).

5. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, *Stufenplan Digitales Planen und Bauen. Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken*, Berlin, 2015.
6. N+P Informationssysteme GmbH, *Vergleich von open BIM, closed BIM, little BIM, big BIM und connected BIM*. [Online]. Verfügbar unter: <https://blog.nupis.de/vergleich-open-closed-little-big-bim-connected-bim/> (Zugriff am: 16. Dezember 2019).
7. K. D. Siemon/R. Averhaus, *Die HOAI 2013 verstehen und richtig anwenden mit Beispielen und Praxistipps*, 3. Auflage Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017.

Autor

Timur Weilbach-Eyüboğlu, geb. 1987 in Traunstein, studierte nach seinem Fachhochschulabschluss Bauingenieurwesen (BA) an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg. Seit 2015 ist er Projektingenieur bei der bulicek + ingenieure GmbH in München, wo er sich in den Bereichen Brücken- und Ingenieurbau und Industrie- und Hochbau für die Bautechnische Prüfung und Gutachtenerstellung betätigt. 2017 begann er den Masterstudiengang Allgemeiner Ingenieurbau an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften München, den er Anfang 2020 abschloss. Im Oktober 2020 nahm er eine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Digitalisierung im Bauwesen der Hochschule München auf.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Massivbau der Hochschule München, Professor Dr.-Ing. Jörg Jungwirth.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.



ISBN 978-3-89650-517-0 // € (D)



9 783896 505170

