



DAS
BAYERISCHE
BAUWERBE

HOCHSCHULPREIS des Bayerischen Baugewerbes



Wettbewerbsbeiträge **2019**

IMPRESSUM

Herausgeber

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

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

Mit Beiträgen von:

Fabian Diewald • René Hamberger • Dennis Jodoin • Tobias Kastner • Sandra Krautter •
Florian Parhofer • Dominik Picha • Toni Pollner • Markus Schmidt • Viviana Schmoll • Philipp Schön •
Simon Stanglmayr • Alexander Straßer • Maximilian Walterscheid • Katharina Wild • Klaus Wilhelm

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 2019

VORWORT

Die Stiftung Berufsförderung Bayerisches Baugewerbe schreibt jährlich den Hochschulpreis des Bayerischen Baugewerbes aus. Mit ihm werden herausragende Bachelor- und Masterarbeiten der Fachrichtung Bauingenieurwesen mit hohem Praxisbezug für die Anwendung in Unternehmen der klein- und mittelständisch geprägten Bauwirtschaft prämiert.

Zum elften Mal zeichnete Wolfgang Schubert-Raab, Präsident der Bayerischen Baugewerbeverbände, im Oskar von Miller Forum in München exzellente Bachelor- und Masterarbeiten der Technischen Universität München, der bayerischen Technischen Hochschulen und Hochschulen für angewandte Wissenschaften aus.

In der vorliegenden Veröffentlichung werden die Arbeiten, die 2019 für die Teilnahme am Hochschulpreis ausgewählt wurden, in der von den Verfassern gelieferten Zusammenfassung in alphabetischer Reihenfolge herausgegeben. Zu jeder Arbeit gibt es ergänzende Informationen zu Verfasser, Betreuer und der Auszeichnung.

In diesem Jahr wurden insgesamt 17 Bachelor- und Masterarbeiten von

- der Technischen Universität München,
- der Universität der Bundeswehr München,
- der Hochschule München,
- der Hochschule Augsburg,
- der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg,
- der Technischen Hochschule Nürnberg Georg-Simon-Ohm und
- der Technischen Hochschule Deggendorf

eingereicht. Aus den 17 Arbeiten hat der Wettbewerbsausschuss unter Vorsitz von Herrn Prof. Dr.-Ing. Niels Oberbeck entschieden, 3 Arbeiten mit einem Geldpreis und 13 Arbeiten mit einer Teilnahmeurkunde auszuzeichnen.

Mit dem 1. Preis wurde Herr Tobias Kastner für seine Bachelorarbeit „Untersuchung und Bewertung der Abziehfestigkeit und des Eindringverhaltens von Zementleim in die Vliesverbundschicht von Frischbetonverbundsystemen“ ausgezeichnet.

Den 2. Preis erhielt Frau Viviana Schmoll mit ihrer Bachelorarbeit „Einflüsse auf Winterbaustellen und ihre kalkulatorischen Auswirkungen“.

Der 3. Preis ging an Herrn Fabian Diewald mit seiner Master´s Thesis „Charakterisierung von Mikroschäden und Heilungseffekten in Betonbauteilen mittels Ultraschalles“.

Das Fachkolloquium zur Intensivierung der Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Baugewerbe zum Thema „Wie bauen wir in Zukunft? Herausforderungen an Baustoffe und Baustoffkreisläufe“ wurde von Frau Prof. Dr.-Ing. Andrea Kustermann vorgetragen.

Inhaltsverzeichnis

Fabian Diewald , Master's Thesis, Charakterisierung von Mikroschäden und Heilungseffekten in Betonbauteilen mittels Ultraschalles	Seite 3
René Hamberger , Masterarbeit, Erneuerung Quellwasserleit Nebanice: Bauen im Ausland, Spezialtiefbau und Digitalisierung des Bauwesens	Seite 8
Dennis Jodoin , Bachelorarbeit, Verfahrensvergleich für die Herstellung von Bohrpfehlen mit Visualisierung normrelevanter Herstellungsfaktoren durch Lehrvideos	Seite 13
Tobias Kastner , Bachelorarbeit, Untersuchung und Bewertung der Abziehfestigkeit und des Eindringverhaltens von Zementleim in die Vliesverbundschicht von Frischbetonverbundsystemen	Seite 17
Sandra Krautter , Masterarbeit, Ermittlung der Betondruckfestigkeit mithilfe der Resonanzmethode	Seite 22
Florian Parhofer , Bachelorarbeit, Untersuchungen zur mikrobiellen Verfestigung von Sand durch den Bakterienstamm Sporosarcina pasteurii	Seite 27
Dominik Picha , Masterarbeit, Übertragbarkeit von Prinzipien und Methoden des Lean Construction auf Instandsetzungs- maßnahmen in der Bauwerkserhaltung	Seite 32
Toni Pollner , Masterarbeit, Ultra-Hochleistungs-Faserbeton als Instandsetzungsmaterial für chloridbeanspruchte Bauwerke aus Stahlbeton	Seite 37
Markus Schmidt , Bachelor's Thesis, Experimentelle Untersuchung zum Querkrafttragverhalten von vorgespannten UHPFRC-Trägern	Seite 42
Viviana Schmoll , Bachelorarbeit, Einflüsse auf Winterbaustellen und ihre kalkulatorischen Auswirkungen	Seite 47
Philipp Schön , Masterarbeit, Analyse von Hebungen und Setzungen während der Arbeiten zur Unterfahrung des Empfangsgebäudes am Augsburg Hauptbahnhof	Seite 52
Simon Stanglmayr , Masterarbeit, Kriechverhalten von gefrorenem Sand unter einaxialer, stufenweiser Lasteinwirkung	Seite 57
Alexander Straßer , Bachelorarbeit, Prozesstechnische Optimierung der additiven Fertigungsmethode Selective Cement Paste Intrusion durch Einsatz von Zusatzmitteln	Seite 62
Maximilian Walterscheid , Masterarbeit, Verwendung von rezykliertem Brechsand für die Herstellung von Mörtel und Beton	Seite 67
Katharina Wild , Masterarbeit, Modellbasierte Planung, Massenermittlung und Ausschreibung im Entwässerungsbereich mit Nutzung des iTWO civil Infrastrukturmoduls. Möglichkeiten und Grenzen anhand eines fiktiven Autobahnprojekts	Seite 72
Klaus Wilhelm , Bachelorarbeit, Untersuchungen zum Kriechverhalten von PVB-Zwischenschichtfolie unter Temperatur und Feuchtigkeitseinwirkung	Seite 77

CHARAKTERISIERUNG VON MIKROSCHÄDEN UND HEILUNGSEFFEKTEN IN BETONBAUTEILEN MITTELS ULTRASCHALLES

Master's Thesis

Fabian Diewald

Um die Sicherheit und Dauerhaftigkeit von bewehrten oder vorgespannten Betonbauteilen zu gewährleisten, müssen während des Lebenszyklus auftretende Schäden frühzeitig erkannt werden. Zur Bewertung solcher Schäden, oftmals im Mikrometerbereich, wurde eine Messmethode basierend auf Ultraschall entwickelt. Das gemessene Ultraschallsignal wurde für verschiedene Belastungen und Schädigungsgrade mithilfe eines Korrelationskoeffizienten verglichen. Außerdem wurde der Effekt eines heilungsfähigen Polymers auf existierende als auch auf erzeugte Risse untersucht. Das Eindringen des Polymers in die Risse sowie die Verbundbedingung wurden durch Ultraschallmessung und ein Lichtmikroskop analysiert. Die entwickelte Methode liefert einen Beitrag, oberflächlich nicht sichtbare Schädigungen an Betonbauteilen frühzeitig zu erkennen, zu charakterisieren und einem Versagen entgegen wirken zu können.

Keywords: Stahlbeton, Lebensdauer, Schadensanalyse, Ultraschall, Mikrostruktur, Risse, Selbstheilung

Lebensdauerprognose von Stahlbetonbauwerken

Stahlbetonbauwerke sind ein unverzichtbarer Bestandteil unseres Lebens, denn unsere Mobilität, unsere industrielle Leistungsfähigkeit und die Funktionalität der modernen Gesellschaft hängen direkt von der technischen Zuverlässigkeit dieser Bauwerke ab. Daher ist eine ressourcenschonende und kostengünstige Erhaltung der Infrastrukturbauwerke über die gesamte Lebensdauer von größter Bedeutung. Höhere Lasten, längere Lebensdauern, der Einsatz neuer Materialien und Ressourcenknappheit erfordern

eine zuverlässige Lebensdauerprognose, die in ein effizientes Managementsystem eingebettet ist. Im Bauwerk integrierte, robuste Diagnosewerkzeuge, die ortsaufgelöst über Verdachtsmomente mit Blick auf kritische Zustände, wie Überlastung oder Materialdegradation, berichten könnten, sind aktuell nur in vereinzelt Fällen aufzufinden. Um den Anforderungen einer fundierten Lebensdauerprognose gerecht werden zu können, wird ein Diagnosewerkzeug in Form einer Ultraschallmessung entwickelt.

Probekörper Betonbahnschwellen

Bei den Probekörpern handelt es sich um vorgespannte Betonbahnschwellen der Festigkeitsklasse C50/60 mit eingebetteten Kunststoffdübeln zur Befestigung des Schienenbefestigungssystems. Abbildung 1 zeigt eine Explosionsdarstellung der untersuchten Probekörper.



Abb. 1: Schematische Explosionsdarstellung der Elemente einer vorgespannten Betonbahnschwelle

Die im Drittelpunkt geschnittenen Bauteile weisen Mikrorisse in radialer Richtung, ausgehend von den Dübeln, auf (Abbildung 2). Die untersuchten Rissbreiten liegen dabei zwischen 14 und 17 μm , weit unterhalb der kritischen Rissbreite für die meisten Schädigungsmechanismen wie beispielsweise der durch Chlorid induzierten Korrosion, deren kritische Rissbreite oberhalb von etwa 0,4 mm liegt [1]. Durch den Nachweis an Rissbreiten im Mikrometerbereich kann die Gültigkeit der entwickelten Methodik jedoch ebenso für häufig relevante Rissbreiten im Millimeterbereich abgesichert werden.

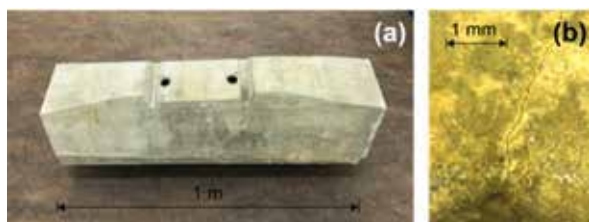


Abb. 2: (a) Geschnittene, vorgespannte Betonbahnschwelle mit zwei eingebetteten Dübeln und (b) Rissöffnung im Mikrometerbereich in radialer Richtung, ausgehend vom Dübel (Bildunterseite)

Messtechnik Piezosensoren

Für die durchgeführten Untersuchungen wurden auf dem piezoelektrischen Effekt basierende Sensoren entwickelt. Diese erfahren bei Einwirkung einer elektrischen Spannung eine Formänderung und sind somit in der Lage, einen Impuls in das Bauteil einzuleiten und die Ausbreitung von mechanischen Wellen zu initiieren sowie Verschiebungen lokal abzubilden (umgekehrter piezoelektrischer Effekt). Abbildung 3 zeigt die scheibenförmigen, piezoelektrischen Keramiken und ein gefertigter Sensor mit BNC-Anschluss.

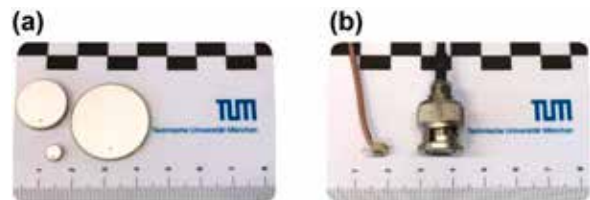


Abb. 3: (a) Piezoelektrische Scheiben und (b) gefertigter Sensor mit BNC-Stecker

Die Sensoren wurden mithilfe eines Zwei-Komponenten-Epoxidharzes an die Oberfläche der Probekörper angekoppelt. Abbildung 4 stellt die angekoppelten Sensoren im Bereich der Dübel dar. Der in Abbildung 2 gezeigte Riss liegt dabei zwischen den beiden Sensoren.

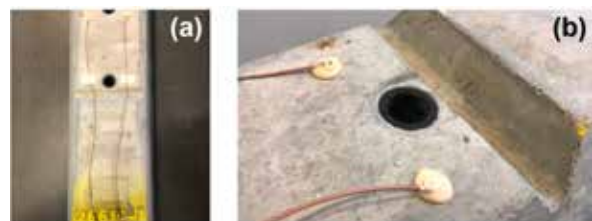


Abb. 4: (a) Angekoppelte Piezosensoren an eine Betonbahnschwelle und (b) Nahbereich der Dübel

Messmethodik Ultraschall

Ultraschallwellen in Stahlbetonbauteilen reagieren äußerst sensitiv auf die Einwirkung bestimmter Lasten mechanischer, chemischer oder thermischer Art [2-5]. Zwei gemessene Ultraschallsignale bei unterschiedlichen thermischen Lastzuständen sind in Abbildung 5 gezeigt.

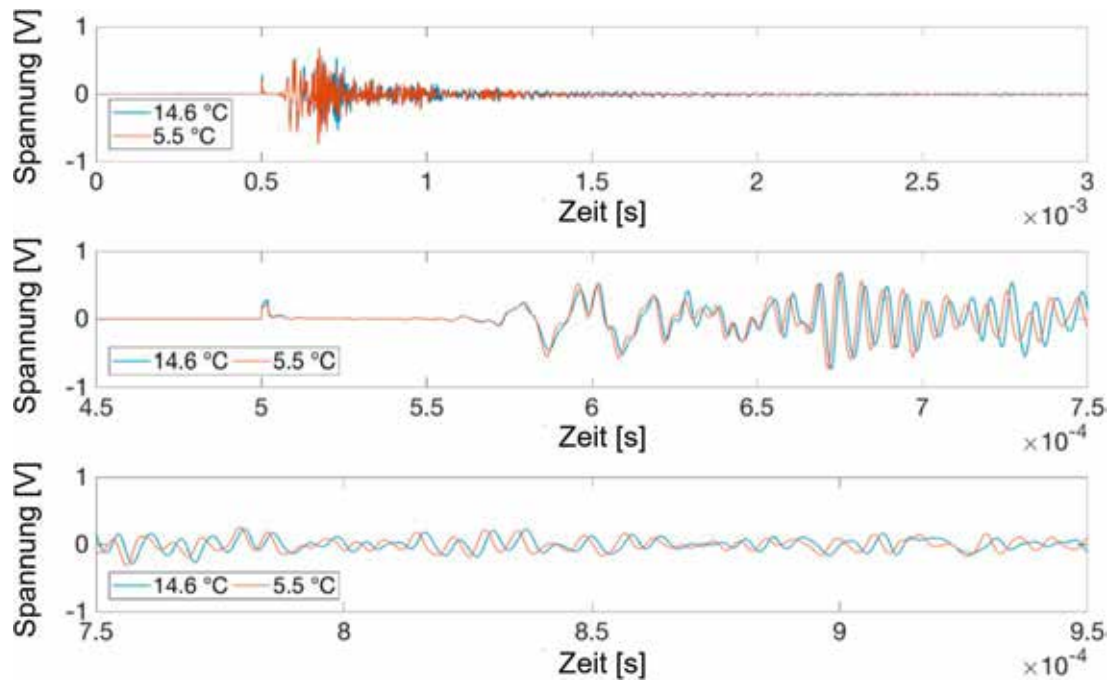


Abb. 5: Gemessenes Ultraschallsignal für zwei verschiedene thermische Lasten in unterschiedlichen Zeitbereichen

Hier wird die Streckung des Signals deutlich, insbesondere für fortgeschrittene Messzeiten. Die am Sensor gemessene Spannung ist proportional zur Verschiebung des Sensors und beschreibt die eintreffende Welle. Ebenso wurde der Effekt eines eingebrachten, heilungsfähigen Polymers untersucht, der es ermöglicht, die geöffneten Risse innerhalb des Bauteils wieder zu verschließen. Hierdurch können einerseits die mechanischen Eigenschaften des Bauteils erhalten oder sogar wiederhergestellt werden [6], zudem kann der Transport von mit Chloridionen behaftetem Wasser reduziert werden [7]. In Abbildung 6 ist das pigmentierte, eingedrungene Polymer in einen Riss mit einer Öffnungsbreite von wenigen Mikrometern dargestellt.

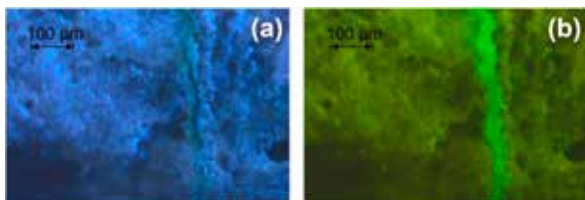


Abb. 6: Eindringenes, pigmentiertes Polymer in Risse mit Öffnungsbreiten im Bereich weniger Mikrometer (a) unter dem Lichtmikroskop und (b) mit zusätzlicher UV-Beleuchtung

Die signifikante Veränderung des Signals tritt neben thermischen Lasten oder Änderung im

Gefüge ebenso bei mechanischen Lasten auf. Untersucht wurden Lasten durch ein Anzugsmoment auf den Dübel mittels eines adaptierten Schienenbefestigungssystems. Dazu wurde auf einen unbeschädigten Probekörper schrittweise ein Drehmoment von bis zu 500 Nm aufgebracht und quasi-kontinuierlich in Ultraschalltransmission gemessen. Die angewandte mechanische Last und somit der innere Spannungszustand konnten anschließend für ein kalibriertes Bauteil mithilfe von erneuten Ultraschallmessungen bestimmt werden.

Korrelation der Signale

Durch die Kalibrierung der gemessenen Ultraschallsignale auf die einwirkenden Lasten kann eine Korrelation auf unbekannte Schädigungen oder sogar vorherrschende Lastkombinationen in Stahlbetonbauteilen hergestellt werden. Diese Korrelation des gesamten, erhobenen Signals wird in mathematischer, linearer Form durch den Pearson Korrelationskoeffizienten r_{xy} realisiert [8]. Diesen beschreibt Gleichung 1.1, in der die Kovarianz der Einzelmessungen im Zähler mit dem Produkt der Standardabweichungen im Nenner in Beziehung gesetzt wird. Die diskreten Wertepaare (x_i, y_i)

werden mit einer Abtastrate f im Megahertzbereich erhoben und bilden zusammen das Signal einer Messung mit den arithmetischen Mittelwerten \bar{x} und \bar{y} .

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1.1)$$

Für den Wert 1 bietet der Koeffizient eine ideale Korrelation zum Ausgangssignal, wohingegen die Korrelation in Richtung 0 abnimmt. Die Korrelation kann für Lasten mechanischer, chemischer oder

thermischer Art auf Stahlbetonbauteile durchgeführt werden. Ein Beispiel zeigt Abbildung 7, in der die Korrelation zwischen einer aufgetragenen Last in Form eines Drehmoments auf eine Betonbahnschwelle (orange Kurve) und des Ultraschallsignals (blaue Punkte) ermittelt wurde. Der Versatz zwischen Korrelationskoeffizient zu Anfang (1,0) und nach Entlastung (~0,9), nachdem mit einem Drehmoment von 500 Nm belastet wurde, bildet die bleibende Schädigung des Bauteils ab.

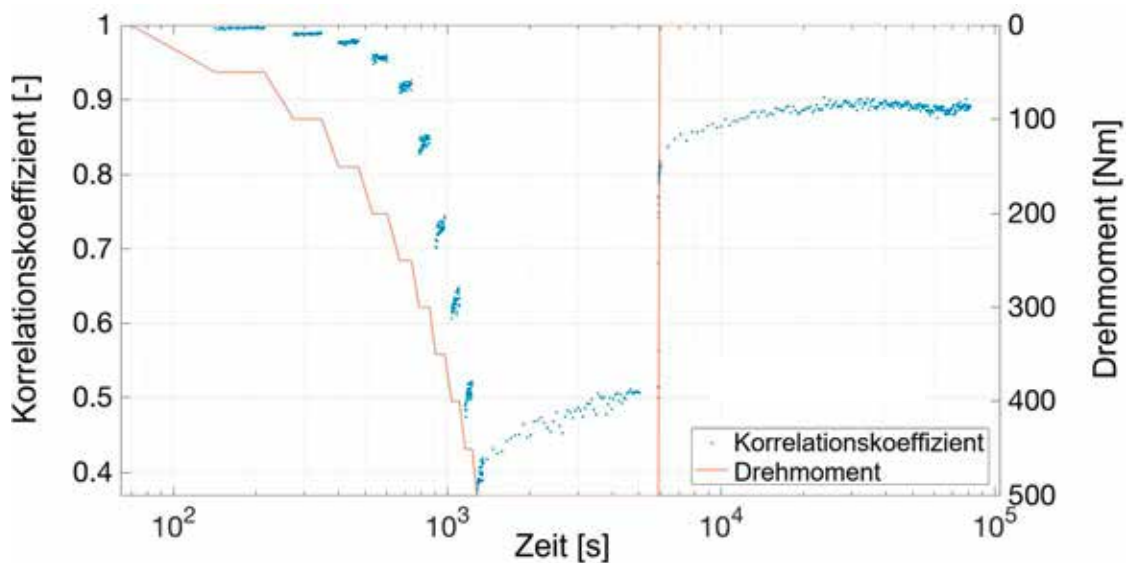


Abb.7: Aufgetragenen Last in Form eines Drehmoments (orange Kurve) und Korrelation des Ultraschallsignals (blaue Punkte)

Zusammenfassung

Die Ausbreitung mechanischer Wellen, induziert durch Ultraschall, wurde als Indikator und innovatives Werkzeug für die Bestimmung diverser Lasteinwirkungen auf Stahlbetonbauteile nachgewiesen. Insbesondere für thermische und mechanische Lasten sowie für das Eindringen eines heilungsfähigen Polymers wurde die Korrelation des gemessenen Signals mittels eigens entwickelter Sensoren durch den Pearson Korrelationskoeffizienten gezeigt. Die gewählte Methodik bietet einen mit geringem wirtschaftlichem Aufwand zu realisierenden Ansatz zur Bestimmung von unterschiedlichsten Last-

zuständen ganzer Bauwerke oder den lokalen Nachweis von Schädigungen bis in den Mikrometerbereich. Die Eignung der Ultraschalltechnik zur Bestimmung von mechanischen Lastzuständen in Stahlbetonbauwerken wurde in besonderem Maße nachgewiesen. Die Ergebnisse der Arbeit versuchen einen Beitrag für die gesellschaftlich immer wichtiger werdenden Bereiche Instandhaltung, Bauen im Bestand und ressourceneffiziente Infrastruktur zu leisten, indem Schäden am Bauwerk frühzeitig erkannt und geeignete Handlungsmaßnahmen abgeleitet werden können.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Gehlen, Ch., Sodeikat, Ch. (2003): Gerissener Stahlbeton: Wie korrosionsgefährdet ist die Bewehrung? *Materials and Corrosion* 54.
- [2] Hilloulin, B., Zhang, Y., Abraham, O., Grondin, F., Loukili, A., Durand, O., Tournat, V. (2014): Small crack detection in cementitious materials using nonlinear coda wave modulation. *NDT & E International* 68.
- [3] Planès, T., Larose, E., Rossetto, V., Margerin, L. (2013): LOCADIFF: Locating a weak change with diffuse ultrasound. *The 39th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. AIP Conf. Proc.* 1511.
- [4] Novak, A., Bentahar M., Tournat V., El Guerjouma R., Simon L. (2012): Nonlinear acoustic characterization of micro-damaged materials through higher harmonic resonance analysis. *NDT & E International*, 45.
- [5] Shokouhi, P., Rivière, J., Lake, C. R., Le Bas, P.-Y., Ulrich, T. J. (2017): Dynamic acousto-elastic testing of concrete with a coda-wave probe: comparison with standard linear and nonlinear ultrasonic techniques. *Ultrasonics* 81.
- [6] Hilloulin, B., Hilloulin, D., Grondin, F., Loukili, A., De Belie, N. (2015): Mechanical regains due to self-healing in cementitious materials: Experimental measurements and micro-mechanical model. *Cement and Concrete Research* 80.
- [7] Tsangouri, E., Karaiskos, G., Aggelis, D., G., Deramaecker, A., Van Hemelrijck, D. (2015): Crack sealing and damage recovery monitoring of a concrete healing system using embedded piezoelectric transducers. *Structural Health Monitoring* 14.
- [8] Fisher, R.A. (1958): *Statistical Methods for Research Workers*, 13th Edition, Hafner.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [3] Planès, T., Larose, E., Rossetto, V., Margerin, L. (2013): LOCADIFF: Locating a weak change with diffuse ultrasound. *The 39th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. AIP Conf. Proc.* 1511.

Autor

Fabian Diewald schloss Master of Science Bauingenieurwesen und Master of Science Fahrzeug- und Motorentchnik im Jahr 2018 an der Technischen Universität München ab. Seit Januar 2019 beschäftigt er sich im Rahmen einer Doktorarbeit am Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen von Prof. Gehlen mit dem Thema nichtlineare Analyse der Wellenausbreitung von Ultraschall in Betonbauteilen im Bereich des Codasignals.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Technische Universität München, Prof. Christian U. Große.

Die Arbeit wurde mit dem 3. Preis ausgezeichnet.

„ERNEUERUNG QUELLWASSERGEBIET NEBANICE: BAUEN IM AUSLAND, SPEZIALTIEFBAU UND DIGITALISIERUNG DES BAUWESENS“

Masterarbeit

René Hamberger, M. Eng.

Digitalisierung stellt in vielen Branchen ein aktuelles Thema dar. Die deutsche Politik will bis spätestens 2020 bei allen öffentlichen Infrastrukturprojekten die BIM-Methode (building information modelling) obligatorisch einführen. Wie sieht die tatsächliche Umsetzung in der Praxis aus? Kann auch ein Unternehmen von den Vorteilen der Digitalisierung und BIM positiv beeinflusst werden? Der Autor beschäftigt sich bei einem Bauprojekt aus dem Bereich des Rohrleitungsbaus der Firma Josef Pfaffinger Bauunternehmung GmbH mit einer digitalen Baustelle und setzt die Theorie in die Praxis um. Die Wissenschaft wird somit adaptiv auf der Baustelle angewandt. Durch die 3D-Planung, Optimierung der Arbeitsabläufe und Ablaufsimulationen konnte ein Auslandspilotprojekt realisiert werden.

Keywords: Digitalisierung, BIM, virtuelles Bauen, 3D-Ablaufsimulation, Spezialtiefbau

Chancen und Risiken des Rohrleitungsbaus

Der Rohrleitungsbau – ein Teilgebiet des Tiefbaus – bringt in den meisten Fällen viele Risiken mit sich. Vor allem im städtischen Rohrleitungsbau existieren während des „Bauens im Bestand“ unterschiedlichste Gefahren. Die höchste Gefahr stellen Bestandsleitungen dar, die in der Vergangenheit falsch oder gar nicht vermessen und dokumentiert worden sind. Oftmals werden dadurch Gasleitungen, Wasserleitungen oder sonstige erdverlegte Infrastruktur während des Lösens des Bodens beschädigt. Dies kann in den

schlimmsten Fällen bis hin zu tödlichen Verletzungen führen.

Die Ursache von solchen Unfällen kann einerseits in der unpräzisen Dokumentation, andererseits in der falschen Informationsübertragung zwischen verschiedenen Verantwortlichen – Planer, Projektleiter, Polier, Baggerfahrer, Bauwerker liegen.

Mithilfe von Digitalisierung und Automatisierung der Baubranche sollen Bauprozesse optimiert und Schadensfälle reduziert werden. Die technische Ausrüstung des Tiefbaus wird bereits dem Trend der Digitalisierung angepasst. Dazu gehö-

ren beispielsweise GPS-gesteuerte Baugeräte, Baggersteuerungen mit Live-Auskunft, digitale Geländemodelle, Satellitenbilder mit 3D-Modelle, etc. Durch den richtigen Einsatz und die richtige Anwendung der Tools ist es möglich, sich der Digitalisierung anzupassen.

Ziel der Masterarbeit war es, die Chancen der Digitalisierung an einem konkreten Projekt aufzuzeigen und zu implementieren. Dadurch wies die Masterarbeit einen Doppel-Charakter auf. Es wurden die Projektunterlagen und -aufgaben wissenschaftlich untersucht, woraufhin eine direkte Optimierung mittels Digitalisierung stattfand und auf der Baustelle umgesetzt wurde.

Zusätzlich wurden transparente Grundlagen – wie z.B. Ablaufsimulationen verschiedener Bauprozesse – ausgearbeitet, die bei vergleichbaren Projekten bereits angewandt wurden und künftig angewendet werden können.

Das Ziel war und ist es, alle Beteiligten eines Projektes so zusammenzuführen, dass Jeder die gleichen Informationen in kürzester Zeit erhält und so die Aufgaben möglichst effizient umsetzen kann.

Hintergründe zum Bauen im Ausland, zum Spezialtiefbau und zur Digitalisierung

Das Pilotprojekt „Erneuerung Quellwassergebiet Nebanice“ diente als Grundlage für die Masterarbeit. Die Josef Pfaffinger Bauunternehmung GmbH wickelte das Projekt als Generalunternehmer ab und agierte das erste Mal auf dem tschechischen Baumarkt. In der Nähe der Stadt Eger befindet sich das Quellwassergebiet Nebanice des tschechischen Wasserversorgers CHEVAK Cheb a.s., der aus diesem Quellwassergebiet mehr als 100.000 Einwohner mit Trinkwasser versorgt.

Aufgrund der langjährigen Einwirkung von CO₂ sowie eisen- und manganhaltigem Grundwasser entschied sich der Bauherr zur kompletten Erneuerung des Quellwassergebiets: 5,0 km

Hauptleitung DN 300 bis DN 600; 2,6 km Saugleitungen DN 150 bis DN 200; 7,0 km Strom- und Telekommunikationsleitungen; 20 Schachtbauwerke; 6 Sammeltiefbrunnen und 22 Saugbrunnenschächte.

Das Quellwassergebiet erstreckt sich auf dem naturgeschützten Gebiet entlang des Flusses Eger. Auch aus diesem Grund war eine konventionelle Bauweise – Verlegung der Hauptleitung DN 300 bis DN 600 in offener Bauweise – ausgeschlossen. Die gewählte Bauweise lautete „Relining ohne Ringraum im Kaltreduktionsverfahren“. Hierbei wurden neue Kunststoffleitungen aus PE-HD zu einem gewählten Rohrleitungsstrang mittels Heizelementstumpfschweißen geschweißt. Daraufhin wurden sie in ihrem Durchmesser unter Einwirkung von Zugkräften reduziert und in die bestehenden Graugussleitungen eingezogen. Der Prozess der Reduktion kann in Abbildung 1 betrachtet werden, in welcher das Kunststoffrohr um ca. 10 % radial reduziert wird. Nach dem Ablauf der Rückverformungszeit entstand eine „close-fit“ Position des neuen Rohres, da das neue an dem alten Rohr ohne Ringraum anliegt.



Abb. 1: Relining ohne Ringraum im Kaltreduktionsverfahren

Aufgrund der geringen Häufigkeit solcher Baustellen gab der Bauherr dem Auftragnehmer die Möglichkeit, die Ausführungsplanung der Einzüge zu modifizieren. Der Autor der Masterarbeit und gleichzeitig der Bauleiter in Nebanice erarbeitete im Zuge der Masterarbeit eine neue Planung, die komplett digitalisiert wurde. Zusätzlich wurden sämtliche Bauwerke in

3D-Form modelliert. Es wurden neue Pläne mit der optimierten Ausführung generiert und dem Bauherrn zur Freigabe übergeben. Mithilfe der Satelliten- und Livebilder konnten Risiken wie Fremdsparten, Beschädigung von vielen Grünstreifen sowie Sperrzonen lokalisiert werden. Die Anzahl der Einzüge wurde von ursprünglich 22 auf 12 reduziert. Dadurch konnten eine kürzere Bauzeit und ein niedrigerer Grad an Flurschäden erreicht werden.

Sämtliche Betonbauwerke wie beispielweise Armaturenschächte, Dükerschächte, Be- und Entlüfterschächte sollten laut Ausführungsplanung mittels Ortbetons und Austausch der Armaturen vor Ort saniert werden. Die ursprüngliche Planung, die bestehenden Betonbauwerke von innen zu betonieren hätte eine Verengung und keine Sicherheit gegen Druckwasser zu Folge gehabt. Außerdem wäre die Montage der Armaturen sehr aufwendig geworden. Der Auftragnehmer präsentierte eine Alternativbauweise – den Einbau von insgesamt 20 Fertigteil-schachtbauwerken mit bereits vorinstallierten Armaturen. Diese Lösung bedeutete eine Verkürzung der Bauzeit, einen reibungslosen Bauablauf und eine höhere Qualität der Bauwerke.

Wie sollte aber ein deutscher Auftragnehmer einem tschechischen Bauherrn eine Sonderlösung unterbieten? Wegweisend waren hierbei Digitalisierung und BIM. Dem Bauherrn waren Fertigteil-schächte mit vorinstallierten Armaturen nicht bekannt. Es waren zwei Szenarien möglich. Der Auftragnehmer hätte eine 30-seitige Systembeschreibung in deutscher Sprache vorlegen können, die mit einer hohen Wahrscheinlichkeit abgelehnt worden wäre. Der Autor der Masterarbeit entschied sich jedoch für die Ausarbeitung von 3D-Modellen solcher Schächte, als auch eine Ablaufsimulation der Schachtlieferung und Schachtmontage. Diese Alternative wurde vom Bauherrn angenommen und jegliche Schächte wurden nach diesen Unterlagen eingebaut.

Die Ablaufsimulation für die Fertigteil-schächte enthielt alle benötigten Arbeitsschritte. In der Vorproduktion wurden die benötigten Teile eines Schachts hergestellt – in der Regel drei (Schachtunterteil mit Armaturen, Schachtabdeckung und Schachtdom). Auf der Baustelle musste eine Baugrube verbaut und ausgehoben werden. Alle Schachtteile wurden auf mindestens einem LKW zur vorbereiteten Baugrube geliefert und mittels eines Autokrans auf dem vorbereiteten Planum fachgerecht gelagert. Daraufhin wurden alle Schachtteile wasserundurchlässig verbunden und die Baugrube wurde verfüllt und verdichtet. Schlussendlich folgten die Wiederherstellungsarbeiten der Oberflächen. Abbildung 2 zeigt einen Schnitt durch einen Fertigteil-schacht, in dem alle Bestandteile eines solchen Bauwerks transparent betrachtet werden können. Die Ablaufsimulation zeigte eine große Wirkung indem alle Teilnehmenden die einzelnen Schritte – unabhängig von der Muttersprache – nachvollziehen konnten. Durch die Ablaufsimulation konnten alle Teilnehmenden die einzelnen Schritte – unabhängig von der Muttersprache – nachvollziehen. Außerdem schaffte sie einheitliches Wissen über die Prozesse der Baustelle für alle Beteiligten. Auf der Grundlage dieses Kurzvideos konnten die Teilabläufe auch für das gewerbliche Baustellenpersonal nachvollziehbar dargestellt werden.

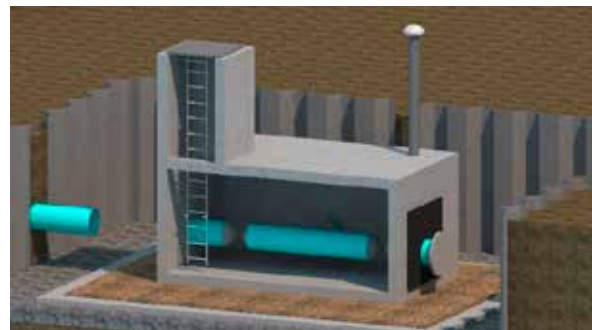


Abb. 2: Schnitt durch einen Fertigteil-schacht aus dem Inhalt der Ablaufsimulation

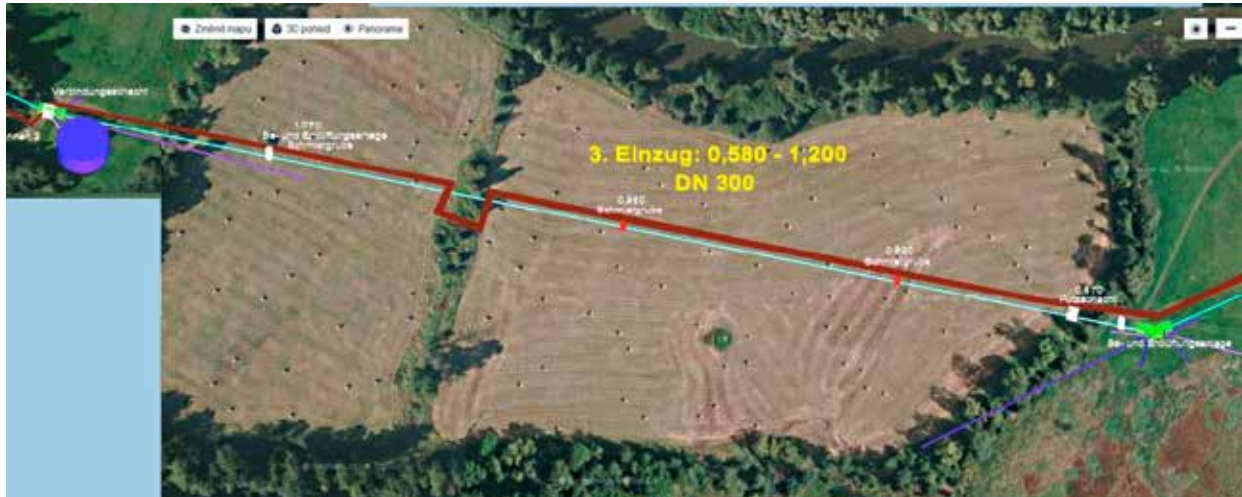


Abb. 3: Ausschnitt aus der 3D-Planung mit Satelliten Bilder, Ansicht der Reliningeinzüge (blau) und der Baustellenwege (rot)

Die digitale Welt basiert auf der lückenlosen Informationsübertragung und Kommunikation. Die benötigten Pläne und Unterlagen wie beispielsweise der Lageplan in Abbildung 3 sollten möglichst schnell Baustelle, Bauherrn und Büro erreichen. Der Generalunternehmer startete das erste Mal die Kommunikation via Webconferencing. Hierbei stellte sich heraus, dass eine effiziente Arbeitsweise und ein fehlerfreier Bauablauf erzielt werden können. Der Abteilungsleiter und der Kalkulator befanden sich in Passau, der Bauleiter zwischenzeitlich in Deggendorf und der Polier auf der 300 km entfernten Baustelle. Zu einem vereinbarten Zeitpunkt konnten alle Beteiligten gleichzeitig kommunizieren, Livebilder der Baustelle betrachten und Dateien teilen. Es konnten Situationen gelöst werden, ohne dass sich die zuständige Person persönlich auf der Baustelle befand. Dies stellt ein Beispiel für die lückenlose Informationsübertragung und Kommunikation dar.

Ergebnisse und Ausblick

Die Masterarbeit lieferte mehrere Lösungen, wie die Digitalisierung direkt in der Praxis einer mittelständischen Firma umgesetzt werden kann. Beim Vergleich zwischen 2D- & 3D-Planung zeigten sich die Vorteile der satellitunterstützten Bilder. Dadurch konnte die Logistik der gesamten Baumaßnahme neu geplant werden. Diese

Planung erwies sich als wesentlich effizienter und schloss mögliche Fehlentscheidungen aus. Das Ergebnis war ein reibungsloser Baustellenablauf.

Die 3D-Modellierung und Ablaufsimulationen, die vom Autor erarbeitet wurden, brachten alle Teilnehmenden des Projekts auf den gleichen Wissensstand. Durch die digitale Gestaltung und ein allumfassendes Modell, konnten sich alle Beteiligten gleichzeitig mit den Inhalten beschäftigen. Die Transparenz von 3D-Ablaufsimulationen zeigte sich auch bei weiteren Projekten. Der Autor konnte das Prinzip der Verlegung der Fertigteilschächte bei Folgeprojekten weiter benutzen und die Effizienz der Planung sowie Umsetzung weiter steigern.

Bei einem Auslandsprojekt stellte die sprachliche Verständigung eine große Herausforderung dar. Mithilfe der Inhalte der Masterarbeit und der Digitalisierung konnte die Sprachbarriere überwunden werden. Der Autor beschäftigte sich auch mit den Unterschieden und Gemeinsamkeiten beider Länder und verglich diese. Die Auswertung kann als Grundlage für weitere Projekte der Josef Pfaffinger Bauunternehmung GmbH dienen, die in Tschechien durchgeführt werden.

Resümee: Wir sprechen BIM!

Literaturverzeichnis

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., „Rehabilitation von Gas- und Wasserrohrleitungen durch PE-Relining ohne Ringraum - Anforderungen, Gütesicherung und Prüfung,“ Beuth Verlag, Bonn, 2000.
2. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Stufenplan Digitales Planen und Bauen,“ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, 2015.
3. DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., „W 101 Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete,“ Beuth Verlag, Bonn, 2006.

Autor

René Hamberger, M. Eng.

Akademische Ausbildung

2017 – 2018 Duales Studium, M. Eng., BIW, Fa. Josef Pfaffinger Bauunternehmung GmbH
 2013 – 2017 Duales Studium, B. Eng., BIW, Fa. Max STREICHER GmbH & Co. KG aA GmbH
 2010 – 2013 Allgemeine Hochschulreife Comenius Gymnasium Deggendorf
 2009 – 2010 Gastschuljahr Comenius Gymnasium Deggendorf
 2003 – 2009 Gymnasium Fr. Prochazky, Susice, Tschechische Republik

Beruflicher Werdegang

Seit 06/2018 Bauleiter beim Wasserleitungsprojekt in der Oberpfalz
 Seit 09/2017 Bauleiter beim internationalen Projekt „Erneuerung Quellwassergebiet Nebanice – Tschechien“
 2014 – 2017 Bauleitung bei Tiefbauprojekten (Rohrleitungsbau)
 2014 – 2015 Tutor für Mathematik, TH Deggendorf
 2011 – 2013 Bezirksschülersprecher für Niederbayern

Auszeichnungen

2017 Auszeichnung „Rotary-Preis Bayerwald-Zwiesel“ für die Bachelorarbeit „Digitalisierung im Tiefbau“
 2015 Deutschlandstipendium für Studienleistungen und Engagement
 2012 Preis für Integration und Menschlichkeit, Comenius Gymnasium Deggendorf

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl von Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Wirth, Fachbereich Bauingenieurwesen/Baubetrieb der TH Deggendorf.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

„VERFAHRENSVERGLEICH FÜR DIE HERSTELLUNG VON BOHRPFÄHLEN MIT VISUALISIERUNG NORMRELEVANTER HERSTELLUNGSFAKTOREN DURCH LEHRVIDEOS“

Bachelorarbeit

Dennis Jodoin

Der Mensch lernt durch Imitation. Von Geburt an erfolgt menschliches Lernen primär durch das Nachahmen von Bewegungsabläufen bzw. durch das Adaptieren von Wissen. Auch mit steigendem Alter bleibt diese Art des Lernens meist erhalten. Egal in welchem Bereich eine neue Fähigkeit erlernt werden soll, ist es oft hilfreich, wenn ein Mentor die richtigen Abläufe einmal klar strukturiert vormacht und erklärt. Diese Methode lässt sich sowohl auf das Studien- als auch auf das Arbeitsleben übertragen. Professoren, Chefs und Vorarbeiter haben die wichtige Aufgabe eine möglichst klare Zielvorstellung Studierenden oder Angestellten zu vermitteln, um ein effektives Lernen bzw. ein qualitativ hochwertiges Arbeiten zu ermöglichen. Da diese Personen zeitlich häufig eng gebunden sind, ist es sinnvoll Sachverhalte durch Lehrvideos kurz und prägnant aufzuarbeiten, die durch die Zielgruppe zu jedem Zeitpunkt beliebig oft angesehen werden können. Die entstandene Bachelorarbeit hat sich mit genau dieser Aufgabe beschäftigt. Es sollten Lehrvideos zur Bohrpfahlherstellung erstellt werden, um zum einen Studierenden als auch Facharbeitern in Unternehmen eine übersichtliche Veranschaulichung über die normgerechte Herstellung von Bohrpfählen aufzuzeigen.

Keywords: Digitalisierung in der Lehre, Lehrvideos, Bohrpfahlherstellung,

Der „Ist-Zustand“

Die Baubranche läuft zurzeit auf Hochtouren. Bauunternehmen können sich ihre Aufträge aussuchen und ausgebildete Fachkräfte werden händeringend gesucht. Im Wintersemester 2018/2019 waren in Deutschland ca. 2,8 Mio.

Studenten immatrikuliert [Quelle [1]]. Zu jeden Studienalltag gehört dabei das Zusammenfassen von Vorlesungsfolien, besonders in der Prüfungsvorbereitung mit dazu. Wobei hier offenen Fragen meist nur mit Hilfe von Büchern oder DIN-Normen nachgeschlagen werden können. In der Baupraxis hingegen werden Arbeitsabläufe meist

nur mündlich von Vorarbeitern an die Fachkräfte weitergegeben. Das führt dazu, dass ein Gesamtüberblick über alle nötigen Arbeitsschritte und Problemstellen oft nur schwer vermittelt werden kann. Der gesamte Prozess kann somit nur über einen längeren Zeitraum erkannt und erlernt werden. Komplexe Sachverhalte im Studium müssen selbst durch Literatur neu aufgearbeitet werden. Die Vielzahl an Themenbereichen und der straffe Zeitplan im Studium führen außerdem dazu, dass immer mehr Wissen in kurzer Zeit aufgenommen werden muss, jedoch die Zusammenhänge durch beispielsweise aktuelle Forschung immer komplexer werden. Diese Umstände führen dazu, dass Studierende und Facharbeiter einen erhöhten Anteil an Selbststudium bzw. Initiative erbringen müssen, um Sachverhalte richtig verstehen zu können.

Idee zur Bachelorarbeit

Eine Möglichkeit, um schnell und effektiv Wissen zu vermitteln und die sich heute in Verbindung mit dem Smartphone ideal umsetzen lässt, ist das Erstellen von kurzen und anschaulichen Lehrvideos, die von der gewünschten Zielgruppe, ob Student oder Facharbeiter, zu jeder Zeit

beliebig oft angesehen werden können. An der *Technischen Hochschule Georg-Simon-Ohm* in Nürnberg setzt sich Herr Prof. Dr.-Ing. Plaßmann besonders für den Bereich „Digitalisierung der Lehre“ ein und möchte damit Studierenden einen besseren Überblick über verschiedene Themenbereiche bieten. Ebenfalls können Lehrvideos in Unternehmen eingesetzt werden, um Facharbeitern einen hilfreichen Gesamtüberblick zu vermitteln. Im Rahmen der Bachelorarbeit sollte das Gebiet Bohrpfähle im Trockenbohrverfahren nach DIN EN 1536 [Quelle [2]] in zwei anschaulichen Videos dargestellt werden.

Aufbau der Bachelorarbeit

Die Arbeit ist in zwei Teile gegliedert. Der erste Teil beinhaltet zwei Videos, die die Herstellung von Bohrpfählen mit einem diskontinuierlichem bzw. kontinuierlichem Bohrprozess vorstellen (siehe Abbildung 1). In Zusammenarbeit mit der Bauunternehmung Implenia GmbH konnte Videomaterial auf verschiedenen Baustellen gesammelt werden. Zusätzlich wurden Animationen erstellt, die dann zu einem Video mit unterlegter Audiospur zusammengefügt worden sind. Zu Beginn wird ein Überblick über die im

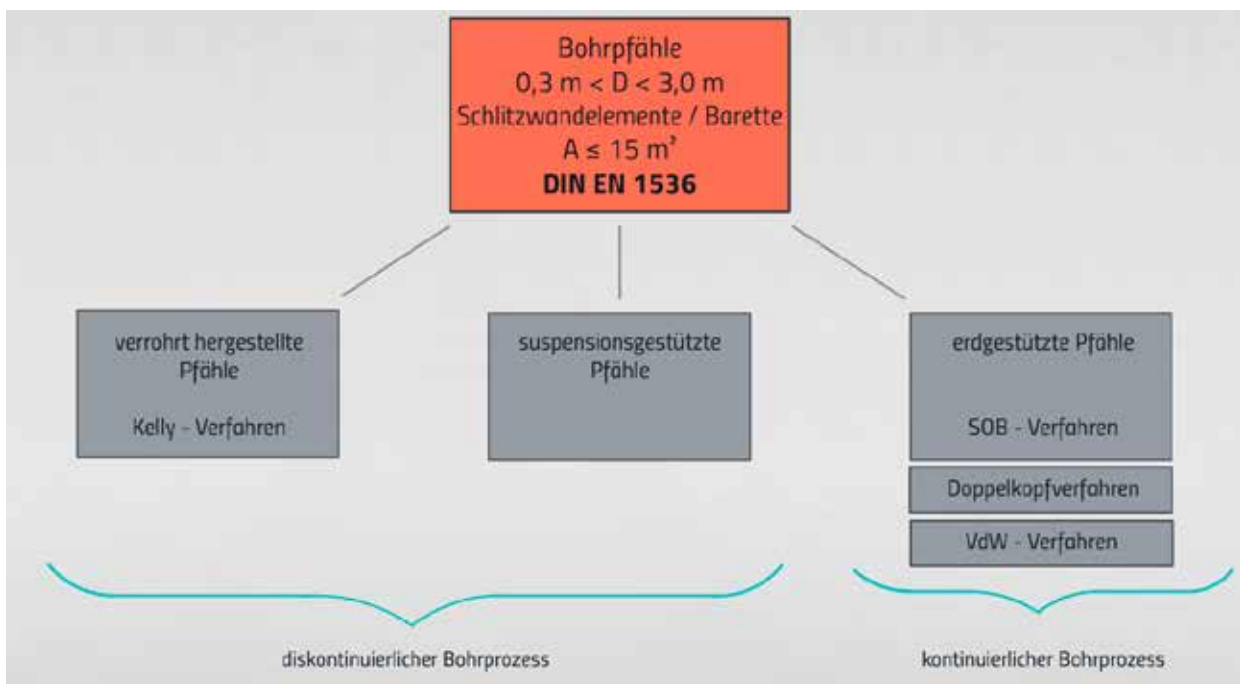


Abbildung 1: Übersicht Bohrpfähle nach DIN EN 1536, (Ausschnitt aus dem Video „Bohrpfähle mit kontinuierlichem Bohrprozess“)

Anschluss folgenden Lerninhalte gegeben. Danach werden durch Animationen und Filmaufnahmen alle erforderlichen Arbeitsschritte zur Pfahlherstellung erklärt (siehe Abbildung 2). Am Ende der Videos werden Vor- und Nachteile

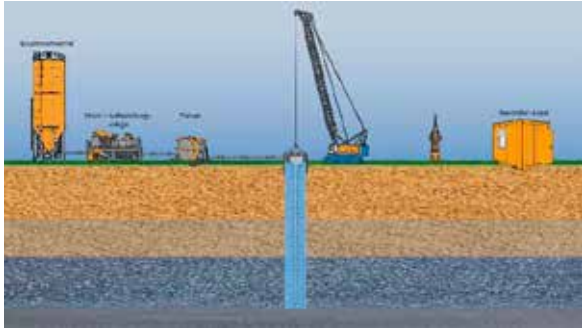


Abbildung 2: Darstellung von komplexen Arbeitsschritten durch Animationen

der unterschiedlichen Verfahren gegenübergestellt. Beim zweiten Teil handelt es sich um eine schriftliche Ausarbeitung, die als Ergänzung detaillierte Informationen zur Verfügung stellt. Es wird dabei auf die bautechnische Eignung und Anwendungsgrenzen der jeweiligen Pfahlssysteme eingegangen und über die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten diskutiert. Des Weiteren beinhaltet der zweite Teil einen Leitfaden für zukünftige Studierende, die sich mit der Herstellung von Lehrvideos befassen möchten. Dieser Leitfaden kann außerdem von allen Personengruppen genutzt werden, die sich zum ersten Mal mit der Thematik Videobearbeitung befassen möchten.

Leitfaden zur Videoherstellung

Die Herangehensweise in Bereich Videobearbeitung kann auf unterschiedliche Arten erfolgen, wobei sich im Laufe der Bachelorarbeit eine gewisse Reihenfolge als sinnvoll ergeben hat. In folgendem Absatz sollen nun wichtige Voraussetzungen und anschließende Arbeitsschritte chronologisch benannt werden:

- Als Hardwarekomponenten werden mindestens eine Kamera, ein Stativ und externes Mikrofon benötigt, um Video- und Audiomaterial aufzunehmen.

Literaturverzeichnis

- Für die spätere Bearbeitung am Computer werden verschiedene Softwareprogramme gebraucht. Für jeden Anwendungsfall gibt es heutzutage ein passendes Programm als Freeware im Internet.
- Zu Beginn eines Videos sollte immer ein ausführliches Drehbuch erstellt werden, um Sachverhalte sauber zu strukturieren.
- Anschließend können Video- und Audiomaterial aufgenommen werden.
- Die Bearbeitung der Audiodateien erfolgt zuerst, dann werden visuelle Inhalte eingefügt.
- Abschließend wird das Video gerendert

Ausblick

Lehrvideos bieten das Potential umfangreiche Zusammenhänge und theoretisches Wissen einmalig hochwertig aufzubereiten und anschließend über einen langen Zeitraum unzählige Male wiederzugeben. Dadurch profitieren nicht nur Arbeitnehmer, die einen besseren Überblick der Arbeitsabläufe erlangen, sondern auch Arbeitgeber, die damit eine gemeinsame Zielvorstellung schaffen. Es ist außerdem möglich den Zuschauer gezielt auf markante Arbeitsschritte zu sensibilisieren, wenn diese beispielsweise auf dem kritischen Weg liegen oder zu Beginn noch unvorhersehbare Spätfolgen haben können. Durch das Visualisieren von normgerechten Arbeitsabläufe kann vom Fachpersonal ein klareres Verständnis erlangt und somit ein produktives Arbeitsumfeld aufgebaut werden.

Quellen in der Zusammenfassung

- [1] Internetquelle: Anzahl der Studierenden an Hochschulen in Deutschland
(aufgerufen am 28.02.2019)
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/221/umfrage/anzahl-der-studenten-an-deutschen-hochschulen/>
- [2] DIN-Normenausschuss Bauwesen, (2015). DIN EN 1536
(2. Aufl.). Berlin, Deutschland: Beuth Verlag

Für die Bachelorarbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [3] DIN-Normenausschuss Bauwesen, (2015). DIN EN 1536
(2. Aufl.). Berlin, Deutschland: Beuth Verlag
- [4] Seitz, Jörn M., & Schmidt, Heinz - Günter (2000). Bohrpfähle.
Mannheim, Deutschland: Ernst & Sohn
- [5] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, e.V. (2012). Empfehlungen des Arbeitskreises
"Pfähle" – EA Pfähle (2. Aufl.). Hamburg, Deutschland: Ernst & Sohn

Autor

- Name: Dennis Jodoin
- Kurzlebenslauf:
- Bachelorstudium „Bauingenieurwesen“ an der TH Nürnberg
Abschluss B.Eng. (Prüfungsergebnis 1,5)
 - Masterstudium „Bauingenieurwesen“ an der HTW Berlin
(derzeit im 1. Semester)
 - Freiberuflich tätig bei der „Deutschen Akademie für digitale Bildung“

Hochschule/Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der *Technischen Hochschule Georg-Simon-Ohm* in Nürnberg am Lehrstuhl „Geotechnik“ unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Plaßmann

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNG UND BEWERTUNG DER ABZIEHFESTIGKEIT UND DES EINDRINGVERHALTENS VON ZEMENTLEIM IN DIE VLIESVERBUNDSCHICHT VON FRISCHBETONVERBUNDSYSTEMEN

Bachelorarbeit

Tobias, Kastner

FBV-Systeme sind vor der Betonage angeordnete, zusätzliche Abdichtungssysteme für wasserundurchlässige Betonkonstruktionen, welche einen dauerhaften, flächigen und hinterlaufsicheren Verbund mit dem Beton eingehen. Für eine einwandfreie Abdichtungsfunktion der Systeme ist es notwendig, Ablösungen und Verbundstörungen vom Betonbauteil zu verhindern. Hierauf aufbauend ist in dieser Arbeit die Verbundkraft von verschiedenen FBV-Systemen untersucht worden. Da eine Vielzahl der Systeme den Verbund mittels einer mechanischen Vliesverbundschicht herstellt, ist insbesondere untersucht worden, wie sich die Eigenschaften des Vlieses auf das Eindringen von Zementleim in diese auswirken. Hierzu sind Abziehversuche zur Ermittlung der spezifischen Abziehfestigkeit in Abhängigkeit des Betonalters durchgeführt und mittels Regressionsanalysen der Einfluss der Vlieseigenschaften bewertet worden. Durch den Abziehversuch hat sich gezeigt, dass die untersuchten FBV-Systeme erhebliche Abweichungen in der Abziehfestigkeit hinsichtlich der Entwicklungsgeschwindigkeit und der erzielten Maximalwerte aufweisen. Die Regressionsanalysen verdeutlichen, dass bei den komplexen Vliesstrukturen viele Einflussfaktoren das Eindringen von Zementleim in verschiedenem Maße beeinflussen. Dies wirkt sich beim praktischen Betoneinbau z.B. auf die erforderliche Dauer der Frischbetonverdichtung zur Erreichung eines vollständigen Hinterlaufschutzes aus.

Keywords: Frischbetonverbundsystem, WU-Bauwerke, Verbundkraft, Abziehfestigkeit, Haftspannung

Frischbetonverbundsysteme als zusätzliche Abdichtungsmaßnahme

In den letzten Jahren haben FBV-Systeme eine stark zunehmende Verwendung gefunden und werden derzeit in der Fachöffentlichkeit intensiv bezüglich ihrer Chancen und Möglichkeiten, aber auch Risiken und Fehlerquellen bei Planung und Ausführung diskutiert [1]. Durch die steigende Anzahl an WU-Bauwerken vor allem im Industriebau, bei denen es sich meist um hochwertig genutzte Kellergeschosse in Form von Rechenzentralen oder Tiefgaragen handelt, werden FBV-Systeme immer relevanter.

Es handelt sich dabei im Allgemeinen um vollflächige Abdichtungssysteme, die vor der Betonage auf der Schalung angebracht werden. Auf Grund ihrer elastischen Beschaffenheit können die Systeme auch an geometrisch komplexeren Bauwerken angebracht werden und durch den vollflächigen Verbund bei lokalen Beschädigungen einen lateralen Wassertransport zwischen Bauwerk und Abdichtung verhindern.

Aufbau und Wirkungsweise von FBV-Systemen

FBV-Systeme bestehen aus zwei Schichten: einer wasserundurchlässigen Dichtschicht meist auf Polymerbasis, welche die Abdichtungsfunktion des Systems übernimmt und einer Verbundschicht, die bei der Betonage zum Beton gerichtet ist und den Verbund zur Betonrandzone aufbaut. Bei Letzterer gibt es unterschiedliche Ausführungsvarianten, die auf verschiedenen physikalischen Methoden basieren, um einen wirksamen Verbund zum Betonbauteil aufzubauen.

Dabei werden Beschichtungen bestehend aus Kunststoff-Granulat, Sand oder auch vollflächige Klebebeschichtungen verwendet; häufig kommt jedoch eine mechanische Vlieskaschierung zum Einsatz (s. Abbildung 3). Der Verbund zum Beton

wird also entweder mechanisch-adhäsiv, klebe-adhäsiv oder bituminös-adhäsiv aufgebaut.

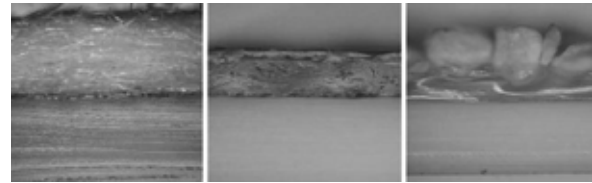


Abbildung 3: Verschiedene Verbundschichten (links nach rechts: vlieskaschiert, klebe-adhäsiv, Granulatbesandung)

Problemstellung und Zielsetzung

Da FBV-Systeme bereits vor der Betonage auf der Schalung angebracht werden, ergeben sich neue Herausforderungen in die Praxis. Damit die Systeme einen maximalen Schutz gegen Feuchtigkeit bieten, ist es notwendig, dass ein dauerhafter und vollflächiger Verbund zum Bauwerk besteht. Vor allem beim Ausschalen der Betonbauteile besteht bei einer zu geringen Verbundkraft das Risiko einer Ablösung des FBV-Systems vom Beton. Aber auch bei der Betonage kann es durch eine unvollständige Reaktion vom Zementleim mit der Verbundschicht bereits zu Verbundstörungen kommen. Aus diesem Grund sind Versuche durchgeführt worden, um sowohl die Entwicklung der Abziehfestigkeit in Abhängigkeit des Betonalters, als auch das Eindringverhalten von Zementleim in Vliesverbundschichten zu untersuchen.

Untersuchung der Entwicklung der Abziehfestigkeit verschiedener FBV-Systeme

Zur Untersuchung der Abziehfestigkeit ist ein Abziehversuch durchgeführt worden, der sich an der amerikanischen Norm ASTM D903 „Standard Test Method for Peel or Stripping Strength of Adhesive Bonds“ [4] orientiert hat. Dazu sind Probekörper in Form von Betonwürfeln hergestellt worden, bei denen an zwei gegenüberliegenden Seiten Teststreifen verschiedener FBV-Systeme angebracht worden sind. Die Probekörper sind anschließend nach jeweils 12 Stunden, 1, 2, 4 und 7 Tagen Erhärtungsphase ausgeschalt und in

eine Prüfmaschine eingesetzt worden. Diese hat die Teststreifen mit einer voreingestellten Zuggeschwindigkeit von den Probekörpern abgezogen; gleichzeitig ist über eine Kraftmessdose die dabei aufgebrachte Zugkraft elektronisch aufgezeichnet worden. Auf diese Weise ist für jedes Betonalter ein spezifischer Kraftwert berechnet und die Entwicklung in einem Kraft-Zeit-Diagrammen dargestellt worden (s. *Abbildung 4*). Insgesamt sind so $n = 301$ Versuche mit einer durchschnittlichen Standardabweichung von $s = \pm 6,93$ N durchgeführt worden.

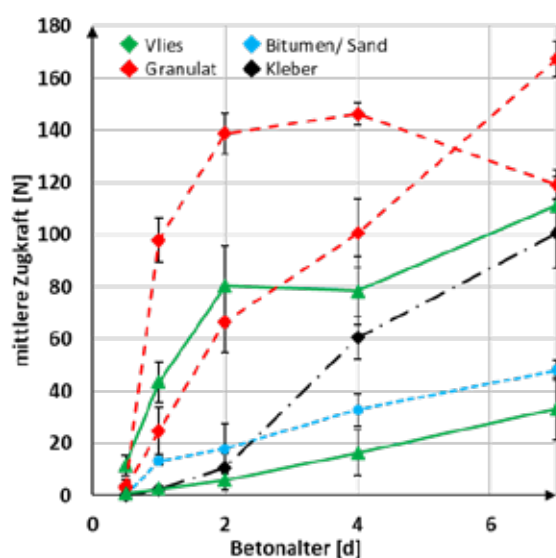


Abbildung 4: Entwicklung der Abziehfestigkeit bei FBV-Systemen mit unterschiedlicher Verbundschicht

In der Abbildung kann sehr deutlich die große Diskrepanz in der Entwicklung der Abziehfestigkeit erkannt werden, welche die verschiedenen FBV-Systeme erzielt haben. Allerdings gibt es auch im Vergleich von Systemen mit gleichartiger Verbundschicht große Kraftunterschiede, wie bei den vlieskaschierten FBV-Systemen zu erkennen ist. Dabei repräsentieren die beiden grünen Graphen im Diagramm die Ober- bzw. Untergrenze der untersuchten Systeme mit Vliesverbundschicht. Bei FBV-Systemen mit vollflächiger Klebeverbundschicht (im Diagramm schwarz) ist eine längere Erhärtungszeit und damit Reaktionszeit von Verbundschicht und Kleber notwendig gewesen, um einen wirksamen Verbund zum Beton aufzubauen. Die mit Abstand stärkste Verbundkraft haben die mit

Kunststoffgranulat beschichteten FBV-Systeme erreicht, bei denen der Verbund aus einer adhäsiven und mechanischen Wirkungsweise zusammengesetzt ist. Zum einen verzahnen sich Granulate in der Betonrandzone sehr gut, zum anderen wirkt der Kleber unter dem Granulat als zusätzlicher klebe-adhäsiver Verbund.

Spätestens ab einem Betonalter von vier Tagen ist bei fast allen FBV-Systemen während der Abziehversuche ein Versagen innerhalb der Verbundschicht beobachtet worden. Die Verbundkraft ist ab diesem Zeitpunkt folglich größer als die Eigenfestigkeit innerhalb des FBV-Systems selbst, was das Risiko der Entstehung einer Verbundstörung beim Ausschalen minimiert.

Untersuchung der Haftspannung zwischen verschiedenen Dichtungsschichten und einer Schalhaut

Zusätzlich zur Verbundkraft, die zwischen Verbundschicht und Betonrandzone wirkt, ist im Zuge der Bachelorarbeit auch die kohäsive Haftspannung zwischen der Dichtungsschicht und einer Schalhaut untersucht worden, die beim Ausschalen der Betonbauteile durch einen dünnen Wasserfilm entsteht. Hierzu ist ein eigener Versuchsaufbau entwickelt worden, bei dem ein Frischbetondruck simuliert worden ist, der auf mit FBV-Systemen versehene Probekörper eingewirkt hat. Anschließend sind die Probekörper mit einer konstanten Zuggeschwindigkeit von einer glatten Schalhaut abgezogen und zusätzlich der Einfluss von Feuchtigkeit zwischen Schalhaut und Dichtungsschicht untersucht worden. Hierfür sind verschiedene Gehalte an Feuchtigkeit auf der Schalhaut aufgebracht worden.

Im Versuch sind Dichtungsschichten mit verschiedenen Oberflächeneigenschaften wie etwa glatt, fasrig, rau oder profiliert getestet worden, um den Einfluss der Oberflächenstruktur

vergleichen zu können. Erwartungsgemäß hat sich bei einer sehr glatten Oberfläche durch die Oberflächenspannung eine vergleichsweise große Haftspannung zwischen der Dichtungsschicht und der Schalhaut aufgebaut. Besonders unter dem Einfluss von Feuchtigkeit ist hier die größte Spannungsspitze gemessen worden, wie im nachstehenden Diagramm zu erkennen ist.

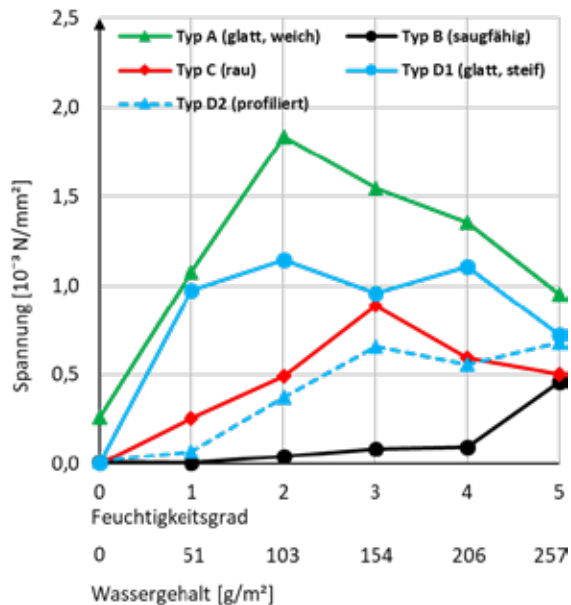


Abbildung 5: Spannungsverläufe der getesteten Dichtungsschichten in Abh. der aufgebracht Feuchtigkeit

Profilierte oder faserige Oberflächen haben im Gegensatz nur geringe Haftspannungen aufgebaut, da hier das Wasser in Hohlräumen verdrängt werden konnte. Im Allgemeinen ist aber bei fast allen Dichtungsschichten eine Spannungsspitze bei einem bestimmten Feuchtigkeitsgrad zu erkennen, was in der Praxis das Risiko einer Verbundstörung erhöht.

Korrelation der Eigenschaften einer Vliesverbundschicht und des Eindringverhaltens von Zementleim

Im Vorfeld zu dieser Arbeit ist an Probekörpern in einem WU-Prüfstand untersucht worden, wie weit ein FBV-System bei einer lokalen Beschädigung von Wasser hinterlaufen werden kann. Dieser Wert ist als ein Maß für das Eindringen von Zementleim herangezogen und anschließend

mittels Regressionsanalysen mit den Vlieseigenschaften in Zusammenhang gebracht worden. Hierzu sind die Eigenschaften Vliesdicke, Flächengewicht und Wasseraufnahmevermögen der Vliesverbundschicht bestimmt worden. Die Ergebnisse der Analysen haben gezeigt, dass vor allem geringe Vliesdicken das Eindringen von Zementleim erleichtern. Allerdings haben von dieser Beobachtung abweichende Ergebnisse verdeutlicht, dass eine Kombination mit den anderen Vlieseigenschaften zu Ausnahmen führen kann. So sind bei vereinzelt FBV-Systemen trotz hoher Vliesdicke geringe Werte in der Hinterläufigkeit erreicht worden, was auf das Einwirken bestimmter Vlieseigenschaften wie Faserorientierung, Faserdichte und Herstellparameter der Vliesherstellung zurückzuführen ist. Die in der Arbeit ermittelten Einstufungen der Dimensionierung einer Vlieseigenschaft sind deshalb auch als Richtwerte zu betrachten.

Des Weiteren ist die Auswirkung bautechnisch relevanter Einflussfaktoren wie etwa der Verdichtungsenergie beim Einbau der FBV-Systeme nicht zu vernachlässigen. So konnte bei den im Vorfeld durchgeführten Versuchen beobachtet werden, dass bei ausreichend hoher und langer Verdichtungsenergie fast kein System von Wasser hinterlaufen worden ist.

Fazit

Durch die in der Bachelorarbeit erarbeiteten Ergebnisse wird deutlich, dass sich die FBV-Systeme je nach Art der Verbundschicht, aber auch nach bestimmten Eigenschaften der Verbundschicht selbst auffallend unterschiedlich verhalten. Daher ist eine weitere Forschung und Entwicklung zur Optimierung der Systeme unbedingt notwendig, da diese jetzt schon erhebliche Vorteile bei der praktischen Anwendung bieten.

Literaturverzeichnis

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [1] DBV-Heftreihe 37: Frischbetonverbundfolien, Deutscher Beton- und Bautechnikverein e. V., Berlin, 2016 (Tagungsband zum 1. FBV-Fachkolloquium des DBV am 26.4.2016 in Berlin)
- [2] T. Freimann und R. Hohmann, „Leitfaden - Wasserundurchlässige Betonbauwerke,“ Tagungsband zum 10. Nürnberger Bauseminar, Nürnberg, 2016
- [3] K. Bergmeister, F. Fingerloos und J. D. Wörner, BetonKalender 2018, Berlin: Ernst & Sohn, 2018
- [4] ASTM International, ASTM D903-98 (Reapproved 2004): Standard Test Method for Peel or Stripping Strength of Adhesive Bonds, West Conshohocken, United States, 1998 (2004)

Quellen zur Thematik „Pro und Contra von Frischbetonverbundsystemen“

- [5] Kiltz, D.; Meyer, L.: Sind WU-Betonkonstruktionen ohne FBV-Systeme noch zeitgemäß? DBV-Rundschreiben Nr. 258; September 2018, Deutscher Beton- und Bautechnikverein e.V., Berlin.
- [6] Heinlein, U.: Vergleichende Untersuchungen zur baupraktischen Anwendung von Frischbetonverbundfolien bei WU-Bauwerken; Ingenieurwissenschaftliche Studie an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Fakultät Bauingenieurwesen, 03/2017
- [7] Freimann, T., Heinlein, U.: Planung und Anwendung der Frischbetonverbundsysteme bei wasserundurchlässigen Baukonstruktionen aus Beton, in Betonkalender 2018, S. 227-258, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [8] Schneider, M.: Umsetzung von hochwertig genutzten WU-Konstruktionen- Praxisbeispiele, von der Nutzungsanforderung zur Konstruktion, Der Bausachverständige, Heft 4, 2016, Fraunhofer IRB Verlag/Fraunhofer-Informationszentrum, Stuttgart

Autor, Coautoren

Kastner, Tobias

Werkstudent bei Ochs Rohrleitungsbau GmbH, Nürnberg (seit 2016)

Bachelor of Engineering an der TH Nürnberg, Georg-Simon-Ohm (2018)

Betreuer

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

Die wesentlichen Erkenntnisse der Bachelorarbeit sind bereits auf dem 3. Kolloquium des DBV zum Thema FBVS am 27.11.2018 in Berlin vorgestellt worden.

Die Arbeit wurde mit dem 1. Preis ausgezeichnet.

ERMITTLUNG DER BETONDRUCKFESTIGKEIT MITHILFE DER RESONANZMETHODE

Masterarbeit

Sandra Krautter

Die Arbeit befasst sich mit einem alternativen zerstörungsfreien Messverfahren zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit sowie der elastischen Materialkonstanten, dem Elastizitätsmodul. Bei dem besagten Messverfahren handelt es sich um die Resonanzmethode, mit welcher in sehr kurzer Zeit mehrere Materialkenngrößen an einem Betonprobekörper bestimmt werden können. Das Ziel der Forschung ist, zu klären, wie genau die Messmethode im Vergleich zu normierten Prüfverfahren ist. Des Weiteren werden Einsatzmöglichkeiten in einem Transportbetonunternehmen erarbeitet. Im Fokus der Untersuchungen stehen Betonprobewürfel und -zylinder. Der Betonwürfel verhält sich bei der Messung mit der Resonanzmethode anders als ein länglicher Körper, da das Schwingungsverhalten sehr viel komplexer ist. Es wird untersucht, welche Faktoren das Schwingungsverhalten des Betonwürfels beeinflussen. Die mit der Resonanzmethode ermittelten Ergebnisse der Kenngrößen Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul werden Ergebnissen von genormten Messverfahren gegenübergestellt. Für die Untersuchungen werden vier Betonsorten betrachtet. Die Ergebnisse der E-Moduln zeigen dabei gute Übereinstimmungen. Um die Druckfestigkeit zu bestimmen sind vorab Versuche notwendig, die das Verhältnis von Druckfestigkeit und E-Modul (ähnlich Bezugsgerade bei Rückprallhammer) sortenspezifisch festlegen.

Keywords: E-Modul, Druckfestigkeit, Resonanzmethode, Frequenz, Zerstörungsfreie Messung

Die Aufgabenstellung

Das Gerät „RA 100 Concrete“ der Firma Lang Sensorik soll laut Hersteller über ein zerstörungsfreies Verfahren die Druckfestigkeit sowie das dynamische E-Modul an einem definierten Probekörper bestimmen können. Die Probekörper können in Form eines Würfels, eines Zylinders, eines

Prismas oder eines Balkens geprüft werden. Bekannt sein müssen die Abmessungen sowie das Gewicht des Probekörpers. Der Probekörper wird durch die Anregung mit einer Stahlkugel in Schwingung versetzt. Ein Mikrofon zeichnet diese Schwingung auf. Mit weiteren Faktoren bzw. Funktionen, die in der Software des Messgeräts hinterlegt sind, werden die Betongrößen dyna-

mischer E-Modul, statischer E-Modul und die Druckfestigkeit bestimmt. Diese Art der Messung wird als Resonanzmethode bezeichnet.

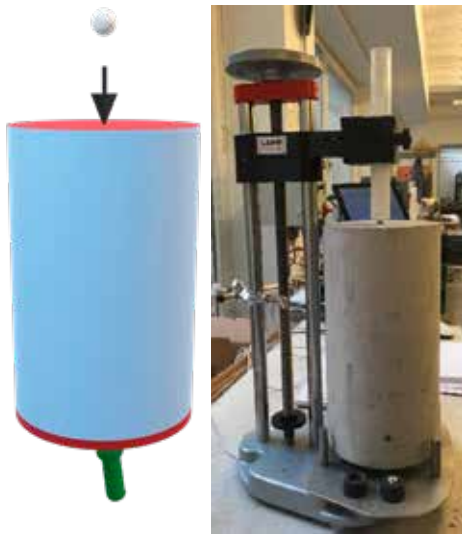


Abbildung 6: links eine Schemazeichnung des Messvorgangs am Zylinder, rechts das Messgerät. Es werden die Funktionsweise und die Genauigkeit der Resonanzmethode unter verschiedenen Einflussfaktoren untersucht. Der Zusammenhang von E-Modul und Druckfestigkeit spielt eine entscheidende Rolle, da er die Basis für die Messmethode liefert. Zunächst wird der theoretische Zusammenhang geklärt. Anschließend wird die Umsetzung dieser Theorie bei der Resonanzmethode untersucht. Auf Grundlage der Ergebnisse wird geklärt, inwiefern das Gerät in der Praxis, vorwiegend in einem Transportbetonwerk, eingesetzt werden könnte. Dabei sind die Leitfragen: Mit welcher Genauigkeit kann die Druckfestigkeit und der E-Modul mit der Resonanzmethode bestimmt werden? Wie groß dürfen die Schwankungen in der Praxis sein?

Die Vorgehensweise

Der Betonwürfel, welcher in Deutschland überwiegend zur Bestimmung der Druckfestigkeit verwendet wird, verhält sich bei der Messung mit der Resonanzmethode anders als ein länglicher Körper. Das Schwingungsverhalten ist hier sehr viel komplexer. Es wird untersucht, welche Faktoren das Schwingungsverhalten des Betonwürfels beeinflussen können. Für die Untersuchungen werden 4 Betonsorten betrachtet.

Sorte	Zement	w/z-Wert
B1	Cem I 42,5 R	0,45
B2	Cem I 42,5 R	0,55
B3	Cem I 42,5 R	0,5
B4	Cem III B 32,5 N LH	0,45

In einem ersten Schritt werden die Stimmigkeit und Reproduzierbarkeit der Resonanzmethode untersucht. Hierfür werden am Zylinder und am Würfel einzelne Parameter untersucht. Zu diesen zählen verschiedene Mikrofone, unterschiedliche Kugelgrößen für die Anregung, Anregung des Würfels und des Zylinders an unterschiedlichen Stellen und weitere Parameter.

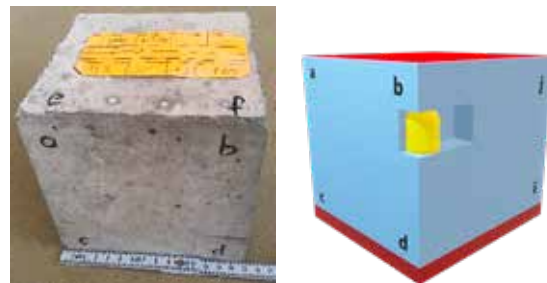


Abbildung 7: Beispiel für die Untersuchung am Würfel; links Wiederholung der Messung an 10 Punkten; rechts Auswirkungen eines Fremdkörpers

In einem zweiten Schritt werden die mit der Resonanzmethode ermittelten Ergebnisse der Kenngrößen Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul mit Ergebnissen von genormten Messverfahren, wie Bestimmung der Druckfestigkeit mit der Druckpresse und dem Rückprallhammer sowie Bestimmung des E-Moduls mit der Druckpresse und dem Ultraschallverfahren gegenübergestellt.

Die E-Moduln

Der Eurocode 2 [1] verwendet eine Formel, mit welcher von der Druckfestigkeit auf den E-Modul (Sekantenmodul) geschlossen werden kann:

$$E_{cm} = 22.000 \cdot (f_{cm}/10)^{0,3} = 11.000 \cdot f_{cm}^{0,3}$$

Dabei wird ein Faktor für die verwendete Gesteinskörnung empfohlen. Allerdings ist die verwendete Gesteinskörnung nicht allein ausschlaggebend für den Zusammenhang zwischen E-Modul und Druckfestigkeit. Hinzu kommt die Kontaktzone zwischen Zement und Gesteins-

körnung, die Menge der Gesteinskörnung und weitere Faktoren. Des Weiteren ist die Bestimmung des E-Moduls und der Druckfestigkeit nach Norm sehr stark zeitabhängig. Hierfür ist das Kriechen verantwortlich. Somit kommt es zum Beispiel zwischen deutscher und amerikanischer Messmethode zu abweichenden Ergebnissen.

Die Resonanzmethode verwendet als Ausgangswert den dynamischen E-Modul, welcher keinen bzw. einen nur sehr geringen Kriechanteil beinhaltet, da die Messung in Bruchteilen von Sekunden abläuft. Auf der Grundlage von weiteren Forschungsarbeiten auf diesem Themengebiet, wie jene von Demarest und Popovic, ermittelt das Messgerät der Firma Lang Sensorik mit dem gemessenen dynamischen E-Modul die Normmessgrößen Sekantenmodul und Druckfestigkeit.

Die Ergebnisse

Wurden bei gleichbleibender Messstelle am Prüfkörper äußere Parameter verändert, so konnten sehr gute Übereinstimmungen der Ergebnisse festgestellt werden. Bei der Variation der Messstelle am Zylinder war dies ebenso der Fall. Bei der Variation der Messstelle am Würfel konnten dagegen Differenzen in den Ergebnissen beobachtet werden. Es hat sich gezeigt, dass der Würfel in den meisten Fällen zwei unterschiedliche Frequenzbereiche besitzt. Dies ist abhängig von der Lageposition bei der Messung. Es wird zwischen horizontaler Lage und vertikaler Lage differenziert, welche sich auf die Produktionsposition bezieht.

Das Ziel der Untersuchung, die Resonanzmethode als Messverfahren für die Bestimmung der Betondruckfestigkeit zu verwenden, konnte nur bedingt erbracht werden. Die geringe Übereinstimmung der Druckfestigkeitsergebnisse der Resonanzmethode mit Normprüfungen konnte sowohl bei Betonprobewürfeln, als auch bei Zylindern beobachtet werden.

Die Recherchen zeigen, dass ein direkter Zusammenhang zwischen E-Modul und Druckfestigkeit nicht besteht. Dieser Zusammenhang bildet jedoch die Grundlage für die Bestimmung der

Druckfestigkeit mit der Resonanzmethode. Durch diese Vereinheitlichung kommt es bei den Ergebnissen der Resonanzmethode zu unterschiedlich starken Abweichungen der einzelnen Sorten im Vergleich mit der Normprüfung mit der Druckpresse nach DIN EN 12390-3 [2]. Dies beweist, dass jede Betonmischung ein eigenes Verhältnis von E-Modul zu Druckfestigkeit aufweist. Bei den CEM I Sorten konnte ein Zusammenhang zwischen einem kleiner werdenden w/z -Wert und einer wachsenden Abweichung der Ergebnisse der beiden Messverfahren beobachtet werden. Die CEM III B Sorte zeigt die größten Abweichungen zum angenommenen Verhältnis zwischen E-Modul und Druckfestigkeit auf, was mit dem grundlegend anderen Verhalten der Festigkeitsentwicklung zusammenhängt.

Ein weiterer Vergleich der Ergebnisse der Resonanzmethode für die Druckfestigkeit wurde mit dem Rückprallhammer nach DIN EN 12504-2 [3] vorgenommen. Dabei hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse der zwei Messverfahren sehr stark voneinander abweichen. Beim Vergleich der Ergebnisse der zwei Messverfahren mit der Bestimmung der Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 [2] war zu erkennen, dass die Ergebnisse der Resonanzmethode größer und die Ergebnisse des Rückprallhammers kleiner als die der Druckpresse sind. Die Methode des Rückprallhammers kann jedoch selten ohne Bezugsgerade verwendet werden, wodurch eine direkte Bestimmung der Druckfestigkeit nicht möglich ist. Eine Stimmigkeit der einzelnen Probekörper je Sorte untereinander zu prüfen, wofür der Rückprallhammer empfohlen wird [3], konnten beide Verfahren nachweisen.

Die Ergebnisse des Sekantenmoduls der Resonanzmethode wurden mit denen der Normprüfung nach DIN EN 12390-13 [4] gegenübergestellt. Es konnte ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Ergebnissen des statischen E Moduls der beiden Messverfahren festgestellt werden. 60 % der Prüfkörper hatten hier Übereinstimmungen mit einer Genauigkeit von ca. 1,0 GPa. Hier ist zu erwähnen, dass bei den Messungen nach DIN EN 12390-13 [4] Fehlmessungen entstanden sind.

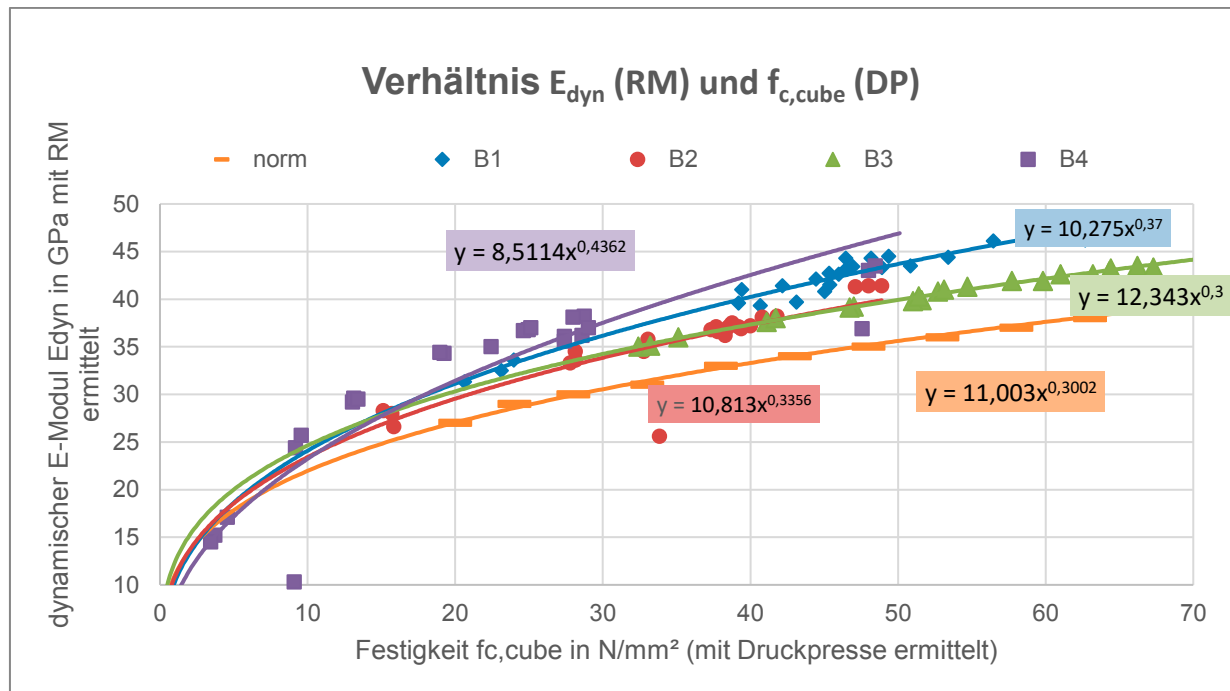


Abbildung 8: Funktion für die Bestimmung der Druckfestigkeit mittels der Resonanzmethode, Gegenüberstellung des dynamischen E-Moduls gemessen mittels der Resonanzmethode RM und der Druckfestigkeit $f_{c,cube}$ gemessen nach Norm mit der Druckpresse DP und Darstellung der Funktion nach Norm DIN EN 1992-1-1

Dies ist für eine nicht genauere Übereinstimmung der beiden Messverfahren verantwortlich.

Die Ergebnisse des dynamischen E-Moduls wurden mit denen der Ultraschalluntersuchung gegenübergestellt. Diese erfolgte nach DIN EN 12504-4 [5] und nach Norm ASTM C597-16 [6]. Im Vergleich hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse mit der Ultraschallmethode deutlich größer sind, als die der Resonanzmethode.

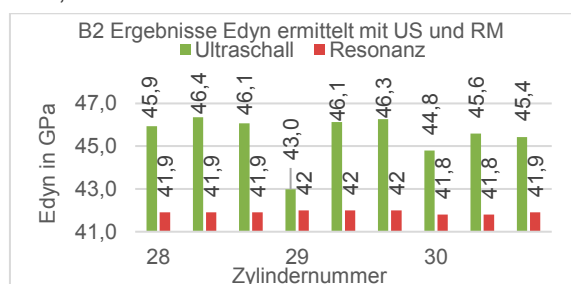


Abbildung 9: B2 - Ergebnisse für E_{dyn} ermittelt mit der Ultraschallmethode US und mit der Resonanzmethode RM im Alter von 28 Tagen; dreifach wiederholte Messung je Zylinder

Die Recherchen haben hierzu ergeben, dass die Ultraschallmethode nicht genau genug ist, um den E-Modul von Beton zu bestimmen. Die Verifizierung des statischen E-Moduls, welches den

dynamischen E-Modul als Grundlage hat, bestätigt die Resonanzmethode als genaueres Verfahren im Vergleich zur Ultraschallmethode.

Das Fazit

Das Verhältnis zwischen Betondruckfestigkeit und E-Modul variiert je nach Zusammensetzung der Betonsorte. Für die Verwendung der Resonanzmethode zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit ist es daher notwendig, für jede Betonrezeptur eigene Korrekturfaktoren (je Prüfalter) bzw. eine Korrekturfunktion (Festigkeitsverlauf) zu bestimmen. Exemplarisch wurden für die vier untersuchten Betonsorten Korrekturfunktionen ermittelt. Unter Verwendung dieser Funktionen kann für die 4 beschriebenen Betonsorten die Betondruckfestigkeit bestimmt werden. Für ein Transportbetonunternehmen wäre es durchaus interessant für wenige Standardsorten diese Kalibrierung durchzuführen, um so z.B. ein verfrühtes Ausschalen zu ermöglichen oder Qualitätsschwankungen frühzeitig entgegen zu wirken.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Norm DIN EN 1992-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken; Januar 2011
- [2] Norm DIN EN 12390-3: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Juli 2009
- [3] Norm DIN EN 12504-2: Prüfung von Beton in Bauwerken – Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung – Bestimmung der Rückprallzahl; Dezember 2012
- [4] Norm DIN EN 12390-13: Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul); Juni 2014
- [5] Norm DIN EN 12504-4: Prüfung von Beton in Bauwerken – Teil 4: Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit; Dezember 2004
- [6] Norm ASTM C597-16: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Demarest H. H. (1969): *Cube-Resonance Method to Determine the Elastic Constants of Solids* – In: The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 49 Nr.3 Part 2, 1991
2. Popovics J. S. (2008): *A Study of Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete*, ACI-CRC Final Report, University of Illinois, Urbana
4. Fingerloos, Hegger, Zilch (2016): *Eurocode 2 für Deutschland - Kommentierte Fassung*, 2. überarb. Aufl., Berlin (Beuth Verlag)
5. Brameshuber W. (2016): „*Einflussgrößen, Vorhersagen, Prüfungen und Erfahrungen aus der Praxis – Elastizitätsmodul von Beton*“ Ausgabe 11/2016 (November) S. 443

Autor, Coautoren

Sandra Krautter

03/2013 – 2/2017

Bachelor of Engineering

Hochschule für Technik Stuttgart

Bauingenieurwesen (Vertiefung

Konstruktiver Ingenieurbau)

Praktikum und Werkstudent bei der Wolff und Müller GmbH

(Unterstützung der Projektleitung)

Bachelorand und Werkstudent im Planungsbüro TW+

(Erbebenbemessung einer Werkspforte)

03/2017 – 09/2018.

Master of Engineering

Hochschule München

Allgemeiner Ingenieurbau

Masterand und Werkstudent im Beton- und Baustoffprüflabor Körsch

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München an der Fakultät für Bauingenieurwesen im Studiengang Allgemeiner Ingenieurbau. Betreuerin war Prof. Dr.-Ing. Andrea Kustermann.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNGEN ZUR MIKROBIELLEN VERFESTIGUNG VON SAND DURCH DEN BAKTERIENSTAMM SPOROSARCINA PASTEURII

Bachelorarbeit

Florian Parhofer

Die durch Bakterien induzierte Ausfällung von Calciumcarbonat (englisch MICP, microbial induced calcite precipitation) lässt sich auf vielfältige Weise im Ingenieurwesen nutzen. Eine der elementarsten Anwendungsmöglichkeiten ist die Verfestigung von Böden, welche hier in dieser Arbeit eingehend untersucht wird. Hierbei wird der Bakterienstamm *Sporosarcina pasteurii* zusammen mit Harnstoff und Calciumchlorid in eine definierte, mit Sand gefüllte, Probeform injiziert. Durch das Ureaseenzym wird die Hydrolyse von Harnstoff zu Carbonat stark katalysiert und es bildet sich zusammen mit den Calciumionen des Calciumchlorids, Calciumcarbonat. Ziel dieser Arbeit ist ein Funktionstest des MICP Prozesses und die weitere Optimierung der Festigkeiten durch die Variation von Konzentrationen und Umgebungsbedingungen. Hierzu wurden zwei Versuchsaufbauten entwickelt, welche unter verschiedensten Bedingungen die Bestimmung der Verfestigung der Probekörper ermöglichen. Die verfestigten Proben erreichten, je nach Umgebungsbedingungen, eine Festigkeit von ca. 0,1 – 1,5 N/mm². In dieser Bachelorarbeit wurde nachgewiesen, dass der MICP Prozess durch verschiedenste Parameter beeinflussbar ist und nach weiteren Untersuchungen, vermutlich als eine alternative Bodenverfestigungsmethode angewendet werden kann. Hieraus lassen sich auch positive Erkenntnisse für andere Anwendungsbereiche des MICP Prozesses ziehen.

Keywords: MICP, Bakterielle Baugrundverfestigung, Biozementierung, Calciumcarbonatausfällung, *Sporosarcina pasteurii*, Bauchemie, Grundbau, Materialwissenschaften

Einleitung und Zielsetzung

Die Infrastruktur muss dem Anspruch einer wachsenden Weltbevölkerung gerecht werden und zwingt Ingenieure Lösungen zu entwickeln, um Straßen und Brücken langfristig auch auf sandigen Böden gründen zu können. Oft wird hierbei auf bodenverfestigende Maßnahmen aus Zement zurückgegriffen. Die Herstellung von Zement ist aber sehr energieintensiv, sodass nach Alternativen gesucht wird. Eine Möglichkeit, welche in Zukunft den internationalen Verbrauch von Zement verringern könnte, ist der Prozess der mikrobiellen Ausfällung von Calciumcarbonat durch Bakterien. Dieser Prozess besitzt darüber hinaus viele weitere potenzielle Anwendungs-

gebiete im Ingenieurwesen, wie das nachträgliche verschließen von Rissen im Beton, Bindung von Schwermetallen, Restaurierung von Natursteinen etc., weshalb es sich lohnt diesen Prozess eingehend zu studieren.

Der MICP Prozess

Die durch Bakterien induzierte Ausfällung von Calciumcarbonat ist ein durchaus komplexer Prozess, da dieser sehr eng mit dem ATP Kreislauf (Adenosintriphosphat, unmittelbar verfügbare Energieträger in Zellen und Mikroorganismen) des Mikroorganismus gekoppelt ist. Vereinfacht ist der Prozess in Abbildung 1 dargestellt.

Zuerst diffundiert Urea (Harnstoff) ins Innere der Bakterienzelle (1), wo es katalysiert durch das Ureaseenzym des Bakteriums *Sporosarcina Pasteurii* hydrolysiert (2) (in Ammoniumionen und Carbonationen zerfällt).

Die bei der Hydrolyse anfallenden Ammoniumionen werden aus der Bakterienzelle ausgestoßen (3), was zu einer negativen Aufladung des Zellplasmas und einer Erhöhung des pH-Wertes der Umgebung des Bakteriums führt.

Aufgrund des negativen Zellplasmas diffundieren Protonen in die Zelle und es kommt zur Bildung von ATP (4). Darüber hinaus kommt es zu einer elektrischen Bindung von Calciumionen an die Oberfläche der Bakterien (5). Die Calciumionen und die Carbonationen reagieren an der Bakterienoberfläche und es kommt zur Ausfällung von Calciumcarbonat und Einkapselung des Bakteriums (6).

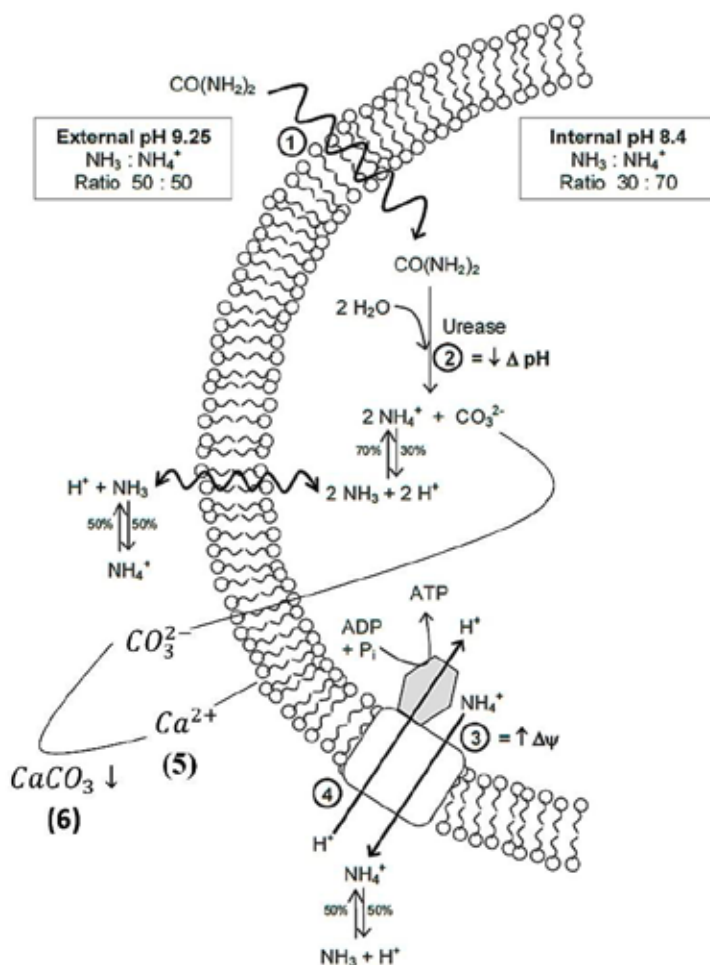


Abb. 1: Der MICP Prozess im Inneren einer Bakterienzelle, nach Victoria Whiffin [1]

Stand der Technik

Der MICP Prozess wurde bereits von einigen namhaften Wissenschaftlern, siehe [3-7] erforscht und die wissenschaftlichen Grundlagen sind allgemein anerkannt. Bei der ingenieurmäßigen Nutzung der naturwissenschaftlichen Erkenntnisse gibt es aber noch Diskussionsbedarf. Die richtigen Konzentrationen der Nährmedien, Zugabeintervalle, optimale pH-Werte, hemmende und beschleunigende Umwelteinflüsse sind in allen Veröffentlichungen zu diesem Thema unterschiedlich und liefern sehr stark streuende Ergebnisse. Die optimalen Bedingungen für eine gleichmäßige, starke und dauerhafte Verfestigung werden noch experimentell gesucht und sind demnach auch Kern dieser Arbeit.

Versuchsaufbau

Zur Untersuchung der Einflussfaktoren wurden zwei Versuchsaufbauten genutzt. Einen kleineren Versuchsaufbau 1, bei dem 50 g Sand zu einem Quader (50x50x25mm) verfestigt wird und einen Größeren (2), wobei 1220 g Sand zu einem Zylinder (D=54mm, l=300mm) verkittet wird.

Der kleinere Versuchsaufbau 1 wurde von [2] entwickelt und dient zur Reproduktion deren Ergebnisse und erlaubt durch die geringeren Probenmengen größere Probenzahlen.

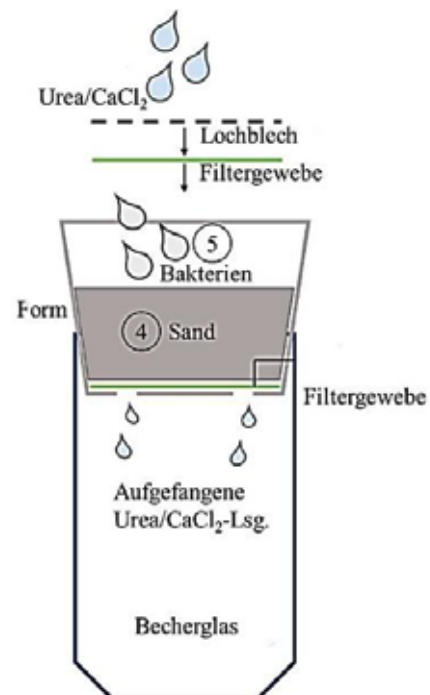


Abb. 2: Versuchsaufbau 1, Bakterien, Urea und CaCl_2 sickern durch eine Sandprobe, welche sich zwischen zwei Filtergeweben in einer quaderförmigen Form befindet. Das Durchlaufwasser wird in einem Becherglas aufgefangen. [2]

Um weiterhin zu erfahren, welchen Einfluss Sickerströmungen, die Abnahme der Konzentration der Bakterien und der Nährlösung und der Rückgang des Sauerstoffgehaltes mit zunehmender Tiefe haben, wurde zudem der zweite größere Versuchsaufbau (2) entwickelt.

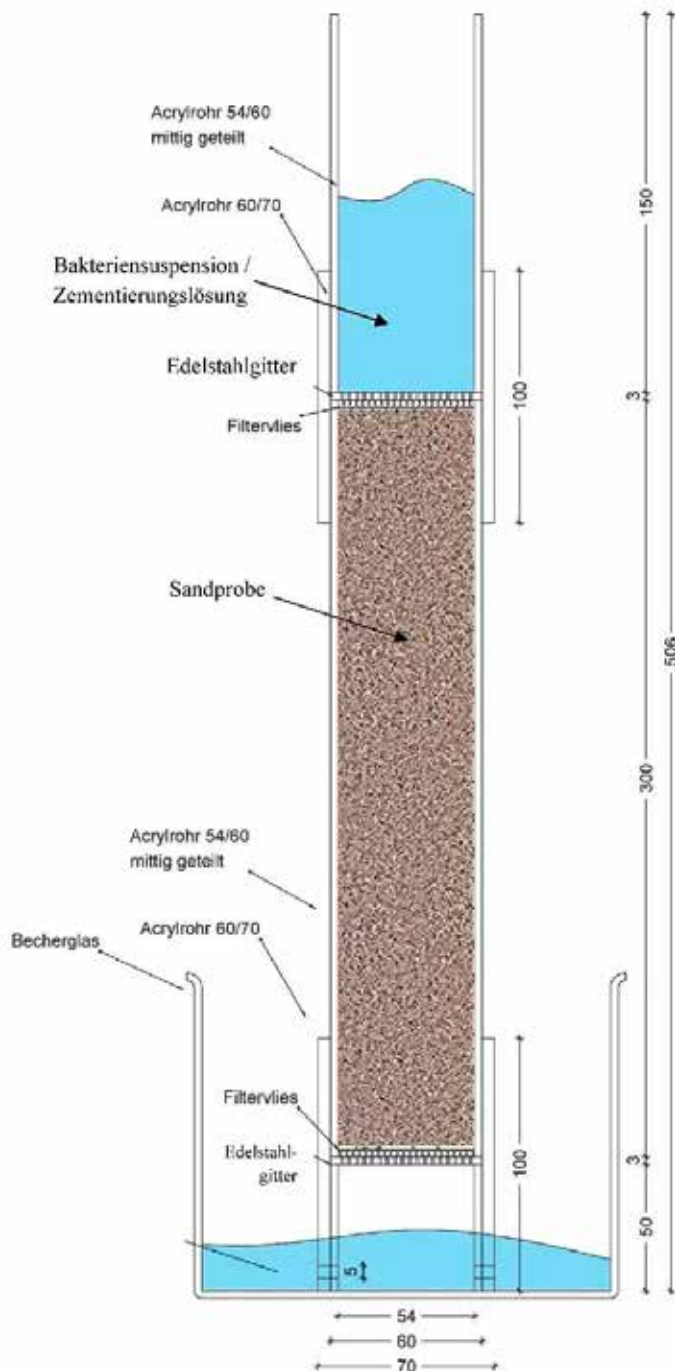


Abb. 3: Versuchsaufbau 2, Bakterien, Urea und CaCl_2 sickern durch eine Sandprobe, welche sich zwischen zwei Filtergeweben in einer zylindrischen Form befindet. Das Durchlaufwasser wird in einem Becherglas aufgefangen.

Getestete Einflussfaktoren

Insgesamt wurden vier Versuchsreihen durchgeführt. Die folgenden Randbedingungen des MICP Prozesses wurden hierbei variiert und untersucht.

- Menge, Konzentration, Anzahl der Zugaben und Zeitpunkt der Zugabe von Urea und Calciumchlorid (Nährlösung der Bakterien und Calciumquelle)
- Bakterienmenge, Anzahl der Zugaben und Zugabeintervall
- Abhängigkeit von pH-Wert und Temperatur
- Verschiedene Fixierungsmethoden gegen das Auswaschen der Bakterien
- Einflüsse von Freienteilen, Feuchtigkeit und Eingriffe in den Verfestigungsverlauf

Als zu verfestigendes Medium wurde hierbei Kalksand, Quarzsand und zerstoßener Mörtel aus einem Bestandsgebäude und aus eigener Anmischung, mit unterschiedlichen Körnungslinien verwendet.

Untersuchungsmethodik

Alle Probekörper wurden während des Versuchs überwacht und nach Ende der Verfestigungsphase getestet. Während der Versuchsdurchführung wurde der Ammoniumgehalt, die Leitfähigkeit und der pH-Wert des Durchlaufwassers täglich gemessen. Die Menge an ausgefälltem Calciumcarbonat wurde gewogen.

Nach einer Trocknung der Probekörper für 96 Stunden bei 50°C im Klimaschrank, wurden die durch das CaCO_3 der Bakterien verfestigten Proben, einaxial mit einer Druckpresse Zwick Z10 geprüft. Um eine definierte Prüffläche zu erhalten und Querkraftkräften entgegenzuwirken, wurden die kleineren Proben von Versuchsaufbau 1 zwischen zwei $30 \times 30 \text{ mm}$ großen Stahlquadraten positioniert und in die Prüfmaschine eingelegt (vgl. Abb. 4).

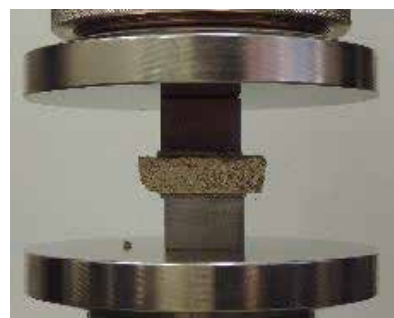


Abb. 4: verfestigte Proben von Versuchsaufbau 1 zwischen zwei $30 \times 30 \text{ mm}$ großen Stahlquadraten in der Druckpresse Zwick Z10

Die Proben von Versuchsaufbau 2 wurden mechanisch in 50mm hohe Zylinder zerschnitten und dann druckgeprüft. Eine ebene Abgleichung der Proben mittels Gipses bzw. Polymerharz war auf Grund der Feuchtigkeitsanfälligkeit der Proben und der geringen Probenhöhe von Proben aus Versuchsaufbau (1) (mehrdimensionaler Spannungszustand bei Polymerharzabgleichung) nicht möglich.

Nach dem Drucktest wurden die Gesteinsbruchstücke makroskopisch und mikroskopisch untersucht (vgl. Abb. 5).



Abb. 5: mikroskopische Untersuchung von Gesteinsbruchstück mit anhaftendem, von den Bakterien gebildeten Calciumcarbonat (weiße Kristalle zwischen den Gesteinskörnern). 100-fache Vergrößerung

Auch die Kalkablagerungen an den Seitenwänden der Bechergläser und die auf den Durchlaufwasser schwimmenden Kalkschiffchen (vgl. Abb. 6) wurden mikroskopisch untersucht, um das Auftreten der verschiedenen Modifikationen (chemisch identischer Aufbau, aber unterschiedliche räumliche Kristallstruktur mit unterschiedlichen Eigenschaften) des Calcium-carbonates beobachten zu können.

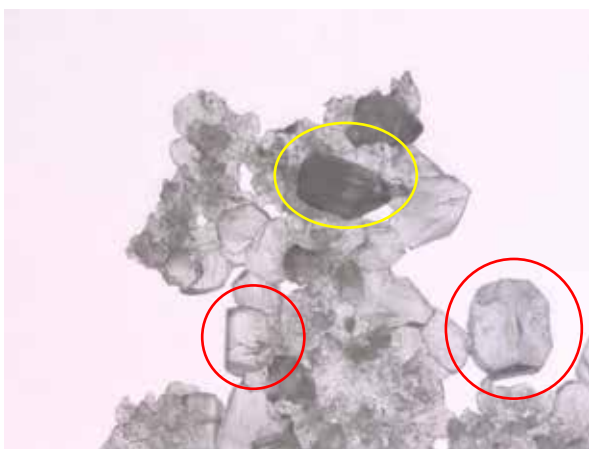


Abb. 6: mikroskopische Untersuchung eines auf den Durchlaufwasser schwimmenden Kalkschiffchens. Die trigonale Kristallstruktur von Calcit (rote Kreise) ist gut zu erkennen und die hexagonale Form von Vaterit (gelber Kreis) könnte erahnt werden. 200-fache Vergrößerung

Ergebnisse

Der hohe Ammoniumgehalt, welcher parallel zum pH-Wert und gegenläufig zur Leitfähigkeit steigt (vgl. Abb. 7), legt nahe das auch bei niedrigen Temperaturen um 10°C eine hohe Ureaseaktivität gegeben ist und somit der MICP Prozesses anwendbar ist.

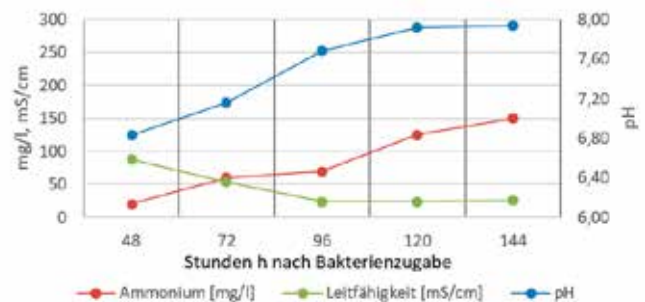


Abb. 7: beispielhaftes Diagramm, Mittelwert Proben 3.5.7-9, Ammoniumgehalt (rot), Leitfähigkeit (grün) und pH-Wert (blau) des Durchlaufwassers über den Versuchszeitraum.

Ein Anstieg der Festigkeit ist bis zur fünften Zementierungslösungszugabe nach der Bakterienzugabe zu verzeichnen. Ein Ersatz der ausgewaschenen Bakterien vor jeder, bis jeder zweiten Zementierungslösungszugabe erhöht die Festigkeit erheblich. Die größte Aktivität der Bakterien lässt sich bei einem pH-Wert knapp über pH 9 feststellen. Einer guten Fixierung der Bakterien durch ein Fixierungsmittel kommt eine entscheidende Rolle zu. Die Zusammensetzung des zu verfestigenden Sandes und die Korngrößenverteilung haben ebenfalls einen Einfluss auf die zu erreichenden Festigkeiten. Ein gestufter Sand mit einem nicht zu großen Anteil an Feinanteilen lässt sich am besten verfestigen. Ein zu großer Anteil an Feinanteilen wirkt sich negativ aus, was auch das Scheitern des MICP Prozesses bei Mörteln erklären könnte.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass der MICP Prozess sich durch verschiedenste Effekte beeinflussen lässt. Bei einem längeren Verfestigungszeitraum ist diese Methode eine sehr gute Alternative für die Verfestigung von Böden. Besonders unter Verkehrswegen oder bei der Verfestigung von Deichen könnte der MICP Prozess in naher Zukunft eingesetzt werden. Für die Langzeitfestigkeit besonders im Zusammenhang mit Feuchtigkeit sind aber noch weitere Untersuchungen nötig.

Literaturverzeichnis

Im Text verwendete und für die Bachelorarbeit bedeutende Quellen

- [1]: Whiffin, Victoria. „Microbial CaCO₃ Precipitation for the production of Biocement“. Perth, Western Australia: Murdoch University, 2004
- [2]: Lindermayer, Judith. Bachelorarbeit: „Untersuchungen zur Verfestigung von Sand und Bindung von Schwermetallen in Sanden durch Mikroorganismen“. Veröffentlicht am 10. August 2017: Hochschule München, Deutschland, 2017
- [3]: Paassen, Leon van. „Biogrout, Ground Improvement by Microbially Induced Carbonate Precipitation“. Niederlande: Technische Universität Delft, 2009
- [4]: Dosier, Ginger K. „Production of Masonry with Bacteria“. North Carolina USA: Patent Application Publikation, 15. December 2016
- [5]: Sahm Hermann, Garabed Antranikian, Klaus-Peter Stahmann, Ralf Takors. „Industrielle Mikrobiologie“. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum
- [6]: Alhour, Mohammed T. Isolation, „Characterization and Application of Calcite Producing Bacteria from Urea Rich Soils“. Gaza: Islamic University
- [7]: Al-Thawadi, Salwa M. „High Strength in Situ Biocementation of Soil by Calcite Precipitating Locally Isolated Ureolytic Bacteria“. Perth, Western Australia: Murdoch University, 2008

Autor

Florian Parhofer studierte zunächst zwei Semester am gemeinsamen Studiengang Geowissenschaften von LMU und TUM und wechselte dann zum Studiengang Bauingenieurwesen an die Hochschule München. Nach dem abgeschlossenen Bachelorstudium im Frühjahr 2018 setzt er sein Masterstudium an der Hochschule München fort.

Betreuer

Ganz herzlichen Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Andrea Kustermann, welche die Professur der Bauchemie an der Fakultät für Bauingenieurwesen an der Hochschule München leitet und die hier vorgestellte Bachelorarbeit betreut hat. Weiterer Dank gilt Frau Dr. rer. nat. Johanna de Reese und Herrn Martin Lutz vom Labor für Bauchemie, für ihre Unterstützung bei der Durchführung der Versuchsreihen und wertvollen Gedankenanstöße. Die Forschung in diesem Gebiet war nur möglich durch die enge Zusammenarbeit mit dem Labor für Biotechnologie der Fakultät 09 unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Robert Huber, welchem ich, zusammen mit Frau Inken Bostelmann und Frau M. Sc. Dipl.-Ing. Stefanie Bauer (welche die Fermentation der *Sporosarcina pasteurii* durchführten) herzlichst für ihren Arbeitsaufwand und ihre Ratschläge danke.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ÜBERTRAGBARKEIT VON PRINZIPIEN UND METHODEN DES LEAN CONSTRUCTION AUF INSTANDSETZUNGS- MASSNAHMEN IN DER BAUWERKSERHALTUNG

Masterarbeit

Dominik Picha

Das Thema Lean Construction beschäftigt momentan große Teile der Bauindustrie. Insbesondere die Implementierung von Prinzipien und Methoden stellt Verantwortliche oft vor große Herausforderungen. Diese Abschlussarbeit untersucht anhand eines pragmatischen Ansatzes die im Titel benannte Übertragbarkeit auf ein in seiner Bedeutung wachsendes Aufgabengebiet planender Ingenieure wie ausführender Firmen: Die Bauwerkserhaltung. Dabei werden umfangreiche Untersuchungen an konkreten Arbeitsprozessen in der Realisierung von Instandsetzungsmaßnahmen sowie übergeordnet an administrativen Abläufen vorgenommen und ausgewertet. Anhand der gewonnenen statistischen Daten sowie subjektiver Beobachtungen werden Handlungsempfehlungen zu potenziellen Verbesserungen in den Prozessen entwickelt und vorgeschlagen. Der gewählte Ansatz zeigt durch die Vielzahl der Erkenntnisse die Potenziale einer Umsetzung der Lean Arbeitsweise auch in diesem Fachbereich auf und unterstreicht damit die formulierte Übertragbarkeit. Das Vorgehen lässt sich weiterhin als Ansatzpunkt zur Einführung von Lean Construction auch in anderen Geschäftseinheiten oder Unternehmen adaptieren.

Keywords: Lean Construction, Bauwerkserhaltung, Prozessoptimierung, Instandsetzung, Wertstrom, Multimomentaufnahme

Hintergrund und Vorgehen

Aktuell befindet sich die Baubranche in Deutschland in einem historischen Veränderungsprozess. Neben den Schlagwörtern BIM und Digitalisierung spielt auch das Thema Lean Construction eine große Rolle. Während in anderen Fachbereichen bereits seit geraumer Zeit Prinzipien und Methoden jener Managementphilosophie Anwendung finden, sind diese im Bereich der Bauwerkserhaltung noch

weitestgehend unbekannt. Die Bauwerkserhaltung gewinnt jedoch aufgrund der alternden Bausubstanz in Deutschland zunehmend an Bedeutung. Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung, ob und inwieweit sich Aspekte des Lean Construction auf Instandsetzungsmaßnahmen in der Bauwerkserhaltung übertragen lassen.

Wertschöpfung und Verschwendung

Zur Untersuchung der im Titel aufgeworfenen Fragestellung fällt die Wahl bezüglich des konkreten Ansatzpunktes nach einer umfangreichen und fundierten theoretischen Herleitung der Grundlagen des Lean Construction auf das zweite Lean Prinzip: Die Identifikation des Wertstroms.

Folglich werden praktisch eine Wertstromanalyse (WSA) und eine umfangreiche, mehrwöchige Multimomentaufnahme (MMA) durchgeführt. Erstere bezieht sich auf den Gesamtprozessablauf bei der Züblin Bauwerkserhaltung und konzentriert sich auf die übergeordneten, administrativen Abläufe. In diesem Zuge werden die notwendigen Abläufe vom Eingang der Kundenanfrage beim Standortleiter bis hin zur Abnahme der Leistung und damit dem Übergang in die Gewährleistungsphase aufgenommen, analysiert und visualisiert.

Dabei werden auch entsprechende Handlungsfelder erkannt und festgehalten, die den Protagonisten als erste Möglichkeit zur

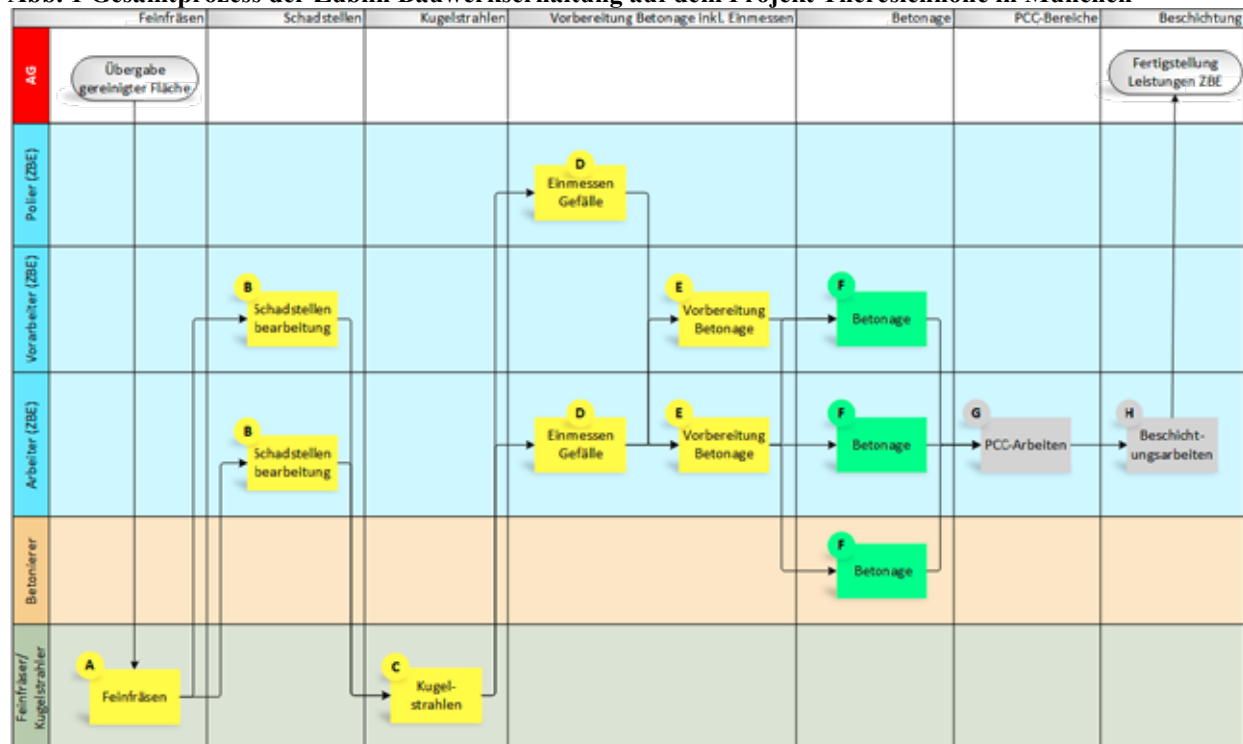
Etablierung von Verbesserungen in den eigenen Prozessen dienen.

Die MMA hingegen untersucht exemplarisch die Ausführungsarbeiten im Fall einer ausgedehnten Betoninstandsetzung und der flächigen Betonage eines Gefällebetons in München.

Lean Construction – Die Elimination von Verschwendung

Ein Hauptziel des Lean Construction ist die Identifikation und Beseitigung von Verschwendung in Prozessen. Um Verschwendung in Prozessen erkennen zu können, stellt die Multimomentaufnahme eine einfache und effektive Möglichkeit dar. Zur strukturierten Auswertung des komplexen Gesamtprozesses (GP) erfolgte zunächst dessen Gliederung in einzeln bewertbare Teilprozesse durch den Verfasser. Diese Aufteilung zeigt die **Abb. 1**. Dabei stellen die einzeln erfassten Teilprozesse (TP) ihrerseits Ketten konkreter Arbeitsvorgänge auf der Baustelle dar. Die Aufteilung erfolgte aus dem Grund, im Nachhinein Vorgänge besser auswerten und bei der Formulierung von Optimierungspotenzialen spezifische Maßnahmen empfehlen zu können.

Abb. 1 Gesamtprozess der Züblin Bauwerkserhaltung auf dem Projekt Theresienhöhe in München



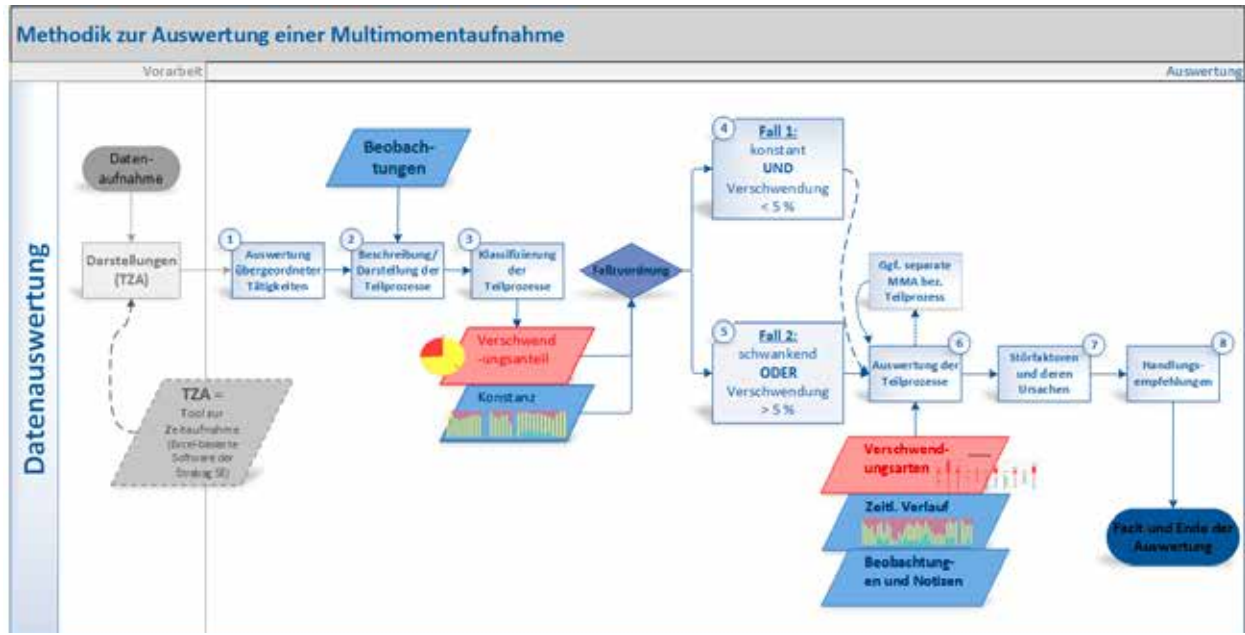


Abb. 2 Methodik zur Auswertung der im Rahmen einer Multimomentaufnahme gewonnenen Daten

Ein einheitliches Auswerteverfahren

Die im Laufe der umfangreichen Datenerhebung über mehrere Kalenderwochen (KW) generierten Messpunkte werden anschließend sowohl bezogen auf den jeweiligen Teilprozess als auch übergeordnet im Hinblick auf den Gesamtprozess ausgewertet und die Ergebnisse zur Interpretation tabellarisch dargestellt. Aufgrund der Vielzahl der Datenpunkte wurde im Rahmen der Thesis ein eigenes, reproduzierbares Verfahren zur Auswertung der Daten erarbeitet. Dieses Verfahren zeigt die obenstehende Abb. 2: Nach vollständiger Datenaufnahme werden innerhalb der beobachteten Tätigkeiten zunächst die übergeordneten – d.h. nicht einem konkreten Teilprozess allein zuzuordnenden – Prozessschritte identifiziert und zusammenfassend betrachtet. Ein Beispiel hierfür wäre der Vorgang „Wege ohne Material“. Anschließend werden die Tätigkeiten innerhalb der bereits im Vorfeld definierten Teilprozesse beschrieben und grafisch dargestellt. Durch Betrachtung der relativen, statistischen Anteile von Verschwendung und Wertschöpfung im Prozess sowie dessen zeitlichem Verlauf wird der Teilprozess in der Folge klassifiziert und einem von zwei Fällen zugewiesen: Teilprozesse vom Fall 1 sind konstant und weisen einen geringen

Verschwendungsanteil auf. Im Fall 2 hingegen schwanken die Prozesse und enthalten vergleichsweise viele Verschwendungsanteile. Die untenstehenden Abbildungen zeigen einmal exemplarisch die statistische Auswertung der einzelnen Tätigkeiten am Beispiel des Teilprozesses D „Einmessen Gefälle“ (Abb. 3) sowie den zeitlichen Verlauf am Beispiel des Teilprozesses F „Betonage“ an zwei Betonagetagen (Abb. 4).

Kst.	Tätigkeit	KW 49		KW 50	
		MP	[%]	MP	[%]
	Bohren für Eisen (in KW 50 nur mit Schraube bearbeitet)	16	4,88	9	3,24
	Leuchten und Markieren (gesamt)	20	6,10	32	11,51
	Nivelliergerät auf-/umstellen	13	3,96	5	1,80
	Punkte Einmessen (gesamt)	162	49,29	132	47,48
	Pläne lesen	30	9,15	21	7,55
	Warten auf An-/Einweisung (AV) (in KW 50 bearbeitet mit Warten auf Einweisung (Feldart))	66	20,12	56	20,14
	Σ Nicht wertschöpfende Tätigkeiten	307	93,60	254	91,37
					± 92,58 % TP
	Wege von/zum Schneidplatz (in KW 50 mit Wege ohne Material)	7	2,13	6	2,16
	Zuschneiden Eisen	14	4,27	7	2,52
	Warten auf Eisen	—	—	5	1,80
	Unklarheiten bei Höhen	—	—	6	2,16
	Σ Verschwendung	21	6,40	24	8,63
					± 7,42 % TP
	Σ Einmessen Gefälle	328	100	278	100
					± 0,93 % GP

Abb. 3 Beispiel für die Auswertung eines Teilprozesses



Abb. 4 Beispiel für den zeitlichen Verlauf eines Teilprozesses

Nach der Fallzuordnung rechtfertigt sich für die Teilprozesse des Falles zwei eine eingehende Analyse und Auswertung. Dazu werden insbesondere die statistischen Daten (Abb. 3) detailliert betrachtet und subjektive Beobachtungen herangezogen.

Lean Construction bedeutet Verbesserung

Ziel dabei ist die Identifikation der Ursachen erkannter Störfaktoren sowie letztlich die Formulierung von Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der aufgenommenen Prozesse. Eine Zusammenfassung der in der Thesis festgestellten und im Detail beschriebenen Handlungsempfehlungen zeigt die untenstehende Abb. 5. Dabei werden sie im Hinblick auf ihr Optimierungspotenzial bezogen auf den Teilprozess ([%] TP), den Gesamtprozess ([%] GP) sowie die spezifische Bewertung der Realisierungsmöglichkeiten (+/-) diskutiert. Zur Erläuterung soll ein Beispiel beschrieben werden: Bei der Betonage im 2. UG kam an 2 von 3 Tagen ein unerfahrener Bediener der Betonpumpe zum Einsatz. Dieser hatte Schwierigkeiten bei der Steuerung eines korrekten und konstanten Druckes zur Förderung der anspruchsvollen Betonmischung. Dadurch verstopfte das Rohrsystem, was zu Unterbrechungen, Umbauarbeiten und sogar Leckagen führte.

Bei Betonagen unter Einsatz erfahrenen Personals traten die beschriebenen Probleme nicht auf. Durch dieses Handlungsfeld lassen sich 16 % des Teilprozesses Betonage und 2,37 % des Gesamtprozesses positiv beeinflussen, wobei die Realisierungsmöglichkeiten als sehr gut angesehen werden können.

Konkludierend bleibt festzuhalten, dass große Teile sowohl der einzelnen Teilprozesse als auch letztlich des Gesamtablaufes beeinflussbar sind.

Fazit

Aufgrund der erfolgreichen Anwendung lässt sich die Übertragbarkeit von Prinzipien und Methoden des Lean Construction auf Instandsetzungsmaßnahmen in der Bauwerkserhaltung bestätigen. Der pragmatische Ansatz der praktischen Herangehensweise zeigt die Anwendbarkeit des gewählten Vorgehens auch in anderen Geschäftseinheiten und Unternehmen auf.

Letztlich stellt sich die interne Zusammenarbeit verschiedener Untereinheiten der Ed. Züblin AG sowie die Bearbeitung der aktuellen Thematik aus dem Fachbereich des Bauprozessmanagement am Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen der TU München als interdisziplinär und innovativ dar.

Kat. Nr.	Abschnitt	Bezeichnung	Optimierungspotenzial		
			[%] TP	[%] GP	+/-
1	5.6.1	Vermeidung händischen Freistemmens (durch verbesserte Istzustandserfassung)	60,49	16,07	+
2	5.6.2	Vorfertigung der Markierungseisen (Ansatzpunkt 1 zur Verbesserung des Teilprozesses Einmessen Gefälle)	6,43	0,28	+++
3	5.6.2	Wartezeiten der Helfer reduzieren (Ansatzpunkt 2 zur Verbesserung des Teilprozesses Einmessen Gefälle)	20,12	0,88	++
4	5.6.3	Verbesserung der Baustellenlogistik (notwendige Wege reduzieren)	—	4,66	+
5	5.6.3	Verbesserung der Baustellenlogistik (Verwechslungsanteil eliminieren)	—	11,65	++
6	5.6.4.1	Wartezeit auf Beton reduzieren	35,39	7,96	-
7	5.6.4.2	Störungsfreiheit bei der Betonage (durch Einsatz erfahrenen Personals bei der Bedienung der Betonpumpe)	16,32	2,37	+++
			∅ 6 - 60 % TP ∑ 43,87 % GP		

Abb. 5 Zusammenfassung von Handlungsempfehlungen und deren Optimierungspotenzial

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Fritz Gehbauer und Jürgen Kirsch. *Lean Construction – Produktivitätssteigerung durch schlanke Bauprozesse*. 2006 (In der Fachzeitschrift *Bauingenieur*, Band 81)
- [2]: Gregory Howell. *What is Lean Construction – 1999*. 1999 (In: 7th Annual Conference of the International Group für Lean Construction)
- [3]: Manfred Schröder u.a. *Schutz und Instandsetzung von Stahlbeton*. 2009

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. James Womack und Daniel Jones. *Lean Thinking*. 2004
2. Enno Weiß, Christoph Strubl und Wilhelm Goschy. *Lean Management*. 2015
3. Niklas Modig. *Das ist Lean – Die Auflösung des Effizienzparadoxons*. 2015
4. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. *DAfStb-Richtlinie Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen*. 2001
5. Deutsches Institut für Normung. *DIN EN 1504 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken*. 2008
6. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. *DBV-Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“*. 2018
7. Horst Reul. *Sanierung von Tiefgaragen und Parkhäusern*. 2011

Autor: Dominik Picha

Dominik Picha Kurzlebenslauf:

Beruflicher Werdegang (Auszug)

Seit 09/2018	Angestellt als Prozessberater bei der Ed. Züblin AG, Direktion Bayern
06/2016 – 08/2018	Werkstudent und Masterand bei der Ed. Züblin AG, Direktion Bayern, Lean
10/2015 – 06/2016	Werkstudent bei der Ed. Züblin AG, Direktion Bayern, Qualitätsmanagement
03/2015 – 07/2015	Freiwilliges Praktikum bei der Ed. Züblin AG, Direktion Bayern, Bauleitung in Hamburg
01/2012 – 03/2012	Praktikum beim Bau eines Einfamilienhauses in Blockbohlenbauweise
09/2009 – 09/2011	Ausbildung zum Landschaftsgärtner in Fürstenfeldbruck

Schulischer Werdegang (Auszug)

10/2015 – 05/2018	Masterstudium des Bauingenieurwesens an der TUM (Abschlussnote: 1,5)
10/2012 – 09/2015	Bachelorstudium des Bau- und Umweltingenieurwesens an der TUHH
10/2011 – 09/2012	Bachelorstudium des Umweltingenieurwesens an der TUM (dann Wechsel)
09/2009 – 09/2011	Berufsschüler an der städt. Berufsschule für Gartenbau in München

Betreuer: Dr. Ing. Sylvia Keßler (TUM)

Dipl. Betriebswirt Niklas Berlemann (Ed. Züblin AG)

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen der TU München, Professor Dr. Ing Christoph Gehlen.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ULTRA-HOCHLEISTUNGS-FASERBETON ALS INSTANDSETZUNGSMATERIAL FÜR CHLORID-BEANSPRUCHE BAUWERKE AUS STAHLBETON

Masterarbeit

Toni Pollner

Die Lebensdauer von Bauwerken aus Stahl- und Spannbeton, die aggressiven Umwelteinwirkungen wie Chloriden ausgesetzt sind, kann durch eine dünne Schutzschicht aus Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) - ohne weitere Abdichtungsmaßnahmen - deutlich verlängert werden. Die Arbeiten auf der Baustelle werden infolgedessen rationalisiert und die Bauzeit verkürzt. Die verbesserte Dauerhaftigkeit führt weiterhin zu einer längeren Nutzungsdauer, wodurch die Gesamtkosten der Instandsetzungsmaßnahme gesenkt werden. Aufgrund der geringen Porosität ist UHFB im unbelasteten Zustand flüssigkeitsdicht und bietet ausgezeichneten Schutz vor starken Umweltbeanspruchungen. Allerdings bilden sich mit zunehmender Belastung Mikro- und Makrorisse, durch die im Wasser gelöste Substanzen wie Chlorionen eindringen können. Im Fokus dieser Arbeit steht daher das Chlorideindringverhalten dünner UHFB-Schichten im belasteten bzw. im gerissenen Zustand, das in umfangreichen Laborversuchen untersucht wurde. Es konnte gezeigt werden, dass sich der Elektrolytwiderstand mit zunehmender Belastung verringert und dass mehrere feine Risse im UHFB mit verbleibenden Rissbreiten von etwa 30 μm entstehen. Durch die Risse im UHFB konnten nach bisherigem Kenntnisstand dennoch keine Chloride eindringen.

Keywords: Chlorideindringen, Instandsetzung, UHFB, Elektrolytwiderstand, kombinierte Beanspruchung

Einführung

Mit dem Begriff Ultra-Hochleistungs-Beton (engl. Ultra-High Performance Concrete, UHPC) bezeichnet man im Allgemeinen Beton bzw. zementgebundene Werkstoffe mit Druckfestigkeiten über 150 MPa. Um die Verformungskapazität zu erhöhen und ein duktileres Bauteilversagen zu gewährleisten, werden Fasern hinzugefügt, die nach erfolgter

Rissbildung die freiwerdenden Kräfte aufnehmen. In diesem Fall spricht man von Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) bzw. Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). UHFB zeichnet sich gegenüber normal- und hochfestem Beton, neben den verbesserten mechanischen Eigenschaften, durch eine verringerte Permeabilität und einer daraus resultierenden, deutlich höheren Dauerhaftigkeit aus.

UHFB ist ein Verbundwerkstoff aus Zement, Zusatzstoffen, Gesteinskörnung, Wasser, Zusatzmitteln und Fasern. Seine vorteilhaften Eigenschaften beruhen vor allem auf der dichten, praktisch kapillarporenfreien Bindemittelmatrix und dem homogenen Gefüge [1]. In der Regel werden dem Bindemittelleim hochfeste Stahldrahtfasern mit Zugfestigkeiten über 2.000 MPa hinzugefügt. Nach erfolgter Rissbildung werden die Fasern aktiviert. Unter günstigen Voraussetzungen findet anschließend eine Spannungszunahme statt, die mit einer Mehrfachrissbildung. Die dabei entstehenden Rissbreiten sind kleiner als 50 μm .

Der Grundgedanke zur Instandsetzung mit UHFB besteht nach [2] darin, eine 25 bis 80 mm dünne Schicht aus UHFB, die bei Bedarf zusätzlich mit Betonstahl bewehrt werden kann, auf den vorher aufgerauten Altbeton aufzubringen, vgl. Abb. 1. In Anlehnung an Stahlbeton sprechen die Autoren von „Stahl-UHFB“. Eine dünne UHFB-Schicht erfüllt hierbei in erster Linie die Schutzfunktion und soll dauerhaft das Eindringen schädlicher Substanzen verhindern. Mit zunehmender Dicke und durch die zusätzliche Bewehrung können sowohl die Steifigkeit als auch die Tragfähigkeit erheblich gesteigert werden. Dadurch entstehen UHFB-Schichten mit gleichzeitig tragender und abdichtender Wirkung, die gezielt in hochbeanspruchten Bereichen eingesetzt werden können [3].

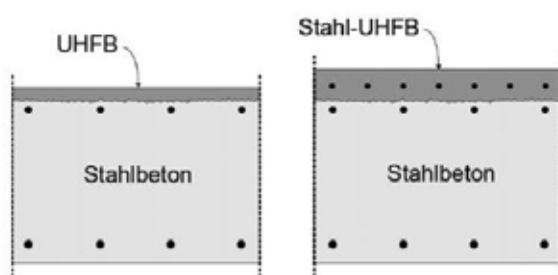


Abb. 6: Grundkonfiguration für die Instandsetzung von Stahlbeton mit UHFB in Anlehnung an [2]

Wie bei Stahlbetonbauteilen auch, stellt sich jedoch die Frage zur Dauerhaftigkeit stark beanspruchter oder gerissener Bereiche in der UHFB-Schicht. In den gerissenen Beton können Kohlenstoffdioxid und Chloride deutlich schneller

eindringen, als in den ungerissenen [4]. Chlorid- und karbonatisierungsinduzierte Korrosion des Stahls können die Folge sein.

Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm dieser Arbeit gliedert sich in zwei Teile. Teil 1 befasst sich mit den Materialeigenschaften des verwendeten UHFB. Zu den bestimmten Kennwerten gehören u.a. die Frischbetoneigenschaften, die Druckfestigkeit und deren Entwicklung sowie das elastische Verformungsverhalten bei Druckbeanspruchung. Das Zugtragverhalten wurde anhand von dünnen, ungekerbten Prismen in Vier-Punkt-Biegezugversuchen sowie mithilfe von zentrischen Zugversuchen bestimmt. Beide Prüfmethode wurden in Anlehnung an [5] durchgeführt.

Der Chlorideindringwiderstand wurde mithilfe des Rapid Chlorid Migration Tests bestimmt [6]. Dabei wird ein elektrisches Feld an die Proben angelegt, um das Chlorideindringen zu beschleunigen. Durch die Stahlfasern im UHFB kann allerdings der Strom- bzw. der Ionenfluss beeinflusst werden, weshalb der Versuch an stahlfaserbewehrten Baustoffen nicht ohne Weiteres angewendet werden kann.

In Vorversuchen wurde daher der Einfluss der Faserbewehrung auf den Migrationskoeffizienten von Normalbeton untersucht, bevor umfangreiche Tests an UHFB mit Stahl- und Basaltfasern sowie UHFB ohne Fasern durchgeführt worden sind. Zudem wurde der spezifische Elektrolytwiderstand des UHFB mithilfe der Zwei-Elektroden-Methode bestimmt, da zwischen dem Migrationskoeffizienten und dem spezifischen Elektrolytwiderstand ein Zusammenhang hergeleitet werden kann, vgl. [7]. Der Migrationskoeffizient selbst dient im Rahmen der Lebensdauerbemessung als eine der Eingangsgrößen für den Materialwiderstand.

Im zweiten Teil der experimentellen Untersuchungen wurden einseitig aufgeraute Stahlbetonbalken hergestellt, in Vier-Punkt-Biegezugversuchen

bis zu einer Rissbreite von 0,2 mm belastet und anschließend mit einer 30 mm dünnen UHFB-Schicht verstärkt. Nach hinreichender Erhärtung des UHFB wurden die Verbundbalken einer kombinierten Belastung aus simultaner Biegezugbeanspruchung und Chlorideinwirkung mit einer 10 %igen NaCl-Lösung unterzogen. Während des Versuchsablaufs wurde der Elektrolytwiderstand des Verbundbalkens zwischen einer Titanbandanode im Chloridbehälter und der elektrisch leitfähig verbundenen Bewehrung mithilfe einer einrequenten elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) aufgezeichnet. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 2 schematisch dargestellt.

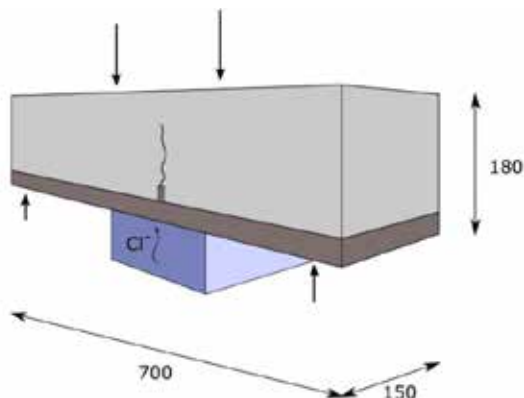


Abb. 7: Versuchsaufbau zur kombinierten Belastung der Verbundbalken. Maße in Millimeter.

Zu Beginn wurden drei Verbundbalken für orientierende Untersuchungen hergestellt (Versuchsreihe 1), welche zum Teil bis an die Grenzen ihrer Tragfähigkeit belastet wurden. Für die Untersuchung auf Gebrauchslastniveau wurden sechs neue Verbundbalken (Versuchsreihe 2) hergestellt, von denen fünf Stück zehn Mal zyklisch be- und entlastet worden sind sowie ein Verbundbalken, der über 40 Stunden statisch belastet wurde.

Im Anschluss an die kombinierte Belastung wurden den Verbundbalken aus dem Rissbereich Bohrkerne sowie Proben für optische Untersuchungen mit einem Digitalmikroskop entnommen. Um mögliche Chloride nachzuweisen, wurden die Bohrkerne gespalten und mit einer Indikatorlösung besprüht. Die Proben für die Untersuchung des Rissbilds wurden in Anlehnung an [8] präpariert. Auf diese

Weise heben sich Risse durch eine grüne Farbe von der übrigen Betonmatrix ab.

Ergebnisse

Aufgrund der Vielzahl der bestimmten Materialeigenschaften können diese hier nur auszugsweise wiedergegeben werden. Der verwendete UHFB zeichnet sich durch eine Druckfestigkeit von 187 MPa, einen Elastizitätsmodul von 58 GPa sowie eine Zugfestigkeit von 13,1 MPa aus. Der Migrationskoeffizient ist abhängig von Art, Gehalt und Ausrichtung der Faserbewehrung, beträgt dabei jedoch maximal $0,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Abb. 3 zeigt den Elektrolytwiderstand der zyklisch belasteten Verbundbalken der Versuchsreihe 2 in Abhängigkeit der Zeit. Der anfängliche Elektrolytwiderstand liegt im lastfreien Zustand etwa zwischen 700 und 800 Ω , fällt dann jedoch infolge der Belastung auf bis zu 27 % des Ausgangswerts.

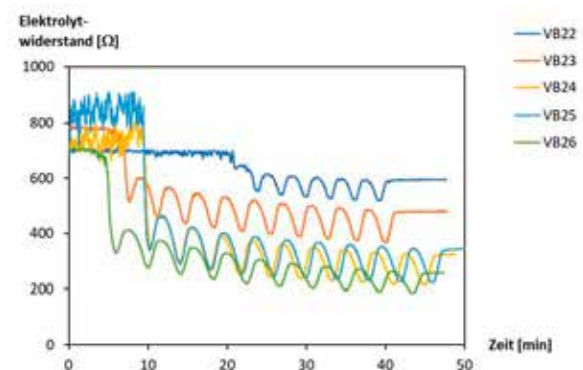


Abb. 8: Elektrolytwiderstand der zyklisch belasteten Verbundbalken 22 bis 26 der Versuchsreihe 2 als Funktion der Zeit

Trotz des gravierenden Rückgangs des Elektrolytwiderstands konnten in den gespaltenen Bohrkerne der Versuchsreihe 2 keine Chloride festgestellt werden. Bei der stärker belasteten Versuchsreihe 1 wurden dagegen, sowohl im Normalbeton als auch im UHFB, eindeutige Chlorideindringfronten ausgemacht.

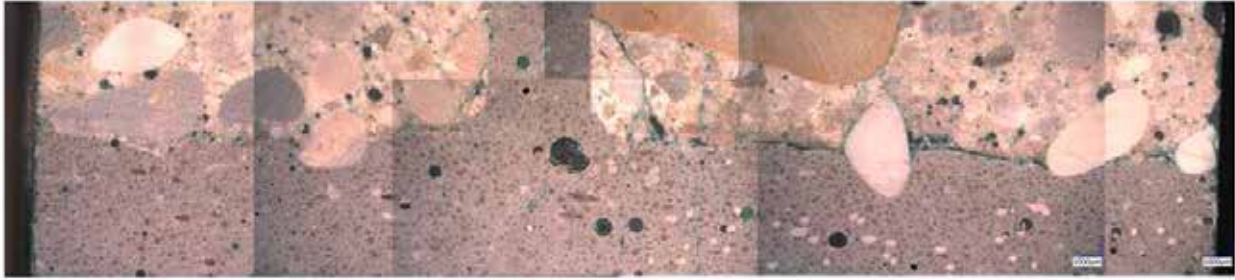


Abb. 9: Exemplarische Darstellung der Verbundzone zwischen UHFB und Altbeton anhand einer Probe aus dem Rissbereich des (hoch beanspruchten) Verbundbalkens 26. Die Risse wurden mit Epoxidharz grün eingefärbt.

Mithilfe digitaler Auflichtmikroskopie konnte die Fuge zwischen UHFB und Altbeton als Schwachstelle des Verbundquerschnitts identifiziert werden. Bei den hochbeanspruchten Balken wurden mehrere, bis zu $200\ \mu\text{m}$ breite Risse entdeckt, was beispielhaft in Abb. 9 dargestellt ist. Darüber hinaus wurden mit zunehmender Belastung mehr Risse im UHFB festgestellt. Die mittleren, verbleibenden Rissbreiten betragen dabei $30 \pm 20\ \mu\text{m}$.

Fazit

Der Elektrolytwiderstand ist abhängig von der Belastung. Mit zunehmender Beanspruchung entstehen lokal Mikrorisse, durch die im Wasser gelöste Chlorionen in den Beton eindringen können. Infolgedessen steigt die Leitfähigkeit des Elektrolyts und der elektrische Widerstand fällt.

Da der Elektrolytwiderstand mit dem Migrationskoeffizienten korreliert, vgl. [7], kann davon ausgegangen werden, dass der Chlorideindringwiderstand mit zunehmender Belastung abnimmt. In dieser Arbeit wurde vereinfachend angenommen, dass sich der Migrationskoeffizient umgekehrt proportional zum Elektrolytwiderstand verhält. Bei den zyklisch beanspruchten Prüfkörpern folgt daraus eine Zunahme des Migrationskoeffizienten bis zu einem Faktor von 3,7 mit einer entsprechenden Verkürzung der Lebensdauer. Dennoch konnte anhand einer Berechnung des tiefenabhängigen Chloridgehalts einer 30 mm dicken UHFB-Schicht gezeigt werden, dass die Chloridkonzentration

am Übergang zum Altbeton nach 50 Jahren mit $0,24\ \text{M.-%/z}$ immer noch im unkritischen Bereich, d.h. kleiner als $0,5\ \text{M.-%/z}$ (unterer anzunehmender Grenzwert des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts nach [9]), ist.

Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit, ob das Eindringen von Chloriden in den Betonuntergrund durch eine dünne Schutzschicht aus UHFB auch im belasteten Zustand erfolgreich verhindert wird, kann noch nicht abschließend beantwortet werden. Hierfür werden im Nachgang noch weiterführende Untersuchungen durchgeführt. Es lässt sich jedoch festhalten, dass der breite Stahlbetonriss auf viele kleine, vermutlich unschädliche Risse im UHFB aufgeteilt wird, welche das Eindringen der Chloride auf jeden Fall abbremsen. Aufgrund der nichthydratisierten Bestandteile im UHFB erfolgt bei Wasserzutritt eine nachträgliche Bildung von CSH-Pasen, durch die Chloride in die Bindemittelmatrix eingebunden werden können. Von gebundenen Chloriden geht keine Korrosionsgefahr mehr aus.

Sollte sich bei den weiterführenden Untersuchungen herausstellen, dass keine Chloride in die Verbundbalken eindringen konnten, würde das die in der Literatur berichteten Ergebnisse bestätigen, denen zufolge eine kritische Rissbreite existiert, unterhalb derer es zu keinem Anstieg der Permeabilität kommt, siehe z.B. [10]. UHFB könnte demzufolge auch an hochbeanspruchten Stellen eingesetzt werden, ohne dass sichergestellt werden muss, dass dieser im ungerissenem Zustand verbleibt.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Fehling, E.; Schmidt, M.; Walraven, J. et al.: Ultrahochfester Beton. UHPC. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): BetonKalender 2013. Lebensdauer und Instandsetzung - Brandschutz. BetonKalender, S. 117–240. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2013.
- [2] Brühwiler, E.; Denarié, E.: Stahl-UHFB - Stahlbeton Verbundbauweise zur Verstärkung von bestehenden Stahlbetonbauteilen mit Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB). Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 4, S. 216–226.
- [3] Habel, K.: Structural behaviour of elements combining Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC) and Reinforced Concrete. Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2004.
- [4] Gehlen, C.; Sodeikat, C.: Gerissener Stahlbeton: Wie korrosionsgefährdet ist die Bewehrung? Materials and Corrosion 54 (2003), Heft 6, S. 424–429.
- [5] SIA 2052 - Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (2016).
- [6] BAW Merkblatt - Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (2017).
- [7] Tang, L.; Nilsson, L.-O.; Basheer, P. A. M.: Resistance of concrete to chloride ingress. Testing and modelling. Spon Press, London, 2011.
- [8] Kustermann, A.: Einflüsse auf die Bildung von Mikrorissen im Betongefüge. Dissertation, Universität der Bundeswehr, München, 2005.
- [9] Breit, W.; Dauberschmidt, C.; Gehlen, C. et al.: Zum Ansatz eines kritischen Chloridgehaltes bei Stahlbetonbauwerken. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), Heft 5, S. 290–298.
- [10] Charron, J.-P.; Denarié, E.; Brühwiler, E.: Permeability of ultra high performance fiber reinforced concretes (UHPFRC) under high stresses. Materials and Structures 40 (2007), Heft 3, S. 269–277.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

[3, 7, 10]

Autor

Toni Pollner, geb. Deller

seit 2019	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Material- und Bauforschung (IMB) der Hochschule München
2015 – 2019	Masterstudiengang „Allgemeiner Ingenieurbau“ an der Hochschule München (Teilzeit)
2015 – 2019	Lehr- und Laborassistent im Labor für Baustoffe der Hochschule München (Teilzeit)
2011 – 2015	Dualer Bachelorstudiengang „Bauingenieurwesen“ an der Hochschule München
2011 – 2014	Ausbildung zum Beton- und Stahlbetonbauer bei der Firma Max Bögl GmbH & Co. KG

Betreuer

Die Arbeit wurde im Labor für Baustoffe der Hochschule München angefertigt und von Herrn Prof. Dr.-Ing. Dauberschmidt betreut.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG ZUM QUERKRAFTTRAGVERHALTEN VON VORGESPANNTEN UHPFRC-TRÄGERN

Bachelor's Thesis

Markus Schmidt

Das Ziel der Bachelor's Thesis war es, das Querkrafttragverhalten von vorgespannten Trägersystemen für den Brücken- sowie modularen Parkhausbau - bestehend aus ultrahochfestem Faserbeton (UHPFRC) - zu untersuchen. Diesbezüglich wurden vier Dreipunktbiegeversuche und fünf Versuche an herausgelösten Teilsystemen in einem neuartigen Versuchsstand durchgeführt. Es wurden dabei zwei ultrahochfeste Faserbetone herangezogen und deren Herstellung dokumentiert.

Die Versuchskörper variierten in der Höhe des verwendeten Stahlfasergehaltes sowie in der Höhe der Vorspannung. Zusätzlich wurde eine Trägerserie mit Querkraftbewehrung gefertigt. Für die Dokumentation der Rissbildung erfolgte an allen Teilsystemträgern am nur 40,0 mm breiten Steg eine optische Bewegungs- und Deformationsanalyse. Die erreichten Traglasten wurden mit einem Querkraftbemessungsansatz aus der Literatur überprüft. Abschließend wurde ein selbst entwickelter Bemessungsansatz zur Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit bei UHPFRC vorgeschlagen.

Den größten Einfluss erzielte eine Verdoppelung des Stahlfasergehaltes mit einer Steigerung der aufnehmbaren Querkraft. Für eine genauere Bemessung sind weitere Untersuchungen nötig.

Keywords: UHPFRC, Querkrafttragverhalten, Brückenbau, Parkhausbau, Substrukturtechnik

Einleitende Informationen

Die Querkrafttragfähigkeit stellt im Massivbau auch heute noch ein zentrales Forschungsthema dar. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens am Lehrstuhl für Massivbau der technischen Universität München wurde das Tragverhalten von filigranen vorgespannten Tragelementen aus

faserbewehrtem Ultrahochleistungsbeton (UHPFRC) untersucht. Ein Schwerpunkt der Bachelor's Thesis lag bei der Untersuchung des Querkrafttragverhaltens von im direkten Verbund vorgespannten Balkenelementen aus ultrahochfestem Faserbeton mit einem sehr dünnen Steg von nur

40,0 mm hinsichtlich ihres Bruchverhaltens und der Vorankündigung des Versagens. Dabei sollte insbesondere die Duktilität des (Querkraft-) Versagens bei reinen faser- sowie kombinierten stabstahlbewehrten Trägern genauer betrachtet werden. Hintergrund dieser Untersuchungen ist die Klärung offener Bemessungsfragen für die Anwendung von UHPFRC im Brücken- sowie modularen Parkhausbau. Das Forschungsvorhaben wurde in Kooperation mit der SSF-Ingenieure AG und der Hochschule München bearbeitet.

Grundlagen zum Tragverhalten

Da bei UHPFRC die Querkrafttragfähigkeit hauptsächlich von den aufnehmbaren Hauptzugspannungen abhängt, spielen die Fasergeometrie sowie deren Ausrichtung im Betongefüge eine wichtige Rolle. Die Stahlfasern ermöglichen es, Spannungen über Risse hinweg zu übertragen, wodurch es zu einer Nachrisszugfestigkeit kommt. Während sich bei der Belastung von Normalbeton durch Gefügeänderungen im Inneren der Matrix ein gewissermaßen duktileres Verhalten im Nachbruchbereich einstellen kann, zeigt UHPFRC ein ausgeprägtes und sprödes Bruchverhalten [1].

Anwendungsmöglichkeiten von UHPFRC im Bauwesen

Mit UHPFRC ist eine individuelle Objektgestaltung möglich. So lassen sich z. B. filigrane Fassaden- oder schlanke Tragelemente realisieren. Für den Bau von Parkhäusern eignet sich UHPFRC besonders gut. Dieser zeigt eine sehr hohe Resistenz gegen mechanische Abnutzung und bietet im Vergleich zu herkömmlichen Betonen eine hohe Langlebigkeit. *Schramm* [2] untersuchte diesbezüglich in aufgelösten Systemen vorgespannte UHPC - Längsträger und größtenteils faserbewehrte UHPC - Rippenplatten. Für den Aufbau der Rippenplatten wurde lediglich nur in den Querrippen konventionelle Stabbewehrung eingelegt. Sie unterstützt die Biegetragfähigkeit und

verbessert das Schwingverhalten. Im gesamten restlichen Bereich wurde die filigrane Platte lediglich mit Mikrostahtfasern bewehrt.

Weitere effiziente Anwendungsgebiete sind vorgespannte Fertigteilträger von Brückenbauwerken oder aber auch einzelne Segmente einer Brücke, wie z. B. Kappen. Die hohen Herstellungskosten werden durch seine Nachhaltigkeit und seinen geringen Wartungsaufwand kompensiert, wodurch die Anzahl der Baustellen abnimmt. In Abb. 1 wird die Brücke des Friedens in Seoul aus UHPFRC gezeigt. Diese dient als Fußgängerbrücke und besitzt eine Bogenspannweite von 120,0 m mit einer Trägerhöhe von nur 1,3 m. Dabei beträgt ihre Gesamtlänge 430,0 m.



Abb. 1: Bauzustand - Brücke des Friedens in Seoul - filigrane Bauweise als π -Querschnitt mit nur 16,0 cm breiten Steg [3]

Experimentelle Untersuchungen

Fünf der neun experimentellen Untersuchungen wurden in einem neuartigen, eigens dafür konzipierten und gebauten Versuchsstand unter Anwendung der Substrukturtechnik durchgeführt. Dies ermöglichte es, anstelle von ganzen Trägern lediglich Teilsysteme, die für das globale Versagen von besonderem Interesse sind, zu untersuchen - siehe Abb. 2 (unten). Die aus dem globalen Gesamtsystem resultierenden Schnittgrößen wurden dabei am Trägerende stirnseitig über eine stählerne Lasteinleitungsplatte aufgebracht. Die jeweiligen Träger unterschieden sich in der Höhe des Fasergehaltes, der Vorspannung und der Bü-

gelbewehrung. Weitere vier Referenzuntersuchungen fanden als konventioneller Dreipunktbiegeversuch statt - siehe Abb. 2 (oben). Hieraus erfolgte eine Plausibilitätskontrolle für den Substrukturversuchsstand. Das statische System aller Untersuchungen entsprach dabei einem Einfeldträger mit 3,8 m Spannweite. Alle 60,0 cm hohen Träger wurden mit ½ Zoll-Litzen im Spannbett des MPA BAU der technischen Universität München hergestellt. Bis auf den Versuchskörper VT60 - V1, der aus der UHPC-Mischung B5Q bestand, wurden alle Träger aus DUCTAL® gefertigt.

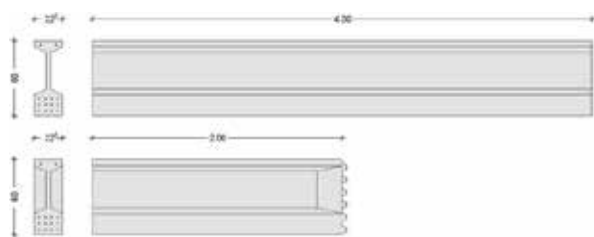


Abb. 2: Übersicht über die Referenzversuche (oben) und die der Teilsystemträger (unten)

Versuchsdurchführung

Zur Erfassung des Tragverhaltens kam in den Untersuchungen eine umfangreiche Messtechnik zum Einsatz. Es erfolgte z. B. eine quasi-kontinuierliche Aufzeichnung der Dehnungsänderung der Bügel unter Einsatz von faseroptischen Sensoren auf der Bewehrung im Inneren des Steges. Zusätzlich wurden mit Hilfe eines berührungslos arbeitenden und optischen 3D-Verformungsmesssystems die resultierenden Rissbildungen genau dokumentiert, wie die Abb. 5 auf nachfolgender Seite zeigt. Die Belastung aller Versuche erfolgte kraft- und weggesteuert, wobei bei den Teilsystemträgern die resultierende Querkraft als Hauptregelgröße verwendet wurde. Zur Übertragung von Schubkräften in der stirnseitigen Fuge zwischen Prüfkörper und Lasteinleitungsplatte kamen trapezförmige Schubnocken zur Anwendung. Über eine speziell entwickelte Konstruktion hinter der massiven Stahlplatte wurden die Keilschlupfverluste der Vorspannkräfte auf ein Minimum reduziert.

Auswertung der Versuchsergebnisse

Für sieben Versuchsträger konnte eine *kritische Schublast* bestimmt werden. Bei zwei Teilsystemträgern kam es hingegen zu einem *Biegeversagen*. Diese beiden wurden bei der späteren Überprüfung mit vorhandenen Bemessungsansätzen nicht berücksichtigt. Eine beispielhafte Gegenüberstellung der *kritischen Schubrisse* zeigen die beiden nachstehenden Abbildungen. Hierbei handelt es sich um einen Teilsystemträger mit reduzierter Vorspannung (Abb. 3) und zugehörigem Referenzträger (Abb. 4). Bei beiden Versuchen bildete sich nahezu derselbe Schubrissverlauf.



Abb. 3: Kritischer Schubriss am Teilsystemträger VT60-V3



Abb. 4: Kritischer Schubriss am Teilsystemträger VG60-V1

Trotz der Stegdicke von lediglich 40,0 mm wiesen alle Träger eine sehr hohe Querkrafttragfähigkeit mit Querkraften zwischen 379,6 kN und 595,0 kN auf. Grundsätzlich kam es zu einem sehr spröden Versagen. Im Vergleich zu Normalbeton bildete sich kein diskreter *kritischer Schubriss*, sondern es zeigte sich vielmehr ein feines Rissbild mit vielen kleinen Schubrisen, deren Abstand geringer war. Dies resultiert aus der rissverzahnenden Wirkung der Stahlfasern. In Abb. 5 auf der folgenden Seite lässt sich dies sehr gut erkennen.

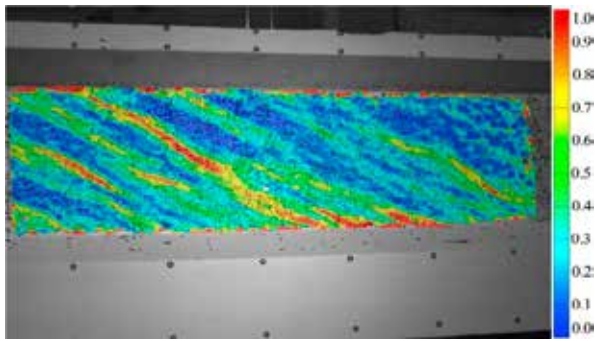


Abb. 5: Formänderungsarbeit zum Zeitpunkt der maximalen Querkraft am Träger VT60-V2 in [%]

Durch Variierung der Vorspannung, des Fasergehaltes und der Bügelbewehrung, konnten die Einflüsse der einzelnen Traganteile untersucht werden. Für die Versuche mit höherer Vorspannung ergab sich ein späterer Übergang in den Zustand II und eine Erhöhung der Bruchquerkraft um 15,4 %. Für die Verdoppelung des Stahlfasergehaltes zeigt sich mit einer Erhöhung der maximalen Querkraft um 34,2 % der größte Einfluss. Die Fasern liefern durch ihre rissvernähende Wirkung somit einen wesentlichen Beitrag zum Abtrag der Querkräfte. Die folgende Abb. 6 zeigt den Vergleich zwischen dem Teilsystem- und Referenzträger jeweils ohne Bügelbewehrung: Die Träger mit 50,0 % verminderter Vorspannung (links) und die ohne Abminderungen (rechts).

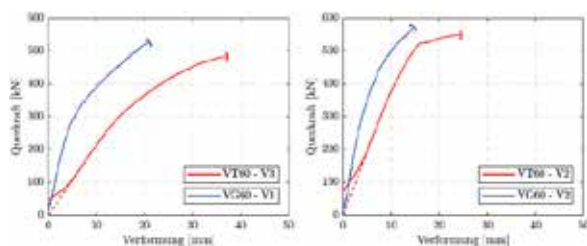


Abb. 6: Querkraft - Verformungsverhalten der Referenzträger zu den Teilsystemen

Unter Berücksichtigung der Festbetoneigenschaften ergaben sich für beide Trägervarianten nahezu dieselben Steifigkeiten und eine zutreffende Übereinstimmung bei dem Vergleich der Bruchbilder. Die Auswirkungen einer einschnittigen Bügelbewehrung von $\varnothing 8/25$ cm auf die Querkrafttragfähigkeit zeigen hingegen geringere Ausmaße: Die Schubbewehrung bewirkt lediglich eine Stei-

gerung der Höchstlast um 4,4 %. Durch das Fließen von Bügelbewehrung und Spannlitzen erhöht sich jedoch die vertikale Verformung deutlich.

Vergleich mit Bemessungsansätzen

Für die Bemessung wurde der Ansatz nach *Bertram* [4] unter anderem in abgewandelter Form angewandt, da sich der gewählte Trägeraufbau sehr ähnelt, es aber durch die Änderung zu einer höheren Genauigkeit kam. Dabei wurden die aus den Festbetoneigenschaften ermittelte zentrische Zugfestigkeit und der gemessene Druckstrebenwinkel verwendet. Der Vergleich der maximal erreichten Schublasten in Abb. 7 (schwarze Striche) zu den ermittelten Bemessungslasten zeigen die Abweichungen und jeweiligen Traganteile. Eine Bemessung nach *EC 2* wurde ebenfalls mit Hilfe eines Fachwerkmodells untersucht, welche aber keine brauchbaren Ergebnisse lieferte.

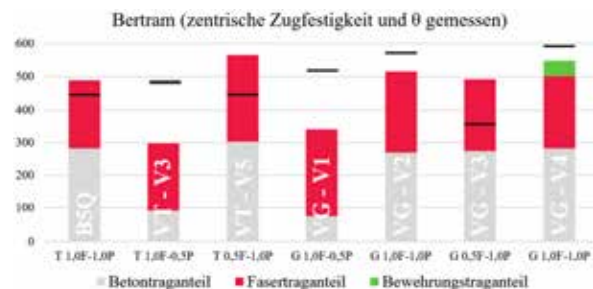


Abb. 7: Traganteile der Bemessungsquerkraft nach *Bertram* über die zentrische Zugfestigkeit und gemessenen Θ -Winkel

Fazit und Ausblick

Bei der Auswertung zeigte sich ein enormer Traganteil der Stahlfasern. Eine Abminderung der Vorspannung führte zu einem raschen Abfall der Steifigkeit. Der Einfluss von konventioneller Bügelbewehrung ergab hingegen kaum eine laststeigernde Wirkung. Die vorhandenen Querkraftbemessungsansätze zeigen nur eine bedingte Übereinstimmung und es bedarf noch weiterer Untersuchungen zur genauen Ermittlung und Anpassung einzelner Traganteile für verschiedene Trägergeometrien und deren Zusammensetzungen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Jungwirth, J. (2006): „*Tragverhalten von Zugbeanspruchten Bauteilen aus Ultra - Hochleistungs – Faserbeton*“; Diss. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
- [2]: Schramm, N. (2015): „*Load carrying and deformation behaviour of slender, prestressed girders and slab systems made of UHPC*“; Forschungsbericht.; Technische Universität München
- [3]: Beton-Kalender 2013, Teil 2; Bergmeister, Konrad; Fingerloos, Frank; Wörner, Johann-Dietrich (Hrsg.); Ernst & Sohn Verlag
- [4]: Bertram, G. (2012): „*Verbund- und Querkrafttragverhalten von Spannbetonträgern aus Ultra-hochfestem Beton*“; Diss. RWTH Aachen

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Bertram, G. (2012): „*Verbund- und Querkrafttragverhalten von Spannbetonträgern aus Ultra-hochfestem Beton*“; Diss. RWTH Aachen
2. Jungwirth, J. (2006): „*Tragverhalten von Zugbeanspruchten Bauteilen aus Ultra - Hochleistungs – Faserbeton*“; Diss. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
3. Thiemicke, J. (2014): „*Querkrafttragverhalten von UHPC-Balken mit kombinierter Bewehrung aus Stahlfasern und Stabstahl*“; Diss. Universität Kassel

Markus Schmidt

seit 2018	Studium an der Hochschule München – M. Eng. (Bauingenieurwesen)
seit 2018	Nebentätigkeit als Tragwerksplaner im Ingenieur- und Hochbau
seit 2014	MPA BAU der Technischen Universität München – Studentische Hilfskraft
2015 – 2017	Baustoffkundelabor der Hochschule München – Studentische Hilfskraft
2014 – 2018	Studium an der Hochschule München – B. Eng. (Bauingenieurwesen)
2009 – 2014	MPA BAU der Technischen Universität München – Mechatroniker
2007 – 2008	SIEMENS AG Industry Sector DT EA SCM – Industriemechaniker
2004 – 2007	SIEMENS AG – Ausbildung zum Mechatroniker (Anlagentechnik)

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Massivbau der Hochschule München, Fakultät 02
 Prof. Dr.-Ing. Jörg Jungwirth (Hochschule München)
 M. Sc. Nicholas Schramm (Technische Universität München)

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

EINFLÜSSE AUF WINTERBAUSTELLEN UND IHRE KALKULATORISCHEN AUSWIRKUNGEN

Bachelorarbeit

Viviana Schmoll

Winterbaustellen werden insbesondere durch widrige Witterung negativ beeinflusst. Aufgrund von Unkenntnis der Auswirkungen des Faktors „Winter“ werden die erhöhten Kostenrisiken solcher Baustellen jedoch selten ausreichend in der Kalkulation berücksichtigt. In dieser Arbeit wird eine Methode erstellt, mit der die wahrscheinlichen Kostensteigerungen unter Berücksichtigung realer lokaler Winterbedingungen vorausbestimmt werden können. Als Beispielprojekt dient der Rohbau eines Einfamilienhauses mit Sichtbetontiefgarage im Landkreis Weilheim-Schongau. In einem eigens erstellten Excelprogramm werden Bauabläufe unter den Wetterbedingungen der letzten zehn Winter sowie deren zugehörige Kosten simuliert. Eingangswerte hierfür sind insbesondere reale Wetterdaten, ein mengenbasierter Terminplan sowie die BRZ-Ausgabedatei der üblichen („risikofreien“) Kalkulation. In der Arbeit werden besonders Baustopps, Arbeitseffizienz unter widrigen Bedingungen und veränderte Lohnkosten aufgrund von Krankenstand berücksichtigt. Letztendlich wird ein Angebot auf einem bewusst gewählten Sicherheitsniveau erstellt, welches Gewinn- und Verlustmöglichkeiten der Winterbaustelle genau beziffert. Im Projekt konnte nachgewiesen werden, dass eine unangepasste Kalkulation im bestmöglichen Fall und unter Anrechnung des kompletten „Sommer-WuG-Puffers“ zu Verlusten von knapp 4 % der Auftragssumme führt.

Keywords: Winterbaustelle, Kalkulation, Risikobepreisung, Wetter, Bauablaufsimulation, Baustopps, Arbeitseffizienz, Krankenstand, Sicherheitsniveau, Verluste

Problemstellung und Zielsetzung

Winterbaustellen sind aufgrund der Witterung ausführungstechnisch häufig problematisch. Verzögerungen und zusätzliche Arbeiten für Schutzmaßnahmen sind die Regel und führen zu Streitigkeiten über Zusatzkosten. Ein weit-

verbreiteter Irrglaube der Auftragnehmer (AN) ist, dass sich die zusätzlichen Winterkosten im Nachhinein auf den Auftraggeber abwälzen ließen und sich das Wetter zur höheren Gewalt oder unabwendbarem Umstand erklären lässt. In der VOB ist jedoch klar geregelt, dass der AN sämtliche Winterkosten in normalen Wintern zu

tragen hat, sofern ihm der Ausführungszeitraum bei Vertragsabschluss bekannt war [1]. Dennoch werden nicht planbare Zusatzkosten wie auch „Winterfixkosten“ aufgrund von Unkenntnis und Wettbewerb ignoriert – somit sind viele Winterbaustellen bereits bei Vertragsabschluss bewusst oder unbewusst unterkalkuliert.

Ziel der Arbeit ist es, die verschiedenen Faktoren, die sich auf Bauzeit und Kosten auswirken, genau zu analysieren. Am Beispiel des Rohbaus eines Einfamilienhauses werden Winterkosten auf einem bewusst gewählten Sicherheitsniveau einkalkuliert. Dazu wird eine übliche Sommerkalkulation um die zusätzlichen Arbeiten sowie Kosten für Baustelleneinrichtung ergänzt, woraufhin die BRZ-Ausgabedatei in einer eigens erstellten Excelkalkulation weiterverarbeitet wird. In dieser werden anhand eines mengenbasierten Terminplans sowie realen Wetterdaten die spezifischen Winterisrikosten des Projekts für verschiedene Sicherheitsniveaus berechnet. Gewinn- und Verlustmöglichkeiten aus Winterisiken sind damit konkret bezifferbar und somit wählbar.

Witterung

Für das Projekt wird vertraglich festgelegt, dass der AN Winterkosten bis zum schlimmsten zu erwartenden Winter in zehn Jahren trägt. Daher werden die Wetterdaten des Bauorts (Penzberg) aus den vergangenen zehn Wintern aus Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die Monate November (Baubeginn) bis April analysiert.

Besondere Bedeutung kommt den Frosttagen (tagsüber Plusgrade und nachts Minusgrade) sowie den Eistagen (ganztäglich Minusgrade) zu. Durch sie lassen sich vereinfacht Aussagen über die Bedingungen auf der Baustelle treffen, welche sich direkt auf den Baufortschritt auswirken. Die Auswertungen zeigen, dass die Winter teils sehr verschieden stark ausfallen. Im Bezugszeitraum variieren die Frosttage zwischen 26 und 51

Tagen; die Eistage sogar zwischen 3 und 40 Tagen. Die kältesten Tage sind i.d.R. im Januar und Februar.

Der Verlauf des Winters in Bezug auf Frost- und Eistage kann in folgendem Diagramm gut nachvollzogen werden. In Abb. 1 sind die durchschnittlichen Frost- und Eistage aus den Wintern 08/09 bis 17/18 nach Monaten aufgeteilt dargestellt. Erkennbar ist, dass der Januar für gewöhnlich bautechnisch am kritischsten ist. Im April hingegen sind kaum noch Einschränkungen zu erwarten.

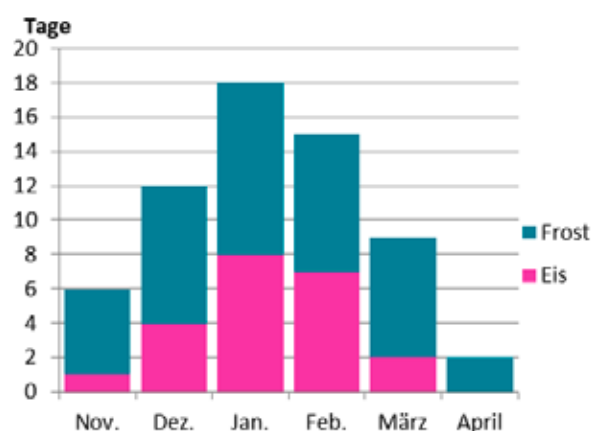


Abb. 1: Durchschnittliche Frost- und Eistage im Verlauf des Winters in Penzberg (Quelle: eigene Auswertung der Wetterdaten des DWD, Jahre 2008 bis 2018)

Niederschläge fallen im Schnitt an knapp 90 Tagen in einem Winter – arbeitsbehindernd wirken sie jedoch nur an etwa 30 Tagen. Die Menge der Niederschläge bleibt dabei meist gering und Starkregenereignisse, wie im Sommer, sind kaum zu erwarten.

Veränderte Lohnkosten

Die **Arbeitsunfähigkeitstage** (AU-Tage) der Angestellten in der Baubranche schwanken periodisch; die Extrema liegen aktuell im August im Schnitt bei 1,58 Tagen und im Februar bei 2,12 Tagen je Angestelltem [2]. Insgesamt sind die Angestellten in den für das Projekt definierten Wintermonaten November bis April 14,7 % öfter krank als im Sommer. Dies ist relevant, da Kalkulationslöhne i. d. R. auf den ganzjährigen

AU-Tagen basieren und damit einen durchschnittlichen Kalkulationslohn angeben. In der Arbeit ergab sich mit winterspezifischen AU-Tagen bei einem Verrechnungslohn von ursprünglich 40,97 € ein um 23 ct höherer Betrag. Unangepasste Kalkulationslöhne führen damit im Winter zu ungeplanten Verlusten und im Sommer zu ungeplanten Gewinnen.

Im Projekt wird außerdem angenommen, dass die Arbeiter genügend **Gutstunden** aufgebaut haben um jegliche wetterbedingte Baustopps zu überbrücken. Dies bedeutet, dass anfallende AGK bereits im Sommer erwirtschaftet wurden und Baustopps im Hinblick auf die Lohnkosten der Arbeiter vollkommen kostenneutral sind. Dies stellt eine positive (aber realistische) Annahme der Situation dar. Saison-Kug sowie damit einhergehende geringe Verluste sind im Projekt nicht einkalkuliert.

Verzögerungen und Baustopps

Die zu erwartenden Verzögerungen auf Winterbaustellen ergeben sich aus zwei limitierenden Faktoren:

Zum einen können **Baustoffe** wie Beton nicht unter allen Bedingungen schadenfrei verbaut werden. Anforderungen an das Wetter bei verschiedenen Arbeiten sollen unbedingt vertraglich festgehalten sein, um Streitigkeiten zu vermeiden. Im Projekt sind beispielsweise für Betonagen Temperaturen über -3 °C und Tagesniederschlagsmengen unter 10 mm festgelegt. Generell lässt sich sagen, dass an Eistagen am wahrscheinlichsten Baustopps eintreten, allerdings können auch Frosttage Baustopps (z. B. bei Mauerarbeiten) verursachen. Auch das individuelle Zusammenspiel zwischen Arbeiten auf dem kritischen Weg und dem Wetter beeinflusst die Anzahl der Baustopptage. Im Projekt stellen sich anhand des Terminplans und simulierten Abläufen auf Basis von Wetterdaten aus zehn Wintern Baustoppzeiten zwischen 2,2 und 6,4 Wochen (inklusive Weihnachtsurlaub)

ein. Finanziell bedeutet das für den AN, dass er im schlimmsten Fall etwa einen Monat Bauleiter und Polier sowie Baustelleneinrichtung vollständig aus eigener Tasche bezahlt. Im Projekt kostet eine wetterbedingte Baustoppwoche insgesamt etwa 3.000 €.

Den zweiten limitierenden Faktor bilden die **Arbeitskräfte**, die unter winterlichen Bedingungen zwangsweise nicht dieselbe Arbeitseffizienz wie im Sommer erreichen können. Kälte und Nässe beeinflussen das Wohlbefinden der Arbeitskräfte, während Schutzkleidung wie dicke Jacken und Handschuhe sie besonders bei kleinteiligen Arbeiten behindern. Dieser Aspekt ist nicht zu vernachlässigen, da die Arbeiten allein aus Temperaturgründen bis zu 35 % mehr Zeit erfordern können [3]. Übliche Niederschläge im Winter setzen die Arbeitseffizienz um 10 % herab. Besonders aber die Kombination von Nässe und Kälte ist problematisch. Rechnerisch können die einzeln ermittelten Arbeitseffizienzwerte in guter Näherung multipliziert werden. [4] In den simulierten Bauabläufen sind damit Reduzierungen der Tagesarbeitseffizienz von bis zu etwa 25 % keine Seltenheit. Diese Verzögerungen können nicht exakt für die einzelnen Arbeiten vorausgesagt werden – daher gibt es keine allgemeingültigen Winterstundenansätze. In der Gesamtheit aller Arbeiten lässt sich jedoch eine Spanne an Mehraufwandsstunden während des gesamten Projektes angeben: etwa 5 bis 9 % der regulär kalkulierten Gesamtstunden werden zusätzlich erforderlich.

Risikobepreisung auf Grundlage von Bauablaufsimulationen

Das Wetterrisiko ist auf Winterbaustellen das bedeutendste – es kann zudem in den meisten Fällen kaum auf wirtschaftliche Weise reduziert werden (kostenintensive Schutzmaßnahmen). Daher ist es sinnvoll, die Risikotragweite zu reduzieren, indem gezielt ein zusätzlicher finanzieller Puffer einkalkuliert wird. Die vorherigen Analysen zeigen, dass sich das Wetter

negativ auf den Faktor Zeit auswirkt, welcher dann berechenbare Kosten verursacht. Um diese Zeit in der Kalkulation zu berücksichtigen, werden Projektvariablen definiert. Diese nennen sich z. B. #BS (Summe der Baustopps in Wochen) oder #AE (Summe der zusätzlichen Arbeitsstunden aufgrund von verringerter Arbeitseffizienz). Normalerweise wären diese Werte erst greifbar nachdem das Projekt mindestens einmal gebaut wurde – hier werden die kostenbeeinflussenden Variablen jedoch aus den simulierten Bauabläufen berechnet. Der Kenntnisstand um die terminlichen Auswirkungen wird somit durch die Simulationsrechnung auf das Niveau von zehn identischen vorherigen Projekten gehoben – und das, ohne tatsächlich zehn potenzielle Problemstellungen gehabt zu haben.

Jede Bauablaufsimulation gibt für jede Projektvariable einen Wert aus. Folgend werden Ergebnisse an der Variable #BS erläutert:

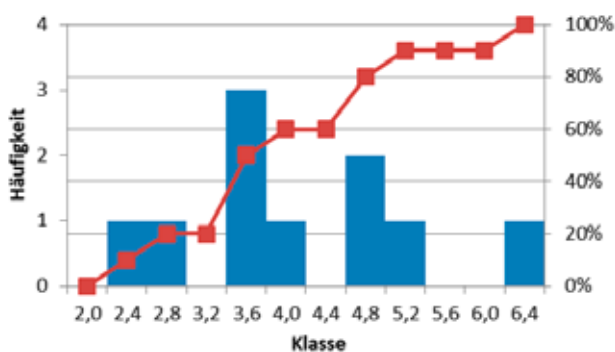


Abb. 2: Häufigkeit und kumulierte Wahrscheinlichkeit der Projektvariable #BS aus simulierten Bauabläufen (Quelle: eigene Darstellung)

In Abb. 2 sind die erzielten Werte in Klassen von 0,4 Wochen eingeteilt. Blau dargestellt ist die Häufigkeit der Werte. Der wahrscheinlichste Wert der Summe aller Baustopps im Projekt beträgt damit etwa 3,6 Wochen – er wurde in zehn Simulationen dreimal erzielt. Obwohl dieser Wert am ehesten auch am realen Projekt eintreten wird, sollte er in einer Kalkulation schon allein aufgrund der Schiefe der Verteilung die absolute Schmerzgrenze markieren.

Im Projekt wird das Ziel definiert, dass mit einer Sicherheit von 80% kein Verlust gemacht werden

soll. Hier kommt die kumulierte Wahrscheinlichkeit (in Abb. 2 rot dargestellt) ins Spiel. Demnach werden 4,8 Wochen Baustopp in 80 % der Fälle nicht überschritten – sie werden daher in der Kalkulation berücksichtigt. Nach diesem Verfahren werden alle Projektvariablen festgelegt.

In der erstellten Excelsimulation wird nach Auswahl des Sicherheitsniveaus automatisch eine angepasste Kalkulation sowie ein Schlussblatt erstellt – die errechneten Projektvariablen können allerdings auch mit geringem Aufwand in BRZ eingetragen werden, sodass das letztendliche Angebot wie üblich ausgedruckt werden kann.

Gesamtergebnis und Potenzial der Arbeit

Im Projekt ergeben sich mögliche Mehrkosten aus dem Risikobereich des AN in Höhe von 7 bis 11 % im Vergleich zur Sommerauftragssumme des Projekts. Damit wurde gezeigt, dass eine unangepasste Kalkulation mit üblichen 3 % Wagnis und Gewinn im Falle der Winterbaustelle zwangsweise zu Verlusten von mindestens 4 % führt. Positiv beeinflussen lässt sich die Baustelle im Wesentlichen nur mit einem möglichst hohen Anteil an Fertig- und Halbfertigteilen.

Das erstellte Excelprogramm ist so aufgebaut, dass bereits jetzt andere Bauorte mit veränderten klimatischen Bedingungen unkompliziert realisiert werden können – das Programm bezieht die konkreten historischen Wetterdaten des Bauortes aus einer separaten Wetterdatei.

Das Simulationsverfahren ließe sich mit einem gewissen softwaretechnischen Aufwand wahrscheinlich weitgehend automatisieren, um es als Baustein in Kalkulationsprogrammen zu kommerzialisieren.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: *DIN e.V.*: VOB 2016 Gesamtausgabe. Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen Teil A (DIN 1960), Teil B (DIN 1961), Teil C (ATV). Berlin: Beuth Verlag 2016.
- [2]: *Schenkel, A. (Wissenschaftliches Institut der AOK): Arbeitsunfähigkeitstage Branche Hochbau.* E-Mail vom 23.05.2018.
- [3]: *Lang, A.*: Ein Verfahren zur Bewertung von Bauablaufstörungen und zur Projektsteuerung. Zugl.: Darmstadt, Univ., Diss., 1987. Düsseldorf: VDI-Verlag 1988.
- [4]: *Abele, G.*: Effect of Cold Weather on Productivity. Hanover, New Hampshire: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory 1986.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. *Abele, G.*: Effect of Cold Weather on Productivity. Hanover, New Hampshire: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory 1986.
2. *Badura, B., Ducki, A., Schröder, H., et al. (Hg.)*: Fehlzeiten-Report 2017. Krise und Gesundheit - Ursachen, Prävention, Bewältigung. Berlin: Springer Verlag 2017.
3. *Biermann, M., Frikell, E., Hofmann, O. (Hg.)*: Bauzeit und Behinderung. Nachträge, Mehrkostenermittlung ; Das Handbuch für Praktiker. Stamsried: VOB-Verlag Ernst Vögel 2013.
4. *BRZ Deutschland GmbH (Hg.)*: Risikoorientierte Bauprojekt-Kalkulation. Eine innovative Methode zur Risikobeherrschung und Eindämmung von Ausreißer-Projekten. Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag 2012.
5. *Deutscher Wetterdienst (DWD)*: Climate Data Center (CDC): Historische tägliche Stationsbeobachtungen (Temperatur, Druck, Niederschlag, Sonnenscheindauer etc.) für Deutschland. Version v006. ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/. Messstation 2290. zul. gepr. am 05.09.2018.
6. *Vygen, K., Jousen, E., Lang, A., et al. (Hg.)*: Bauverzögerung und Leistungsänderung. Rechtliche und baubetriebliche Probleme und ihre Lösungen. Köln: Werner Verlag 2015.

Autor

Viviana Schmoll studierte Bauingenieurwesen (Schwerpunkt Baubetrieb) an der Hochschule München und verließ diese im Januar 2019 mit dem Abschluss Bachelor of Engineering.

Betreuer

Die Arbeit wurde an der Hochschule München, Fakultät Bauingenieurwesen - Fachgebiet Baubetriebsplanung und Projektentwicklung bei Prof. Thomas Clausen angefertigt.

Die Arbeit wurde mit dem 2. Preis ausgezeichnet.

ANALYSE VON HEBUNGEN UND SETZUNGEN WÄHREND DER ARBEITEN ZUR UNTERFAHRUNG DES EMPFANGSGEBÄUDES AM AUGSBURGER HAUPTBAHNHOF

Masterarbeit

Philipp Schön

Im Zuge des Bauprojekts „Mobilitätsdrehscheibe Augsburg“ wird der Augsburger Hauptbahnhof mit einem ca. 405 Meter langen Straßenbahntunnel (incl. Haltestelle) unterfahren. Die Trasse unterquert dabei auch das unter Denkmalschutz stehende Empfangsgebäude. Die Unterfahrung des Empfangsgebäudes wird in einer modifizierten Deckelbauweise realisiert, wobei die seitliche Baugrubenbegrenzung aus Düsenstrahlsäulen besteht. Die Fundamente des Gebäudes müssen ebenfalls unterfangen und tragende Bauteile über Stahlträger abgefangen werden. Aus logistischen Gründen sind die Düsenstrahlarbeiten in zwei Hauptabschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt wurde bereits hergestellt. Während dieser Arbeiten wurden die Hebungen und Setzungen über ein Schlauchwaagenmesssystem überwacht. Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, in welchem Ausmaß die bisherigen Arbeiten Hebungen und Setzungen verursacht haben. Ebenso sollen die Auswirkungen auf das Bahnhofsgebäude analysiert werden. Dafür werden zuerst die Messwerte des Schlauchwaagenmesssystems ausgewertet und über unterschiedliche Darstellungsformen visualisiert. Anschließend werden die Ergebnisse mit dem Bauablauf korreliert und interpretiert. Die daraus gewonnenen Kenntnisse werden herangezogen, um qualitative Prognosen bezüglich des Setzungsverhaltens für die weiteren Bauphasen zu treffen.

Keywords: Analyse, Hebungen, Setzungen, Unterfahrung, Düsenstrahlverfahren, Schlauchwaage, Mobilitätsdrehscheibe Augsburg Hauptbahnhof

Ausgangssituation

Um eine direkte Verknüpfung des ÖPNV mit dem Nah- und Fernverkehr der Deutschen Bahn zu schaffen, werden unterhalb der Bahngleise eine Straßenbahnhaltestelle sowie ein 405 Meter langer Straßenbahntunnel hergestellt. [2]

Die Tunneltrasse unterquert dabei auch das Hauptgebäude des Bahnhofes, das sogenannte Empfangsgebäude. Dies ist das älteste noch betriebene Bahnhofsgebäude einer deutschen Großstadt und steht deshalb unter Denkmalschutz. Der Tunnelabschnitt unterhalb

dieses Gebäudes wird in einer modifizierten Deckelbauweise erstellt, wobei die seitliche Baugrubenbegrenzung im Düsenstrahlverfahren (DSV) hergestellt wird. Aus logistischen Gründen sind die DSV-Arbeiten in zwei Hauptabschnitte (Abschnitt Ost und West) unterteilt. [2]

Um den Bauablauf zu erleichtern, würde in der Regel ein Abriss des betroffenen Gebäudeteils erfolgen. Da dies aus denkmalschutztechnischen Gründen jedoch nicht möglich ist, wird lediglich ein Teil der Fassade im Erdgeschoss ausgebrochen und nach Fertigstellung der Tunneldecke wieder identisch errichtet. Die darüber liegenden Stockwerke sind von diesen Arbeiten jedoch nicht betroffen. Sie werden mit Hilfe von hydraulischen Pressen auf einer Stahlabfangkonstruktion „schwebend“ abgestützt. [2]

Über die hydraulischen Pressen können kleinste Veränderungen des Baugrunds ausgeglichen werden, falls sich dieser im Zuge des Tunnelbaus hebt oder setzt. Dies ist notwendig, da ungleichmäßige Hebungen bzw. Setzungen zu Beschädigungen (z.B. Risse) des Bahnhofsgebäudes führen könnten. Zur Feststellung dieser Vertikalverschiebungen wird das Bahnhofsgebäude deshalb mithilfe eines Schlauchwaagenmesssystems umfangreich messtechnisch überwacht. [2]

Problemstellung

In dieser Arbeit wird das Thema „Analyse von Hebungen und Setzungen während der Arbeiten zur Unterfahrung des Empfangsgebäudes am Augsburger Hauptbahnhof“ behandelt. Dabei wird auf das Projekt „Mobilitätsdrehscheibe Augsburg Hauptbahnhof“, dort angewendete Arbeitsverfahren und das zur Überwachung der Hebungen und Setzungen verwendete Messsystem eingegangen.

Außerdem wird untersucht, in welchem Ausmaß die bisherigen Bauarbeiten Hebungen und

Setzungen hervorgerufen haben. Ebenso sollen die Auswirkungen auf das Bahnhofsgebäude analysiert werden.

Abschließend werden die daraus gewonnenen Kenntnisse dazu herangezogen, um qualitative Vorhersagen bezüglich des Setzungsverhaltens für künftige Bauphasen treffen zu können.

Das Schlauchwaagenmesssystem

Zur Feststellung der Vertikalverschiebungen ist eine kontinuierliche Überwachung des Empfangsgebäudes notwendig. Dies geschieht mit Hilfe eines Schlauchwaagenmesssystems. [2]

Diese Systeme arbeiten nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren und bieten die Möglichkeit der Bestimmung von Höhenunterschieden, ohne dass der Sichtkontakt zwischen den Messpunkten und der Messwerterfassung erforderlich ist. [1]

Die Drucksensoren werden in Form einer Messaufnehmerkette entlang der permanenten und temporären Unterstützungen auf einem Horizont montiert und mit der Referenzstation verbunden. Der Referenzmesspunkt muss dabei in einem Bereich angebracht werden, an welchem keine Vertikalverschiebungen auftreten. [1] [2]

Methodik zur Auswertung

Zunächst wird der Permanentenspeicher des Schlauchwaagenmesssystems ausgelesen, die daraus erhaltenen Messdaten reduziert und über unterschiedliche Darstellungsvarianten visualisiert.

Die an den jeweiligen Messpunkten gemessenen Hebungen und Setzungen werden punktuell für jeden Messpunkt über die Bauzeit dargestellt. Die Vertikalverschiebungen sollen jedoch nicht nur punktuell, sondern auch über Verknüpfungen der einzelnen Messpunkte miteinander analysiert werden. Daher werden sowohl Längs- als auch

Querschnitte durch das Empfangsgebäude erstellt, welche den Setzungsverlauf an den relevanten Gebäudeachsen darstellen.

Ein Überblick über den gesamten messtechnisch überwachten Bereich ist hierbei jedoch nicht möglich. Zur genaueren Analyse der Hebungen und Setzungen werden neben den punktuellen und axialen Darstellungsvarianten die Vertikalverschiebungen deshalb außerdem flächenhaft über Isolinien abgebildet (siehe Abbildung 1).

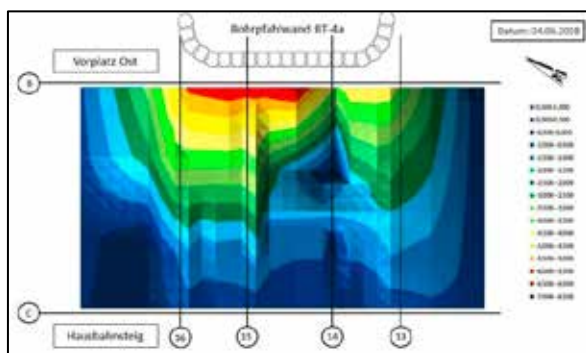


Abb. 1: Höhenlinien vom 04.06.2018

Alle Darstellungsvarianten sind dabei so programmiert, dass sich der gewünschte Darstellungszeitpunkt zwischen dem 08.08.2017 (Messbeginn) und dem 04.06.2018 über eine Dropdown-Liste frei wählen lässt.

Beschreibung der Messergebnisse

Anhand dieser Darstellungen können folgende zwei Haupttrends festgestellt werden:

1. Trend:

Seit Beginn der DSV-Arbeiten ist ein nahezu linearer Setzungsverlauf der Messpunkte zu verzeichnen. Mit Fertigstellung des DSV-Körpers stellen sich diese Setzungen jedoch nicht wie erwartet ein, sondern dauern noch über Monate hinweg an.

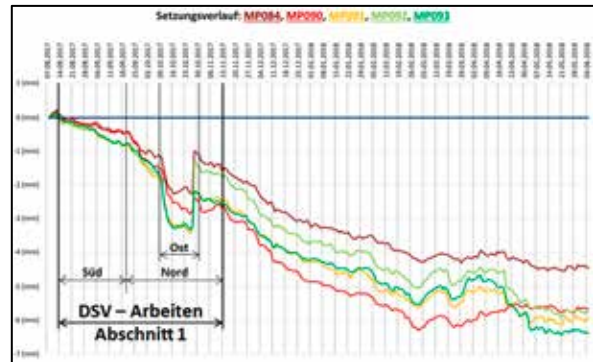


Abb. 2: Setzungsverlauf der Messpunkte MP084, MP090, MP091, MP092, MP093 in Abhängigkeit zur Bauzeit

2. Trend:

Die Setzungen in der östlichen Gebäudehälfte, in welcher die DSV-Arbeiten bereits stattfanden, sind deutlich größer als in der westlichen, in welcher die DSV-Arbeiten noch nicht stattfanden. Das Empfangsgebäude setzt sich im Bereich, in welchem die DSV-Arbeiten bereits durchgeführt wurden, jedoch nicht wie erwartet gleichmäßig, sondern ungleichmäßig (siehe Abbildung 3).

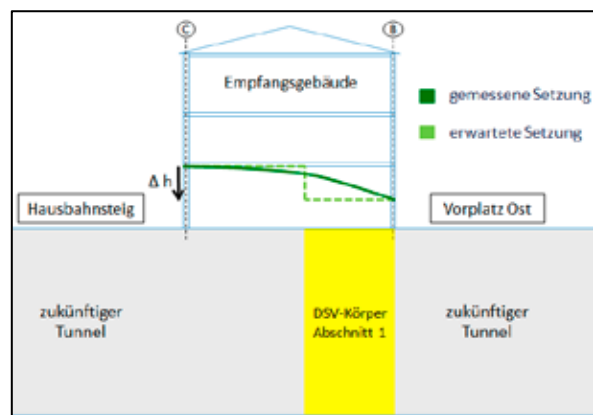


Abb. 3: Setzungsverlauf im Querschnitt

Aus diesen beiden Trends resultieren zwei Fragestellungen:

1. Frage:

Weshalb setzt sich das Gebäude nach dem Ende der DSV-Arbeiten dennoch kontinuierlich weiter?

2. Frage:

Weshalb setzt sich das Gebäude im Bereich der DSV-Arbeiten ungleichmäßig?

Interpretation der Messergebnisse

Bezüglich der ersten Frage werden zuerst typische setzungsauslösende Ursachen wie eine Grundwasserabsenkung oder die Beeinflussung durch die benachbarte Bohrpfahlwand des Abzweigungsbauwerks untersucht. Da Schlauchwaagenmesssysteme sehr temperaturempfindlich sind, werden auch Temperaturschwankungen betrachtet. Diese drei Ursachen können jedoch ausgeschlossen werden.

Eine Erklärung für den lang anhaltenden Setzungstrend liefern anschließend erst die genaue Analyse des Bauablaufes und eine mit diesem verbundene Lastumlagerung der Gebäudelasten auf die DSV-Körper während der Herstellung eines neuen Versorgungskanals.

Auch wird festgestellt, dass die durch die Lastumlagerung verursachten Setzungen durch weitere Einflussfaktoren wie das Kriechen der DSV-Säulen, einen uneinheitlichen E-Modul der DSV-Säulen, die zeitliche Entwicklung des E-Moduls oder eine fehlende kraftschlüssige Verbindung zwischen Fundament und DSV-Körper beeinflusst werden können.

Um den ungleichmäßigen Setzungsverlauf erklären zu können, werden die Trag- und Gründungsstruktur des Bahnhofsgebäudes sowie die Lage der Messpunkte im Gebäude in dieser Masterarbeit ebenfalls betrachtet. Dabei wird deutlich, dass sich während der bisherigen DSV-Arbeiten hauptsächlich die Fassade des Bahnhofsgebäudes gesetzt hat. Die übrigen von den DSV-Arbeiten betroffenen Bauteile weisen aufgrund der Gründungssituation und der Gebäudesteifigkeit nur sehr geringe Vertikalverschiebungen auf.

Die Messpunkte des Schlauchwaagenmesssystems sind überwiegend an den Unterzügen und den Fassaden angebracht. Die Unterzüge können in einzelne Einfeldträger unterteilt werden, welche an einem Ende an der Ostfassade und am anderen Ende auf Stützen aufgelagert sind. Die Stützen befinden sich jedoch

in Bereichen, welche kaum von Setzungen betroffen sind. Somit setzen sich nur die östlichen Auflager der Unterzüge, die westlich liegenden jedoch nicht. Das Schlauchwaagenmesssystem zeichnet also nur die Verschiebung der Unterzüge auf und nicht die im Baugrund tatsächlich vorliegenden Setzungen. Dies erklärt den ungleichmäßig gemessenen Setzungsverlauf im Bereich der DSV-Arbeiten.

Folgerungen für kommende Bauabschnitte

Aufgrund der durch die Analyse der Hebungen und Setzungen gewonnenen Kenntnisse ist es abschließend möglich, qualitative Prognosen für die Setzungsverläufe der kommenden Bauabschnitte zu treffen.

In der zweiten Bauphase finden die DSV-Arbeiten im östlichen Gebäudeteil (erster Abschnitt) statt. Einhergehend mit dem Beginn der Düsenstrahlarbeiten, ist der Beginn der Setzungen in diesem Bereich zu verzeichnen. In der sechsten Bauphase soll anschließend der Einbau des DSV-Körpers im westlichen Gebäudeteil erfolgen (zweiter Abschnitt). Aufgrund der ähnlichen Anordnung der DSV-Säulen beider Abschnitte kann daher auf ein nahezu analoges Setzungsverhalten dieser beiden Bauphasen geschlossen werden.

Jedoch verursachen nicht nur die DSV-Arbeiten, sondern auch die Arbeiten am Versorgungskanal und die damit verbundene Lastumlagerung Vertikalverschiebungen. In der westlichen Gebäudehälfte sind jedoch vorerst keine derartigen Arbeiten vorgesehen. Deshalb werden Setzungen, wie sie aus dem Versorgungskanal resultierten, nicht erwartet.

Somit liegen die prognostizierten Setzungen für den westlichen Abschnitt in einem ähnlichen Bereich wie die bereits im östlichen Abschnitt gemessenen Setzungen. Als Differenz zwischen den beiden Bereichen bleiben vorerst nur die durch die Arbeiten am Versorgungskanal verursachten Setzungen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Prof. Dr.-Ing. Boley, Conrad (Hrsg.) (2012): Handbuch Geotechnik: Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 1. Auflage.
- [2]: Stadtwerke Augsburg (2017): Bauprojekt MDA Hauptbahnhof, Erläuterungsbericht Mobilitätsdrehscheibe Augsburg-Hauptbahnhof (internes Dokument, Stand 25.08.2017).

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Prof. Dr.-Ing. Boley, Conrad (Hrsg.) (2012): Handbuch Geotechnik: Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 1. Auflage.
2. Prof. Dr.-Ing. Katzenbach, Rolf und Leppla, Steffen (Hrsg.) (2015): Handbuch des Spezialtiefbaus, Geräte und Verfahren, Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH, 3. Auflage.
3. Prof. Dr.-Ing. Kempfer, Hans-Georg, Dr.-Ing. Raithel (2009): Bodenmechanik und Grundbau, Band 2: Grundbau, Berlin: Bauwerk Verlag GmbH, 2. Auflage.
4. Prof. Dr. Kolymbas, Dimitrios (2011): Geotechnik, Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 3. Auflage.
5. Prof. Dr.-Ing. Maybaum, Georg u.a. (2011): Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund und Spezialtiefbau, Baugrund – Baugruben – Baugrundverbesserung – Pfahlgründungen – Grundwasserhaltung, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2. Auflage.
6. Bauprojekt MDA Hauptbahnhof, interne Dokumente.

Autor

Philipp Schön

seit 10/2018	Bauleiter (Ed. Züblin AG)
10/2016 – 09/2018	HS Augsburg (Allgemeiner Ingenieurbau, Master of Engineering)
10/2012 – 09/2016	OTH Regensburg (Bauingenieurwesen, Bachelor of Engineering)

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät für Architektur und Bauwesen, im Fachbereich Geotechnik und Spezialtiefbau, der Hochschule Augsburg, bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Gattermann

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

KRIECHVERHALTEN VON GEFRORENEM SAND UNTER EINAXIALER, STUFENWEISER LASTEINWIRKUNG

Masterarbeit

Simon, Stanglmayr

Bei besonders anspruchsvollen Bauvorhaben kann im Spezialtiefbau das sehr umweltfreundliche Vereisungsverfahren zur temporären Bodenverfestigung angewendet werden, das aber aus Kostengründen oft nicht eingesetzt wird. In dieser Arbeit wird untersucht, wie die Wirtschaftlichkeit des Vereisungsverfahrens erhöht werden kann. Nach bisherigem Wissensstand erreichen gefrorene Bodenkörper unter gleichen Spannungsverhältnissen, unabhängig von der Belastungsart, die gleiche minimale Kriechrate. Experimentelle, einaxiale Kriechversuche zeigen jedoch, dass das Kriechverhalten von gefrorenem Sand durch stufenweise Lastaufbringung positiv beeinflusst wird. Dies verdeutlichen alle geprüften Bodenproben anhand geringerer minimaler Kriechraten und verlängerter Standzeiten. Eine stufenweise Belastung gefrorener Erdkörper in der Praxis (z.B. Tunnelvortrieb in Teilflächen im Schutz eines Frostkörpers) würde eine Verformungsreduzierung und gleichzeitig eine Verlängerung der Dauer der Standsicherheit bewirken.

Keywords: Vereisungsverfahren, gefrorener Sand, temporäre Bodenverfestigung, Kriechverhalten, stufenweise Lasterhöhung, minimale Kriechrate, Standzeit

Thematische Einführung

Die Wirtschaftlichkeit der umweltfreundlichen Bodenvereisung, die zur temporären Bodenverfestigung z.B. im Tunnelbau verwendet wird, kann durch numerische und baupraktische Ansätze verbessert werden. Durch gezielten Teilausbruch des Tunnels werden Spannungen im vereisten Querschnitt stufenweise erhöht. Dieser Effekt kann genutzt werden, um das Kriechverhalten von Sand zu vermindern und die Standzeit des

Vereisungskörpers während des Tunnelausbaus zu erhöhen. Die Interaktion der Bestandteile des Vierphasengemisches (Mineralkorn, Eis, Luftporen und ungefrorenes Porenwasser) ist für die Festigkeitsentwicklung von gefrorenem Boden verantwortlich [1]. Natürliche Bodenverhältnisse werden im Labor realitätsnah aus gestörten Bodenproben nachgebildet und mit Hilfe von einaxialen Kriechversuchen monoton und stufenweise belastet.

Probekörperherstellung

Der Wassergehalt, die Lagerungsdichte und die Kornverteilung beeinflussen das mechanische Verhalten von gefrorenem Sand maßgeblich. Da nur Probekörper mit äquivalenten Eigenschaften vergleichbare Ergebnisse ermöglichen, wird ein Verfahren entwickelt, das die Herstellung von Versuchskörpern unter reproduzierbaren Bedingungen erlaubt. Die Abmessungen der zylindrischen Proben betragen $H = 100 \text{ mm}$ und $D = 50 \text{ mm}$.

Mit Hilfe einer teilbaren Schalung und der Wasser-Sedimentations-Methode ist es möglich, Proben mit hohem Sättigungsgrad und niedriger Segregation herzustellen. Die durch Vibration verdichteten Bodenproben werden nach dem Einfrieren mit Hilfe einer Steinsäge auf die gewünschte Probenlänge verkürzt.

Methodik

Vorversuche und die Literatur [1] zeigen, dass rein deviatorisches Kriechen im Eis nur mit einer funktionierenden Endflächenschmierung erzeugt werden kann. Als einziges Schmiermedium erweist sich Hochvakuumsilikonfett als geeignet,

das auf gehärtete und polierte Stahlplatten aufgebracht wird. Die Probenverformungen, welche über die komplette Probenhöhe homogen zylindrisch sind, bestätigen eine funktionierende Endflächenschmierung. Zur Lastaufbringung steht eine modifizierte Oedometerbank zur Verfügung, die die Proben einaxial beansprucht und eine radiale Deformation nicht behindert. Eine Gummihülle schützt die gefrorenen Sandproben gegen Sublimation.

Mit dem Versuchsaufbau aus Abbildung 1 werden zunächst Versuche unter monotoner Belastung bei verschiedenen Temperatur- und Spannungsverhältnissen durchgeführt. Die Versuchsergebnisse werden für die Kalibration der Stoffkonstanten des Cudmani-Modells verwendet.

Die Versuche mit stufenweiser Lastaufbringung erfolgen nur bei einem Temperaturniveau, wobei die Spannungen stets bei gleichen Dehnungen erhöht werden. Vom Anfangsspannungszustand ausgehend wird die erste Spannungserhöhung bei 2,5 % Dehnung durchgeführt. Die zweite und letzte Spannungserhöhung wird bei 3,5 % Dehnung realisiert. Bei jedem Versuch wird gleich vorgegangen, so dass die Versuche verglichen werden können.

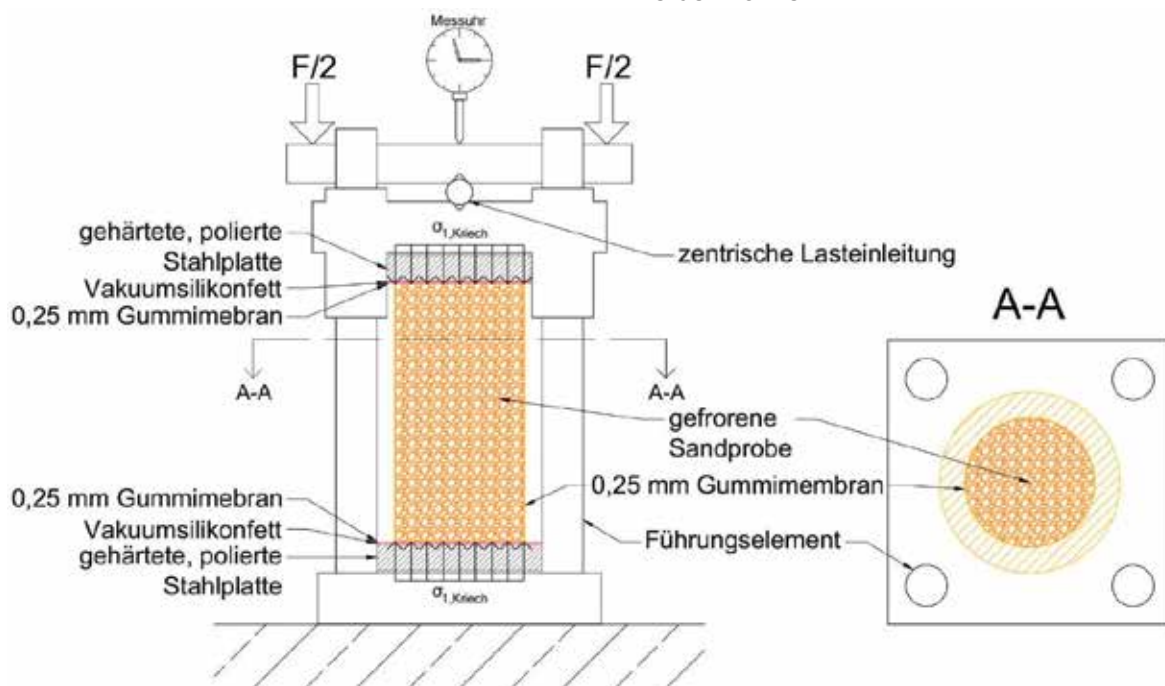


Abb. 1: Versuchsaufbau für einaxiale Kriechversuche

Versuchsauswertung

Gefrorener Sand weist bei Erreichen der sekundären Kriechphase einen Wendepunkt im Dehnungs-Zeit-Diagramm auf (s. Abb. 2). Der Wendepunkt, der durch die minimale Kriechrate $\dot{\epsilon}_m$ sowie die Standzeit t_m charakterisiert ist, führt zu einer Kriechratenbeschleunigung (s. Abb. 3).

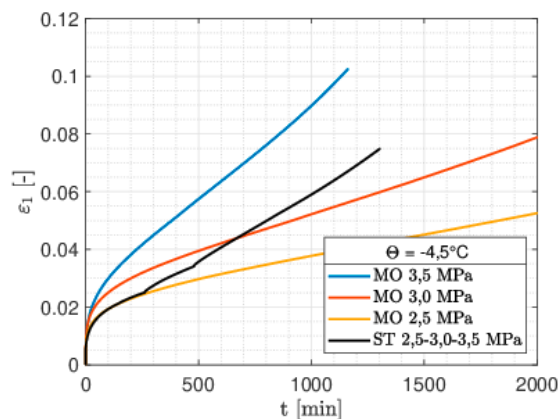


Abb. 2: Exp. Dehnung vs. Zeit

Anhand der Charakteristik des Wendepunktes kann der Einfluss der stufenweisen Belastung ermittelt werden, indem die monotonen Versuche, mit denen der stufenweisen Belastung verglichen werden. Neben der üblichen Versuchsdarstellung mit Dehnung und Kriechrate über die Zeit, wird zusätzlich eine normierte Darstellung eingeführt, um den Unterschied zwischen monotoner und stufenweiser Belastung zu veranschaulichen.

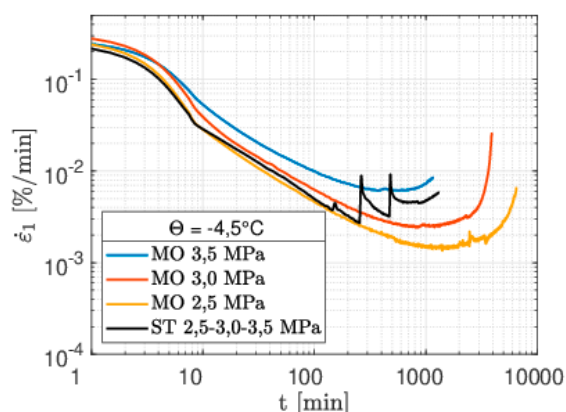


Abb. 3: Exp. Kriechrate vs. Zeit

Die normierte Darstellung erlaubt eine lokale Betrachtung der Kriechratenentwicklung unter Einbezug der Vorbelastung des Bodens. Ein

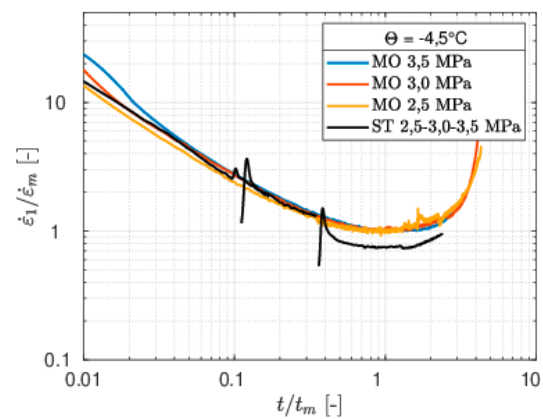


Abb. 4: Exp. lokale normierte Kriechgeschwindigkeitskurven

exemplarisches Versuchsergebnis unter stufenweiser Belastung ist in Abbildung 4 dargestellt.

Alle Versuche unter Vorbelastung zeigen im Vergleich zur monotonen Belastung eine geringere Kriechrate und eine längere Standzeit bei Erreichen des Wendepunktes. Dies zeigt den positiven Einfluss einer stufenweisen Belastung auf die Kriechratenentwicklung und deren Abhängigkeit von der Vorbelastung des gefrorenen Bodens.

Numerische Simulation der Versuche

Cudmani greift das eindimensionale Orth-Modell zur Simulation des Kriechverhaltens von gefrorenen Bodenkörpern auf und erweitert dieses für den dreidimensionalen Spannungsraum [2]. Die Gesamtdehnung wird in einen viskosen und elastischen Anteil unterschieden:

$$\dot{\sigma} = [D] \dot{\epsilon}_{el} = [D] (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_v)$$

Die Projektion der viskosen Kriechrate in die Deviatorebene erfolgt mit nachstehender Gleichung:

$$\dot{\epsilon}_v = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\dot{\sigma}}{\|\dot{\sigma}\|} \dot{\epsilon}_m \cdot A \cdot \exp^{\beta \cdot \frac{t}{t_m}} \cdot \left(\frac{t}{t_m}\right)^{-\beta}$$

Die Nachrechnung wird mit dem Elementtestprogramm Incremental Driver [3] und einer UMAT [4] vorgenommen. Die Kalibrierung der Stoffkonstanten des Cudmani-Modells erfolgt anhand der monotonen Kriechversuche (s. Abb. 5/6). Da das Cudmani-Modell keine Materialverfestigung berücksichtigt, wird anhand der Versuchs-

ergebnisse für gefrorenen Sand unter stufenweiser Belastung ein zweiter Parametersatz kalibriert, mit dem eine Bodenverfestigung berücksichtigt werden kann.

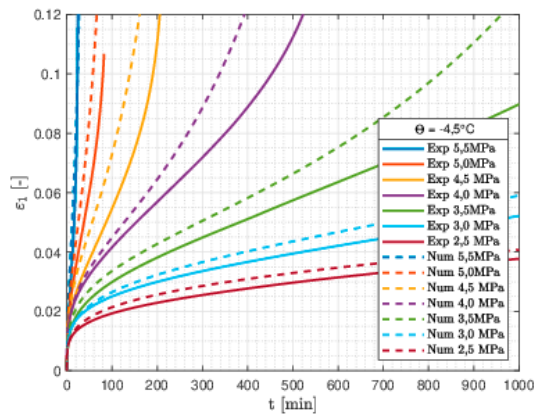


Abb. 5: Num. Monoton: Dehnung vs. Zeit

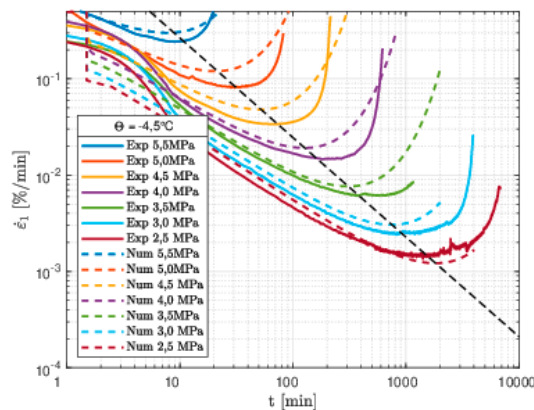


Abb. 6: Num. Monoton: Kriechrate vs. Zeit

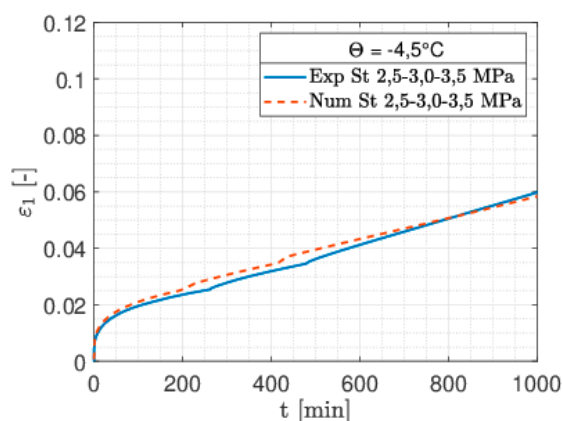


Abb. 7: Nachrechnung eines Kriechversuches unter stufenweiser Lastaufbringung: Dehnung vs. Zeit

Die Erstbelastung wird mit dem bereits bestehenden Parametersatz aus den monotonen Versuchen simuliert. Für die Spannungserhöhung wird der Parametersatz, der für die Material-

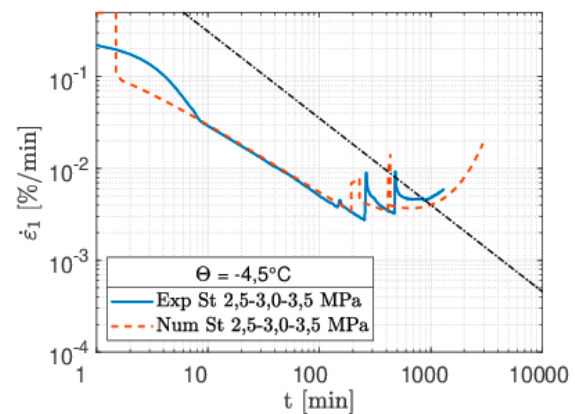


Abb. 8: Nachrechnung eines Kriechversuches unter stufenweiser Lastaufbringung: Kriechrate vs. Zeit

verfestigung kalibriert wurde, verwendet. Hierdurch wird der Vorbelastung und der Bodenverfestigung mit guter Übereinstimmung Rechnung getragen (s. Abb. 7-8).

Fazit

Obwohl vereinzelt in der Literatur berichtet wird, dass eine Vorbelastung des Bodens auf die Kriechratenentwicklung keinen Einfluss hat, beobachtet Orth einen deutlichen Zuwachs des Elastizitätsmoduls unter wechselnder Belastung [1]. Die Erkenntnisse von Orth können durch die in dieser Arbeit durchgeführten Kriechversuche bestätigt werden. Eine Vorbelastung von gefrorenem Sand bewirkt eine Abnahme der Kriechgeschwindigkeit und eine Verlängerung der Standzeit. Die Proben erreichen unabhängig vom Spannungsniveau und der Vorbelastung immer die gleiche Entfestigung (Rissbildung). Geringere Kriechgeschwindigkeiten werden nur durch höhere Versetzungsdichten im Eis hervorgerufen [1].

Durch die praktische Anwendung von stufenweiser Belastung auf gefrorene Erdkörper, die z.B. bei einem Tunnelvortrieb in Teilflächen im Schutz eines Frostkörpers realisiert werden kann, können Verformungen reduziert und gleichzeitig die Dauer der Standsicherheit des Frostkörpers verlängert werden. Hierdurch erweitert sich das wirtschaftliche Anwendungsspektrum der äußerst umweltfreundlichen Bodenverfestigung.

Literaturverzeichnis

- [1] Orth, W. (1986). Gefrorener Sand als Werkstoff: Elementversuche und Materialmodell (Heft 100). Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe.
- [2] Cudmani, R. (2006). An elastic–viscoplastic model for frozen soils. Numerical modelling of construction processes in geotechnical engineering for urban environment. Taylor & Francis Group, London, 177-183.
- [3] Niemunis, A. (2017). Incremental driver, user’s manual. University of Karlsruhe KIT, Germany.
- [4] Cudmani, R., Sun, J., & Yan, W. (2018). A Constitutive Model for Frozen Granular Soils. In Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering (pp. 1345-1349). Springer, Cham.

Autor

Simon Stanglmayr

04/2016 – 02/2019	Master Bauingenieurwesen, TU München
02/2016 – 07/2016	Gastsemester an der Budapest University of Technology and Economics
10/2012 – 03/2016	Bachelor Bauingenieurwesen, TU München
04/2018 – 08/2018	Werkstudent, Gebrüder Schmözl GmbH
10/2017 – 03/2018	Studentische Hilfskraft, TUM – Lehrstuhl für Verkehrswegebau
04/2017 – 01/2018	Werkstudent bei Obermeyer Planen und Beraten GmbH
10/2016 – 03/2017	Studentische Hilfskraft, TUM – Lehrstuhl für Verkehrswegebau
08/2016 – 09/2016	Ingenieurpraktikum DELTA Immotec GmbH, Landshut
10/2015 – 01/2016	Ingenieurpraktikum DELTA Immotec GmbH, Regensburg
10/2016 – 12/2018	Stipendiat am Oskar-von-Miller Forum

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau und Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der TU München bei M.Sc. Ulrich Schindler und Prof. Dr.-Ing. Roberto Cudmani.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

PROZESSTECHNISCHE OPTIMIERUNG DER ADDITIVEN FERTIGUNGSMETHODE SELECTIVE CEMENT PASTE INTRUSION DURCH EINSATZ VON ZUSATZMITTELN

Bachelorarbeit

Alexander Straßer

Im Baugewerbe bekommen die additiven Fertigungsverfahren einen immer höher werdenden Stellenwert, da man mit diesem Verfahren die Kosten für Betonbauteile ab einem gewissen Grad der Schalungskomplexität enorm senken kann. Vor allem für die mittelständische Bauwirtschaft sind die additiven Fertigungsverfahren eine Bereicherung, da die Bauwirtschaft unter besonders hohem Kosten- und Konkurrenzdruck steht. Die additiven Fertigungsverfahren stellen damit ein wichtiges Instrument der Betonbauteilherstellung der Zukunft dar. Ziel dieser Bachelorarbeit war es, eine bestehende Zementleimrezeptur, welche für das additive Fertigungsverfahren Selective Cement Paste Intrusion abgestimmt war, hinsichtlich einer schnelleren Herstellungszeit zu optimieren, um eine Produktion im Zweischichtbetrieb und eine zusätzliche Kostensenkung durch kürzere Herstellungszeiten zu ermöglichen.

Wichtig für die Optimierung war, dass die Verkürzung der Bauteilherstellung keinerlei Einbuße in Hinblick auf die Verarbeitbarkeit während der Bauteilherstellung nach sich zog. Dabei wurde die Anwendung und geeignete Komposition von Fließmitteln, Betonverflüssigern, Beschleunigern und Verzögerern untersucht. Um die Zeitspanne der Erstarrung und die Verarbeitbarkeit bestimmen zu können, wurden die Versuche mit einem Vicat-Nadel Gerät und einem Hägermann-Trichter durchgeführt. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sowohl die Erstarrungszeit als auch die Verarbeitbarkeit der Rezeptur optimiert werden konnte. Zum Abschluss wurde eine Festigkeitsprüfung der optimierten Rezeptur und der referenzierenden Rezeptur durchgeführt und gegenüberübergestellt.

Keywords: Hochschulpreis, Baugewerbe, Additives Fertigungsverfahren, 3D Druck, Bauchemie, Selective Cement Paste Intrusion

Motivation und Aufgabenstellung

Die additiven Fertigungsverfahren, auch umgangssprachlich oft als „3D Druck“ bezeichnet, nehmen einen zunehmend höheren Stellenwert, vor allem im Ingenieurbereich ein, da Bauteile aus ökologischen und ökonomischen Gründen immer schlanker und Materialvolumina auf ein Minimum reduziert werden müssen. Die daraus resultierenden Geometrien gehen mit steigenden Kosten einher, da der Aufwand für den Schalungsbau größer ist. Dennoch soll die Bauteilfertigung möglichst kostengünstig gehalten werden. Hier setzt der 3D Druck an. Hier bedarf es keiner Schalung und es entstehen–unabhängig von der Geometrie – keine Schalungskosten. Dazu können nicht schalbare Bauteile hergestellt werden.

Die Selective Paste Intrusion und die Extrusion sind Verfahren, um 3D gedruckte Betonbauteile herzustellen. Während bei der Extrusion fertig gemischter Beton schichtweise übereinander aufgebracht wird, wird bei der Selective Cement Paste Intrusion flüssiger Zementleim auf eine trockene Gesteinsschicht aufgebracht. Der Zementleim dringt durch die Schwerkraft in die Gesteinsschicht ein. Anschließend wird eine neue Gesteinsschicht darüber aufgebracht und das Verfahren wiederholt, bis ein dreidimensionales Bauteil entstanden ist. Das Prinzip der Paste Intrusion ist in Abbildung 10 dargestellt.

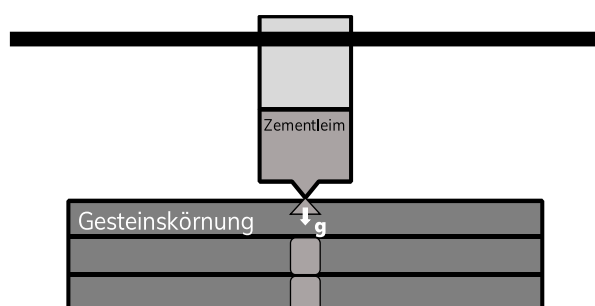


Abbildung 10: Selective Cement Paste Intrusion

Der Vorteil der Intrusion gegenüber der Extrusion ist, dass man feinere Strukturen und Oberflächen erhält und zudem Geometrien drucken kann, welche mit der Extrusion nicht möglich sind, z. B.

Überhänge, da das umgebende Partikelbett als Stützstruktur wirkt. Aktuell sind die additiven Fertigungsverfahren im Bauwesen noch nicht so geläufig wie im Maschinenbau. Dennoch erreichen Bauteile, die mittels Intrusion hergestellt werden, Druckfestigkeiten über 70 MPa nach sieben Tagen und eine hohe Dauerhaftigkeit [1]. Dazu gibt es bereits auch erste additiv gefertigte Bauwerke, wie beispielsweise eine Fußgängerbrücke in Madrid [1]. Um nun die Produktionsdauer solcher Bauelemente künftig verkürzen und damit auch die Kosten reduzieren zu können, wurde die Zementleimrezeptur mit verschiedenen Betonzusatzmitteln optimiert. Eine Verkürzung der Bauteilherstellung erfordert eine möglichst frühe Erstarrung des Betons, welche mit der Verarbeitbarkeit und damit der Druckbarkeit im Zielkonflikt steht. Deshalb wurden beide Ziele bei der Optimierung berücksichtigt.

Ziel war es, eine gleichbleibende Verarbeitbarkeit über 180 Minuten bei einer möglichst schnellen Erstarrung des Betons zu erreichen. Dabei wurde die Anwendung und geeignete Komposition von Fließmitteln, Betonverflüssigern, Beschleunigern und Verzögerern untersucht.

Messmethoden

Damit der Zementleim durch die Schläuche und die Druckerdüse gepumpt und anschließend alleine durch die Schwerkraft in die Gesteinsschicht eindringen kann, muss dieser über die gesamte Druckzeit ein konstantes Maß an Fließfähigkeit (Verarbeitbarkeit) besitzen, welches mithilfe des Hägermann-Trichters und dem Ausbreitfließmaß gemessen wurde. Es wurde ein Ausbreitfließmaß von 400 mm über eine festgesetzte Druckzeit von 180 Minuten angestrebt.

Die Erstarrungsgeschwindigkeit bzw. der Erstarrungsverlauf wurden mit einem Vicat-Nadel-Gerät geprüft. Bei diesem Prüfverfahren wurde eine Nadel mit Prüfgewicht in eine mit Zementleim gefüllte Schale fallen gelassen. Anhand der gemessenen Eindringtiefe der Nadel

konnte der Erstarrungsbeginn und das Erstarrungsende bestimmt werden. Eine Eintauchtiefe von 37 mm entsprach dem Erstarrungsbeginn, eine Eintauchtiefe von 0,5 mm dem Erstarrungsende. Diese Werte sind in der DIN EN 196-3 [2] genormt.

Ergebnisse

Zunächst wurde ein Referenzleim aus Wasser, Zement und PCE Fließmittel hergestellt. Der w/z Wert lag bei 0,3 und der Fließmittelgehalt bei 0,80 % bezogen auf die Zementmasse. Diese Grundrezeptur war die Basis aller optimierten Zementleime und blieb unverändert. Für die Optimierungsversuche kamen zusätzlich Beschleuniger, Verzögerer und Betonverflüssiger zum Einsatz. Der Referenzleim mit Wasser, Zement und Fließmittel konnte kein konstantes Ausbreitfließmaß von 400 mm über eine Zeitspanne von 180 Minuten aufrechterhalten. Erste Erfolge wurden mit einer Mischung aus Wasser, Zement, Fließmittel, Betonverflüssiger und einem Erhärtungsbeschleuniger mit synthetischen C-S-H Kristallen erzielt. Das Ausbreitfließmaß sank zur 180. Minute auf 392 mm. Auf Basis dieser Rezeptur wurden weitere Versuche durchgeführt und ein Beschleuniger (Erstarrungsbeschleuniger) auf Basis von Calciumnitrat hinzugefügt. Bei dieser Rezeptur sank das Ausbreitfließmaß nach drei Stunden von 400 mm auf 396 mm.

Die Ergebnisse der Ausbreitfließmaße sind der Abbildung 11 zu entnehmen.

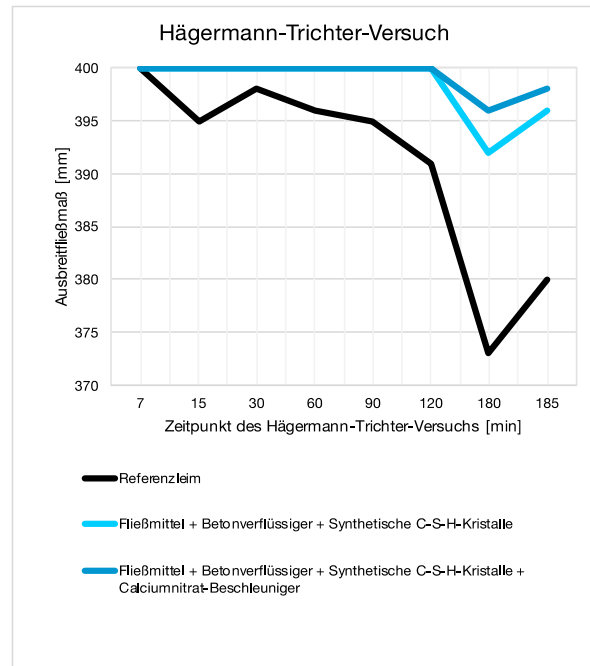


Abbildung 11: Hägermann-Trichter-Versuch

Bei der Auswertung des Erstarrungsende dieser Rezepturen ließ sich festhalten, dass der Referenzleim nach 13 Stunden erstarrte. Die Rezeptur aus Wasser, Zement, Fließmittel, Betonverflüssiger und dem Erhärtungsbeschleuniger mit synthetischen C-S-H Kristallen erstarrte bereits nach neun Stunden. Die Zeitersparnis betrug vier Stunden.

Ein noch rascheres Erstarrungsende wurde mit dem zusätzlich eingebrachten Calciumnitrat-Beschleuniger erzielt. Hier wurde eine Zeitersparnis von über fünf Stunden realisiert. Dazu sind die Ergebnisse der Vicat-Nadel-Versuche in Abbildung 12 dargestellt.

Höhere Dosierungen der Beschleuniger korrelierten mit noch kürzeren Erstarrungszeiten, aber auch mit einer verminderten Verarbeitbarkeit.

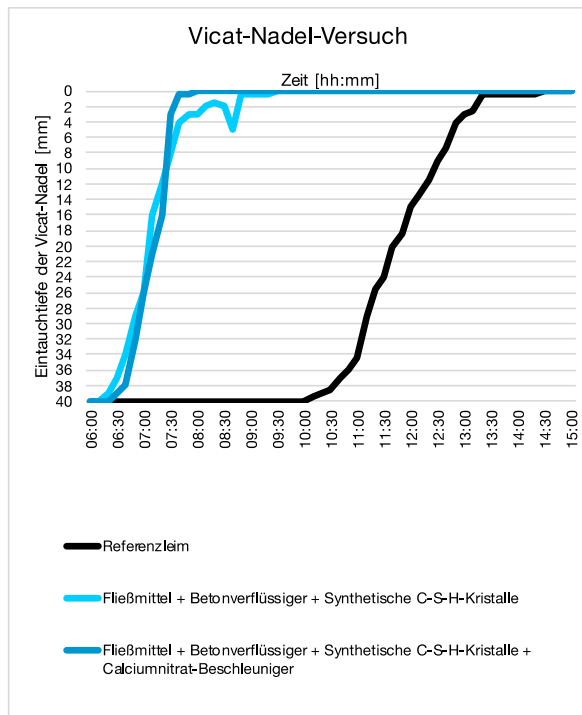


Abbildung 12: Vicat-Nadel-Versuch

Im Nachgang wurden Probekörper aus der Referenzrezeptur sowie der Rezeptur mit beiden Beschleunigern hergestellt und einem Biegezugversuch unterzogen. Die Festigkeitswerte der optimierten Probekörper und die des Referenzkörpers waren auf dem gleichen Niveau.

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, eine Zementleimrezeptur für die Selective Cement Paste Intrusion auf eine verkürzte Erstarrungszeit hin zu optimieren, um die Herstellungskosten für additiv hergestellte Betonelemente zu senken. Die Schwierigkeit darin lag, die Verarbeitbarkeit des Zementleims dabei konstant zu halten. Eine Optimierung der Erstarrungszeit durfte nicht mit

einer Verschlechterung des Ausbreitfließmaßes einhergehen.

Mit den eingesetzten Zusatzmitteln konnte der Referenzleim optimiert werden. Den größten Erfolg erzielte man mit einer Kombination aus Wasser, Zement, Fließmittel, Betonverflüssiger, Erhärtungsbeschleuniger aus C-S-H Kristallen und einem Calciumnitrat-Beschleuniger. Mit dieser Rezeptur erstarrte der Zementleim innerhalb von acht Stunden, was einer Zeitersparnis von fünf Stunden, respektive 42 % gegenüber dem Referenzleim bedeutet.

Versuche mit einem höheren Anteil der Beschleuniger konnten noch schneller erstarren. Dabei konnte aber die Verarbeitbarkeit nicht über 180 Minuten aufrechterhalten werden. Solche Rezepturen können entweder bei kleinen Bauteilen mit kürzeren Druckzeiten oder verbesserten 3D Druckern, welche durch den Einsatz mehrerer Druckerdüsen die Bauteilproduktion beschleunigen, angewandt werden.

Vorstellbar ist eine Realisierung einer Produktion von zwei Bauelementen an einem Arbeitstag mithilfe des optimierten Zementleims und eines Zweischichtbetriebs auf der Baustelle. Die erste Schicht startet die Produktion des ersten Bauelements, die Arbeiter der zweiten Arbeitsschicht entnehmen das erste Bauelement und starten die Produktion des zweiten Bauelements, welches über Nacht computergestützt und vollautomatisiert gefertigt wird. Die Arbeiter der ersten Arbeitsschicht können diese zu Beginn ihrer Schicht am nächsten Tag aus der Fertigung entnehmen und der Prozess kann wiederholt werden. Dieses Modell ist mit der Rezeptur des Referenzleims nicht umsetzbar, da die Erstarrung des Referenzleims über 13 Stunden benötigt.

Literaturverzeichnis

- [1] Weger, D. / Gehlen, C. / Lowke, D. (2018): Additive Fertigung von Betonbauteilen durch selektive Zementleim-Intrusion. In Tagungsband ibausil 2018. Weimar, Deutschland: Bauhaus-Universität Weimar
- [2] DIN EN 196-3:2017-03, Prüfverfahren für Zement – Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit; Deutsche Fassung (EN 196-3:2016)

Autor

Alexander Straßer

Studium

Seit 04/18	Bauingenieurwesen, M.Sc. / Technische Universität München
10/13 – 03/18	Bauingenieurwesen, B.Sc. / Technische Universität München
10/12 – 09/13	Management and Technology, B.Sc. / Technische Universität München

Berufstätigkeiten

Seit 12/17	Studentische Hilfskraft (Forschung mit Werkstoffen und 3D Druck) Centrum Baustoffe und Materialprüfung (Technische Universität München)
Seit 06/16	Forschungsarbeit auf dem Gebiet Wasserhygiene und Entwicklung eines Bauteils zur Bekämpfung von Legionellen UnternehmerTUM GmbH / MakerSpace GmbH

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 Professor Dr.-Ing. Christoph Gehlen,
Betreuer der Bachelorarbeit: Herr Daniel Weger, M.Sc.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

VERWENDUNG VON REZYKLIERTEM BRECHSAND FÜR DIE HERSTELLUNG VON MÖRTEL UND BETON

Masterarbeit

Maximilian, Walterscheid

Der jährliche Verbrauch des bayerischen Baugewerbes von rund 135 Mio. Tonnen mineralischer Baustoffe, vorwiegend für die Herstellung von Mörtel und Beton, kann nur schwer mit dem Gedanken des nachhaltigen Bauens vereint werden. Der Grundgedanke dieser Arbeit ist es, den Baustoff Beton ein Stück weit mehr zu einem kreislaufgerechten Baustoff zu machen um somit die Themen Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft mehr in der Philosophie der bayerischen Baubranche zu verankern. Im Zuge dieser Arbeit wurden die Eigenschaften von rezykliertem Brechsand (RC-Mix 0/8 mm mit 10 M.-% Ziegelanteil), welcher von einem bayerischen Abbruchunternehmen zu Verfügung gestellt wurde, und speziell dessen Auswirkungen auf die Eigenschaften von Mörtel und Beton untersucht. Das Hauptaugenmerk wurde hierbei auf die Frischbetoneigenschaften, die Biegezug- und Druckfestigkeit und das Schwindverhalten gelegt. Zusätzlich wurden zwei Aufbereitungsmethoden, die thermische Aufbereitung und das Mahlen des Materials untersucht, mit welchen die Eigenschaften des rezyklierten Brechsandes verbessert werden sollten. Die Untersuchungen zeigten, dass es durch den Einsatz des rezyklierten Brechsandes zu einer Verringerung der Festigkeit und gleichzeitig zu stärkeren Schwinderscheinungen kam. Durch den Einsatz des aufbereiteten Materials konnte die Festigkeit jedoch signifikant erhöht werden.

Keywords: Nachhaltigkeit, Kreislaufwirtschaft, rezyklierter Brechsand, Druckfestigkeit, Schwindverhalten

Kreislaufgerechter Baustoff Beton

In Bayern werden jährlich ca. 150 Mio. Tonnen Rohstoffe verbraucht. Hierbei handelt es sich bei rund 90% (135 Mio. Tonnen) um mineralische Rohstoffe, welche vom bayerischen Baugewerbe umgesetzt werden. Diese 135 Mio. Tonnen teilen sich auf in ca. 85 Mio. Tonnen Sand und Kies und

ca. 35 Mio. Tonnen Naturstein. Vorwiegend werden diese Materialien für die Herstellung von Mörtel und vor allem Beton genutzt. Somit ist die Baubranche in Bayern eine der Branchen mit dem höchsten Ressourcenverbrauch. Zusätzlich zu dem hohen Verbrauch endlicher Rohstoffe, wächst die Menge an Bauabfällen stetig. Im Jahr 2014 lag die Menge an Bau- und Abbruchabfällen

in Bayern bei rund 46 Mio. Tonnen. Davon waren 9,6 Mio. Tonnen reiner Bauschutt.

Zielsetzung und Vorgehensweise

Um die Themen Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft mehr in der Philosophie der bayerischen Baubranche zu verankern, müssen neue Wege gefunden werden, um den Verbrauch von natürlichen Rohstoffen zu verringern und gleichzeitig die Verwendung von rezyklierten Materialien zu steigern. Somit kann sowohl der Klimaschutz als auch der Umweltschutz nachhaltig gefördert werden. Der Grundgedanke dieser Arbeit ist es, den Baustoff Beton ein Stück weit mehr zu einem kreislaufgerechten Baustoff zu machen. Dadurch sollen die Abfälle aus Betonbruch auf einem hohen Niveau verwertet werden und zukünftig nicht nur als Füllmaterial sondern für die Herstellung von RC-Beton verwendet werden. Bei RC-Beton handelt es sich um einen hochwertigen Beton, der ausschließlich oder zu einem bestimmten Anteil mit rezyklierter Gesteinskörnung hergestellt wird. Hierbei ist der Einsatz von rezykliertem Brechsand mit einer Korngröße von 0 bis 2,0 mm zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht geregelt. Somit muss diese Kornfraktion weiterhin mit natürlichem Sand bedient werden.

Um den Einfluss von rezykliertem Brechsand auf die Eigenschaften von Mörtel und Beton zu untersuchen wurden im Zuge dieser Arbeit Laborversuche durchgeführt. Zusätzlich wurde das Ziel verfolgt, eine Möglichkeit zu finden den in diesen Untersuchungen verwendeten rezyklierten Brechsand mit verschiedenen Methoden aufzubereiten, um die Eigenschaften dieses Materials zu verbessern. Somit soll der Einsatz von rezykliertem Brechsand zukünftig ermöglicht werden. Bei dem hier untersuchten rezyklierten Brechsand handelt es sich um Bauschutt mit einer Korngröße 0/8 mm und einem Ziegelanteil von 10,0 M.-%. Das Material wurde von der Firma

Ettengruber bereitgestellt. Vorab wurden alle umweltrelevanten Parameter untersucht und das Material wurde aus wasserwirtschaftlicher Sicht als RW1-Material eingestuft.

Beton mit rezykliertem Brechsand - Stand der Kenntnisse

Es stellte sich heraus, dass die in der Literatur dargestellten Ergebnisse zu Untersuchungen von Beton mit rezykliertem Brechsand und dessen Eigenschaften nicht vereinheitlicht werden konnten, da die Schwankungen der Materialparameter zu groß und somit größtenteils nicht vergleichbar waren. Alle aus der Literatur hervorgehenden Ergebnisse zeigen jedoch, dass die Frischbetoneigenschaften, die mechanischen Eigenschaften wie z.B. die Druckfestigkeit und die Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton durch den Einsatz von rezykliertem Brechsand verschlechtert wurden. So hat ein RC-Beton mit rezykliertem Brechsand laut [01] beispielsweise eine um ca. 25 % niedrigere Druckfestigkeit als ein vergleichbarer Referenzbeton mit natürlicher Gesteinskörnung und ist schlechter zu verarbeiten.

Allerdings wurde in der Literatur [02] auch eine Steigerung der Biegezug- bzw. Druckfestigkeit des Betons beschrieben, wenn der rezyklierte Brechsand vor dem Einbau bei hoher Temperatur gebrannt wurde. Auch der Einsatz von gemahlenem rezyklierten Brechsand als Zusatzstoff führte laut [03] zu besseren Ergebnissen als der Einsatz von unbehandeltem rezyklierten Brechsand. Somit konnte aus den in verschiedenen Literaturquellen beschriebenen Ergebnissen abgeleitet werden, dass die genannten Frisch- und Festbetoneigenschaften sich zwar i.d.R. verschlechtern, jedoch eine Aufbereitung des rezyklierten Brechsandes durchaus möglich ist und wiederum zu einer Verbesserung der Eigenschaften führt.

Herstellung von Beton mit rezykliertem Brechsand

Abgeleitet aus der Literaturrecherche wurde ein Versuchsprogramm erstellt, um die Auswirkungen des hier verwendeten rezyklierten Brechsandes auf die Eigenschaften von Mörtel und Beton untersuchen zu können. Auch grundlegende Eigenschaften des rezyklierten Brechsandes, wie die Kornrohddichte und die Wasseraufnahme wurden untersucht und mit natürlichem Kalksand verglichen. Zusätzlich wurden zwei Methoden festgelegt, mit welchen der rezyklierte Brechsand aufbereitet werden sollte. Hierbei handelte es sich zum einen um die thermische Aufbereitung durch die Beaufschlagung von Temperatur im Glühofen. Die zweite Aufbereitungsmethode, welche untersucht wurde, war das Mahlen des rezyklierten Brechsandes. Mit diesem gemahlene Material wurde anschließend analog zu z.B. Flugasche, ein Teil des herkömmlichen Bindemittels Zement ersetzt. Im ersten Schritt wurden Probekörper aus Mörtel erstellt um die Wirksamkeit der Aufbereitungsmethoden zu untersuchen. Um eine möglichst große Bandbreite an Untersuchungsergebnissen zu erhalten, wurden verschiedene Rezepturen mit unbehandeltem und aufbereitetem rezyklierten Brechsand erstellt, welche der Herstellung von Probekörpern zugrunde gelegt wurden. Hierbei wurde der rezyklierte Brechsand unbehandelt, gebrannt und gemahlen als Zusatzstoff verwendet. An den daraus hergestellten Probekörpern wurde anschließend die Biegezug- und Druckfestigkeit untersucht. Im zweiten Schritt wurden anhand der gewonnenen Ergebnisse die vielversprechendsten ausgewählt, um Rezepte für die Herstellung von Betonprobekörpern daraus abzuleiten. An diesen Betonprobekörpern wurde die Druckfestigkeit, das autogene Schwinden und das Trocknungsschwinden untersucht. Zuvor wurden die Frischbetonprüfungen Ausbreitmaß und Luftgehalt durchgeführt

Untersuchungsergebnisse

Die Ergebnisse wurden in Relation zu den Ergebnissen eines Referenzbetons gestellt, um daraus den Einfluss des rezyklierten Brechsandes auf die festgelegten Eigenschaften abzuleiten. Die Ergebnisse der Untersuchungen des unbehandelten gelieferten rezyklierten Brechsandes zeigten, dass sich dessen Eigenschaften, entsprechend der Literatur, stark von den Eigenschaften des natürlichen Kalksandes unterscheiden. So wies der rezyklierte Brechsand eine deutliche niedrigere Kornrohddichte und eine weitaus höhere Wasseraufnahme auf. Die Ursache ist vor allem in der erhöhten Porigkeit des Materials, welche durch den großen Anteil an altem Zementstein verursacht wird, zu suchen. Besonders die erhöhte Wasseraufnahme des rezyklierten Materials war ausschlaggebend für die Frischbetoneigenschaften und musste bei der Herstellung des Mörtels bzw. des Betons in Form von zusätzlichem Saugwasser berücksichtigt werden. Jedoch erwies es sich aufgrund der schwankenden Materialeigenschaften des rezyklierten Brechsandes als schwierig eine einheitliche Saugwasserzugabe zu bestimmen. Daraus resultierte, dass das Saugwasser zeitlich früher und das Zugabewasser während des Herstellungsprozesses nach Augenmaß dosiert wurde. Mit dieser Methode konnte letzten Endes eine einheitliche Konsistenz des Frischbetons erreicht werden.

Bei der Untersuchung der Festigkeiten ergab sich eine deutliche Verringerung der Festigkeitswerte durch den Einsatz des rezyklierten Brechsandes. Das nachfolgende Diagramm zeigt den Mittelwert der Biegezugfestigkeit aller Mörtelprobekörper.

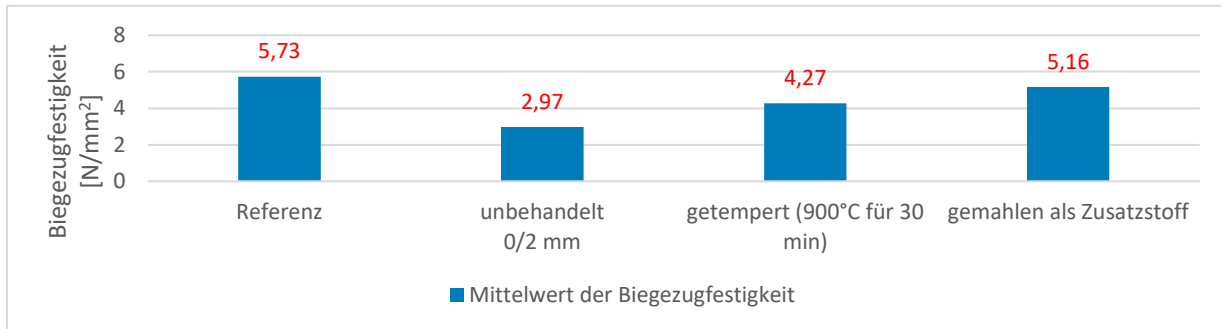


Abbildung 13 Mittelwert der Biegezugfestigkeit aller Mörtelprobekörper
 Diese Ergebnisse decken sich mit den in der Literatur getroffenen Aussagen zu der Entwicklung von Biegezug- bzw. Druckfestigkeit, wobei die Festigkeitsverluste hier bei ca. 30% lagen [01]. Auch die Druckfestigkeit der Mörtelprobekörper nach 28 Tagen Trocknungszeit verringerte sich in diesem Fall um rund 68 % auf 18,28 N/mm² im Mittel. Der Mittelwert der Druckfestigkeit des Referenzbetons lag nach 28 Tagen Trocknungszeit bei 47,59 N/mm². Auch hier ergab sich eine Minderung der Druckfestigkeit um ca. 57 % auf 20,45 N/mm² wenn der rezyklierte Brechsand in unbehauelter Form verwendet wurde.

erzielt. Grundsätzlich war jedoch die Festigkeit der Probekörper mit thermisch behandeltem rezyklierten Brechsand noch geringer als die der Referenzprobekörper.

Auch die Durchführung der zweiten Aufbereitungsmethode, dem Mahlen des rezyklierten Brechsandes, zeigte Erfolge.

Durch das Ersetzen von 30% des Zementes

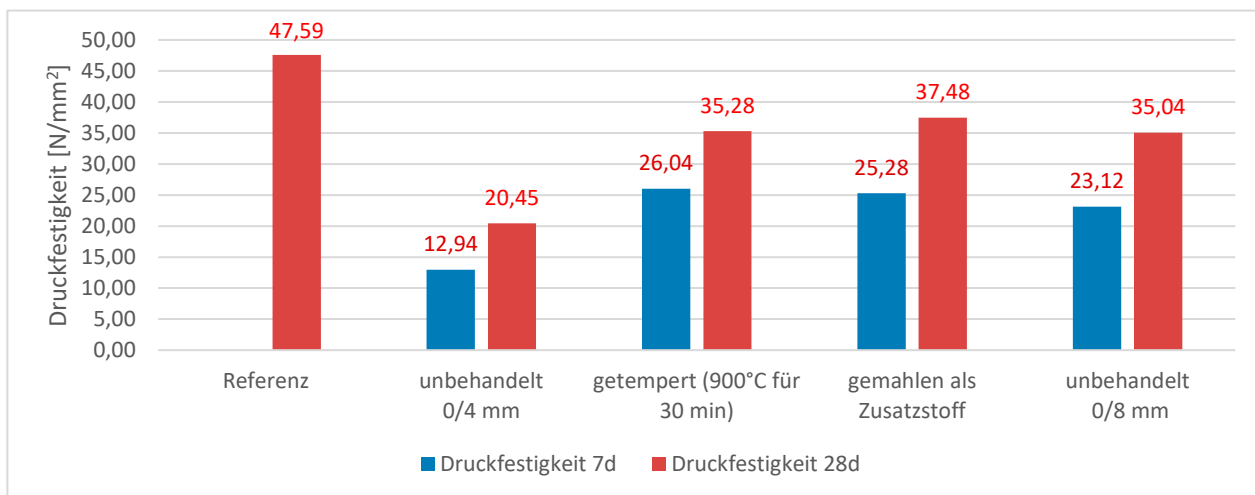


Abbildung 14 Mittelwert der Druckfestigkeit aller Betonprobekörper
 Bei den Betonprobekörpern mit thermisch behandeltem rezyklierten Brechsand erhöhte sich die Druckfestigkeit um bis zu 42%. Diese Verbesserung der Festigkeit wurden mit einem rezyklierten Brechsand, welcher bei 900°C für 30 Minuten gebrannt wurde, erzielt. Bei niedrigeren Temperaturen bzw. bei kürzeren Brenndauern wurden keine vergleichbar guten Ergebnisse

durch gemahlten rezyklierten Brechsand konnte die Druckfestigkeit der Probekörper gesteigert werden und lag somit über den Werten der Probekörper mit unbehauetem rezyklierten Brechsand.

Hinsichtlich der im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zum Schwindverhalten des Betons mit rezykliertem

Brechsand, zeigen die Ergebnisse, dass die Schwinderscheinungen der Probekörper mit rezykliertem Brechsand als Gesteinskörnung deutlich ausgeprägter sind als bei den Probekörpern mit gemahlenem rezykliertem Brechsand, bei welchem ausschließlich natürliche Gesteinskörnung verwendet und der rezyklierte Brechsand als Zusatzstoff hinzugegeben wurde. Dieses Ergebnis zeigt, dass der rezyklierte Brechsand aufgrund seiner Zusammensetzung und auch seiner Eigenschaften stärkere Schwinddehnungen verursacht. Die Schwinddehnung des Betons mit natürlicher Gesteinskörnung liegt nach ca. 80 Tagen bei $0,16 \mu\text{m}$. Somit liegt die Schwinddehnung des

Betons mit rezykliertem Brechsand mit ca. $0,33 \mu\text{m}$ rund 51 % darüber.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass sich der Einsatz von rezykliertem Brechsand für die Herstellung von Mörtel bzw. Beton durchaus eignet. Unter der Berücksichtigung der Eigenheiten des rezyklierten Brechsandes und der durch das RC-Material ausgelösten Schwankungen kann ein RC-Beton mit guter Qualität hergestellt werden. Besonders die hier untersuchten Aufbereitungsmethoden sind hinsichtlich ihrer Wirksamkeit sehr vielversprechend.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Hoffmann, Cathleen, & Jacobs, Frank (2007): Recyclingbeton aus Beton- und Mischgranulat, Sachstandbericht, EMPA Dübendorf, TFB Wildegg
- [2]: Müller, Christoph & Dora, Bernd (2000): Verwertung von Brechsand aus Bauschutt, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 506, Beuth Verlag GmbH
- [3]: Kerkhoff, Beatrix, & Siebel, Eberhard (2009): Einfluss von rezyklirtem Zuschlag aus Betonbruch auf die Eigenschaften, insbesondere die Dauerhaftigkeit von Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 514, Beuth Verlag GmbH

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Nobis, Christina, & Vollpracht, Anya (2015): Verwendung von Recyclingmaterial in der Betonproduktion – Sachstand, Forschungsbericht F 7099, Institut für Bauforschung Aachen
2. Kerkhoff, Beatrix & Grube, Horst (2003): Eigenschaften von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen, Betontechnische Berichte, vdz

Autor

Walterscheid Maximilian

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt im Fachbereich Baustoffkunde / Betontechnologie an der Hochschule für angewandte Wissenschaften in München, Fakultät 02 Bauingenieurwesen, Betreuerin: Prof. Dr.-Ing. Andrea Kustermann.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

MODELBASIERTE PLANUNG MASSENERMITTLUNG UND AUSSCHREIBUNG IM ENTWÄSSERUNGSBEREICH MIT NUTZUNG DES iTWO CIVIL INFRASTRUKTURMODULS. MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN ANHAND EINES FIKTIVEN AUTOBAHNPROJEKTES

Masterarbeit

Katharina, Wild

Die Masterarbeit setzt sich mit der Einführung des Building Information Modeling (kurz BIM) im Bereich der Infrastrukturplanung auseinander. Zur Umsetzung dieser neuen Arbeitsweise wurde hierzu das iTWO civil Infrastrukturmodul verwendet um eine modelbasierte Planung, Massenermittlung und Ausschreibung anhand eines fiktiven Autobahnprojektes durchzuführen. Ziel der Arbeit war es letztlich die Möglichkeiten und Grenzen dieses Moduls zu testen. Aus den Ergebnissen wurden schließlich noch Rückschlüsse auf die baupraktische Relevanz der BIM-Methode im Infrastrukturbereich unter Nutzung des iTWO civil Infrastrukturmoduls gezogen.

Motivation und Aufgabenstellung

Die letzten Jahre haben gezeigt, dass sich die Anforderungen an Bauvorhaben stark verändert haben. Eine frühzeitige Fehleranalyse, zentrale Datenverwaltung, erhöhte Effizienz und Qualität sind neben einer erhöhten Planungssicherheit nur einige wenige exemplarische Schlagwörter die mittlerweile verstärkt in den Fokus rücken.

Dabei ist von diesem Wandel aber nicht nur die Planungsphase betroffen, sondern der gesamte Lebenszyklus eines Bauwerks und damit auch alle Fachgebiete und Gewerke die darin involviert sind.

Für diese Entwicklung liegt der Lösungsansatz der Baubranche im sogenannten „Building Information Modeling“, kurz BIM. Diese Methode wird bis dato bereits verstärkt im Hochbau eingesetzt, findet aber mittlerweile auch Einzug im Bereich des Tiefbaus.

Zur Umsetzung der BIM Arbeitsweise entwickelten zwischenzeitlich diverse Softwarehersteller verschiedene Tools und Aufsatzprogramme. Die Masterarbeit beschäftigt sich dabei ausschließlich mit dem iTWO civil Infrastrukturmodul des Softwareherstellers RIB.

Aus den vorab genannten Gegebenheiten ergibt sich als Zielsetzung dieser Arbeit die Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der BIM-Methode mittels iTWO civil Infrastrukturmodul, anhand eines fiktiven Autobahnprojektes. Dabei soll neben der modellbasierten Planung auch auf die Massenermittlung und die Ausschreibung in iTWO näher eingegangen werden.

Konkret soll in ein bereits bestehendes Autobahnprojekt die Entwässerung mittels Rohrgraben eingepflegt werden und anschließend, um die Flexibilität des Programmes und die Möglichkeiten der Effizienzsteigerung auszutesten, der Aufbau bzw. die Gestaltung des Grabens variiert werden.

Die Datengrundlage wurde dabei vom Ingenieurbüro Sehlhoff GmbH zur Verfügung gestellt.

Die Arbeit gliedert sich dabei in folgende wesentliche Schritte:

- Modellierung von Leitungsgräben als Volumenkörper
- Zuweisung von Attributen
- Berücksichtigung von Bodenschichten entsprechend der Systematik der Homogenbereiche
- Datenexport und Verknüpfung mit LV Positionen
- Vergleich der konventionellen mit der BIM-Methode
- Vorschlag eines Workflows zur Umsetzung der BIM-Arbeitsweise

Ergebnisse

Nachdem während der Bearbeitung der Masterarbeit die konventionelle und die BIM Arbeitsweise intensiv betrachtet und miteinander verglichen wurden, soll abschließend noch das Fazit in Hinblick auf die Möglichkeiten und Grenzen der Arbeit mit dem Infrastrukturmodul erfolgen.

Allen voran ist es bei der BIM-Methodik grundsätzlich erforderlich ein vollständiges Modell erstellen zu können. Dies ist derzeit nur bedingt möglich, da beispielsweise Sonderbauweisen wie die Huckepackleitung momentan noch nicht umgesetzt werden können.

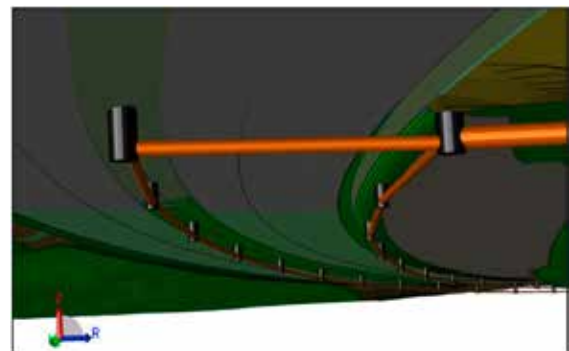


Abb. 1: 3D-Ansicht der Sammelleitungen

Abbildung 1 zeigt die Umsetzung der Sammelleitungen in der 3D Ansicht, die Sickerleitung der Huckepackleitung konnte an dieser Stelle nicht modelliert werden.

Gleiches gilt für das Einpflegen von Bodenschichten. Derzeit können selbige gut in den Lageplan integriert werden. Dies veranschaulicht die nachfolgende Grafik (Abb. 2).

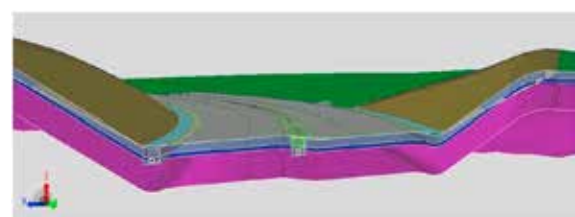


Abb. 2: 3D-Schnitt durch Fahrbahn und Bodenschichten

Allerdings ist die Übertragung in das Querprofilprojekt eines Kanalstrangs nur über Umwege und nicht vollständig möglich. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Berechnung der Massen. Durch diese Problematik ist letztlich kein konstanter Datenfluss möglich.

An dieser Stelle soll auch die Problematik rund um die Trassenkörper noch erwähnt werden. Das Problem dabei ist, dass diese teilweise nicht vollständig erzeugt werden und die dadurch entstehenden Lücken Auswirkungen auf die Berechnung der Massen haben. Da die Trassenkörper aber gemäß RIB Entwicklungsabteilung vermutlich nie mit absoluter Sicherheit vollständig erzeugt werden können, ist auch an dieser Stelle dem Nutzer eine Grenze gesetzt.

Es empfiehlt sich deshalb auch weiterhin die Mengenermittlung zusätzlich über konventionelle Excellisten zu erstellen, zumindest um diese zur Kontrolle der automatisch vom Programm errechneten Mengen zu nutzen.

Abbildung 3 soll die Problematik nochmals verdeutlichen und zeigt Auszüge aus dem Lageplan und der 3D-Ansicht.

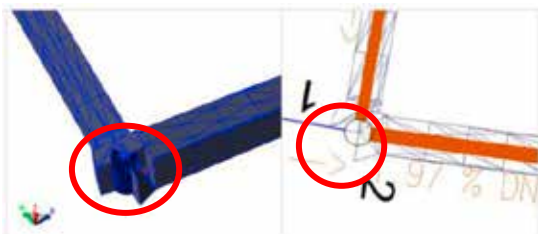


Abb. 3: Lückenhafter Trassenkörper in 3D (links) und im Lageplan (rechts)

Der nächste Punkt gilt den Planänderungen, speziell den Änderungen am Schachtdurchmesser. Durch einen Aktualisierungsfehler wird durch eine solche Anpassung ein erheblicher Mehraufwand verursacht. Dieser Aufwand entspricht letztlich dem einer Neuplanung, da derzeit dem Nutzer Grenzen in der

durchgängigen Nutzung gesetzt sind. Hier besteht in jedem Fall Überarbeitungsbedarf durch den Softwarehersteller.

Als nächstes soll auch noch die Transparenz und Nutzerfreundlichkeit der Anwendung angeführt werden. In der Praxis ist es häufig der Fall, dass ein Projekt nicht von Anfang bis Ende von der gleichen Person bearbeitet wird. Geht man davon aus dass die Planungsphase von einer Person durchgeführt wird und die Ausschreibung von einer weiteren, endet die Arbeit der ersten Person mit der Erstellung der sogenannten .cpixml-Datei. Der Ausschreiber übergibt diese dann anschließend an die Ausschreibungssoftware iTWO. Dies ist vor allem schwierig, wenn das Modell nicht vollständig ist, weil beispielsweise die Sickerleitung der Huckepackleitung nicht hinterlegt werden konnte. Dies führt wieder zu vielen Nachfragen und wirkt sich deshalb negativ auf den Workflow aus. Gleiches gilt wenn Planungsdaten an die Baufirma übergeben werden sollen, so bleiben auch hier Nachfragen nicht aus. Aus diesen Gründen wäre es anzuraten den gesamten Prozess transparenter und somit auch nutzerfreundlicher zu gestalten.

Die oben genannten Grenzen wurden zwischenzeitlich alle der RIB Entwicklungsabteilung gemeldet. Ebenso sind bereits erste Überlegungen für Lösungsansätze getätigt worden und sollen langfristig auch umgesetzt werden. Sind diese Probleme erst behoben steigen damit auch die Transparenz und Planungsqualität. Wobei an dieser Stelle erwähnt werden soll, dass die Arbeit durch das Infrastrukturmodul bereits jetzt schon positive Auswirkungen auf die Planungsqualität hat. Gerade für das Erstellen von Lageplänen und Längsschnitten ist die

Art zu Arbeiten und die Qualität hier bereits vorteilhafter gegenüber der konventionellen Methode.

Auch können durch die Umsetzung der BIM-Methode Kollisionen mit z.B. Leitungen oder Bauwerken frühzeitig aufgedeckt werden. Diese Überprüfung ist durch die 3D-Ansicht schnell und unkompliziert zu realisieren. Dies stellt wieder einen großen Vorteil gegenüber konventionellen 2D Zeichnungen dar.

Ebenso können durch die notwendige frühe Absprache mit anderen Projektbeteiligten, wie dem Abrechner oder eventuell auch schon dem Bauleiter, Fehler bezüglich Bauweisen oder Materialien früh erkannt und behoben werden.

Des Weiteren liegen die Stärken des Infrastrukturmoduls auch in der langfristigen Nutzung des erzeugten Modells. Das vorab erzeugte BIM-Modell kann im weiteren Verlauf zum Beispiel noch an die ausführende Firma übergeben werden, damit diese die erforderlichen Arbeiten, die notwendigen Materialien und den Personaleinsatz planen kann. Ebenso ist eine Terminplanung basierend auf den Modelldaten möglich und letztlich kann auch die Abrechnung erleichtert werden.

Für den Bauherrn besteht ebenfalls die Möglichkeit das Modell weiterhin zu nutzen um beispielsweise Inspektionen zu planen, Schäden zu kartieren oder auch Sanierungsmaßnahmen vorzubereiten.

Fazit

Abschließend lässt sich festhalten, dass durch die konsequente Umsetzung der BIM Methode ein deutlich erhöhter Mehraufwand zu Beginn der Projektarbeit, bzw. während der Planungsphase, entsteht. Dieser Aufwand resultiert aus der aufwendigen Modellierung. Dieser bringt aber letztlich doch auch einen großen Mehrwert mit sich, da das zu Beginn erzeugte Modell tatsächlich über den gesamten Bauwerkslebenszyklus genutzt werden kann.

Zwar sind aktuell noch nicht alle Funktionen optimal einsetzbar, da aber speziell das Infrastrukturmodul noch nicht sehr lange auf dem Markt erhältlich ist, ist dies auch nicht weiter verwunderlich. Werden die vorab beschriebenen Softwareprobleme behoben und die Funktionen weiterentwickelt, hat dieses Modul aber durchaus eine praxisrelevante Zukunft und kann für die Umsetzung der BIM-Methode genutzt werden.

Insgesamt konnte durch die Arbeit ein weiterer Schritt zur Implementierung der BIM Arbeitsweise im Tiefbau geleistet werden, der langfristig Planern, den Bauausführenden und den Bauherren Vorteile bietet.

Literaturverzeichnis:

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Beetz, Jacob; Borrmann, André; Koch, Christian; König, Markus (2015): Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden: Springer Fachmedien (VDI-Buch).
2. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015): Stufenplan Digitales Planen und Bauen. Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 05.04.2018.

Angaben zum Verfasser:

Katharina Wild

2008-2011	Ausbildung Bauzeichner (Coplan AG)
2011-2013	BOS Schwandorf
2013-2017	OTH Regensburg Bachelorstudium
2017-2018	OTH Regensburg Masterstudium
Seit 2019	Sehlhoff GmbH

Angaben zur Betreuung:

Die Arbeit wurde angefertigt an der OTH Regensburg mit Herrn Prof. Dipl.-Ing. Appelt als Betreuer seitens der Hochschule. Die Arbeit wurde außerdem extern durch die Sehlhoff GmbH, vertreten durch Herrn Geißer, betreut.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNGEN ZUM KRIECHVERHALTEN VON PVB-ZWISCHENSCHICHTFOLIE UNTER TEMPERATUR UND FEUCHTIGKEITSEINWIRKUNG

Bachelorarbeit

Klaus Wilhelm

Der Einsatz von Verglasungen mit einer Anforderung an eine Resttragfähigkeit im gebrochenen Zustand ist bislang nur unter Berücksichtigung aufwendiger Großbauteilversuche möglich. Die Entwicklung eines Bemessungskonzepts für gebrochenes Verbundglas ist Gegenstand aktueller Forschung im konstruktiven Glasbau, auch um eine Anwendung von anspruchsvollen Konstruktionen für kleine Firmen des Baugewerbes zu ermöglichen. Hierfür sind Materialmodelle der verschiedenen Komponenten (Glas und polymere Zwischenschicht) notwendig. Da im gebrochenen Zustand Feuchtigkeit über die Risse im Glas an die Zwischenschicht gelangen kann, sind Untersuchungen zum mechanischen Verhalten der Zwischenschicht bei verschiedenen Luftfeuchten notwendig. Um erste systematisch erfasste Kenngrößen für das Materialverhalten der gebräuchlichsten polymeren Zwischenschicht im Glasbau, Polyvinylbutyral (PVB), zu erhalten, wurde zunächst ein Versuchsstand für die Durchführung von Kriechversuchen bei unterschiedlichen Lastniveaus, Luftfeuchten und Temperaturen entwickelt. Anschließend wurden Versuche durchgeführt, die mit Hilfe der digitalen Bildkorrelation ausgewertet wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Folienfeuchte und Temperatur die Steifigkeit der Folie massiv absinkt. Auf Grundlage der gewonnenen Daten können Materialmodelle entwickelt werden, die den Einfluss der Feuchtigkeit auf das Tragverhalten von gebrochenem Glas berücksichtigen.

Keywords: Verbundsicherheitsglas, Resttragfähigkeit, PVB-Folie, Feuchtigkeit, Kriechversuche

Einleitung

Neue Bauwerke enthalten immer öfter Elemente aus Glas. Gründe dafür sind unter anderem offene, lichtdurchflutete und ansprechende Räume. Das dabei eingesetzte Glas muss

teilweise besonderen Anforderungen gerecht werden. Je nach Einsatzbereich ist es erforderlich, eine Resttragfähigkeit nach einem Glasbruch sicherzustellen. Dafür wird vor allem Verbundsicherheitsglas (VSG) verwendet. Dieses besteht aus mehreren Gläsern mit

dazwischenliegenden Folien aus Polymeren. Nach aktueller Normenlage sind aufwendige Großbauteilversuche zum Nachweis der Resttragfähigkeit nötig [1]. Im intakten Zustand ist die Zwischenschicht vor äußeren Einflüssen, wie zum Beispiel Feuchtigkeit, geschützt. Im gebrochenen Zustand kann die Feuchtigkeit über die Risse im Glas an die Zwischenschicht gelangen. Darüber hinaus kann es im gebrochenen Zustand zu großen Verformungen kommen, die den Ansatz eines linearen Materialverhaltens nicht mehr rechtfertigen. Abbildung 1 zeigt den gebrochenen Zustand des Glases.



Abb. 1: freiliegende Glaszwischenschichtfolie bei gebrochenem VSG

Systematische Untersuchungen zur Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Zwischenschichtfolie sind bisher kaum vorhanden. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Daten können genutzt werden, um ein Materialmodell für die Zwischenschicht zu entwickeln, welches die Folienfeuchte berücksichtigt und in einem Bemessungsmodell für gebrochenes Glas angesetzt werden kann. Da in der aktuellen Normung ein solches Modell noch nicht existiert und die Industrie und das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) ein solches Modell fordern, sind die ermittelten Daten ein wesentlicher Baustein für die Entwicklung dieses Bemessungsmodells.

Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit befasst sich zuerst grundlegend mit Polymeren. Dazu werden die mechanischen Hintergründe, welche für das Verständnis der später durchgeführten Versuche vonnöten sind, erläutert. Die Arbeit gibt einen

Überblick über Zwischenschichtfolie aus Polyvinylbutyral (PVB).

Den Kernaspekt der Arbeit bildet die Erstellung eines Versuchskonzeptes inklusive der Entwicklung eines Versuchsapparates zur Durchführung von Kriechversuchen an PVB-Folie. Dazu gehört auch die Ermittlung einer geeigneten Aufzeichnungs- und Messmethodik. Abschließend werden die Messergebnisse ausgewertet und Aussagen zur Abhängigkeit des Kriechverhaltens bei verschiedenen Temperaturen und Luftfeuchten abgeleitet.

Polyvinylbutyral (PVB)

Der Markt der Zwischenschichtpolymere wird zu 90 % von PVB dominiert [2]. Es ist bekannt, dass sich PVB aufgrund seiner polaren Alkoholgruppen hygroskop verhält. Während der Wasseraufnahme werden Wassermoleküle in bestehenden Leerstellen im Molekülgitter eingelagert, bis ein Gleichgewicht erreicht wird. Wie Abbildung 2 zeigt, ist die Aufnahmegeschwindigkeit abhängig von der Umgebungfeuchtigkeit. Diese bestimmt auch die Höhe der Ausgleichsfeuchte. Dadurch verändern sich die mechanischen Eigenschaften des Polymers und dessen Haftung an der Glasoberfläche.

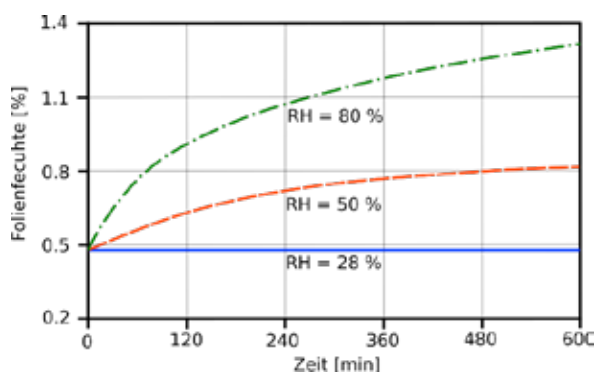


Abb. 2: Folienfeuchte von PVB in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte (RH) und der Zeit (nach [3])

Das mechanische Verhalten von PVB kann allgemein mit viskoelastischen Materialmodellen beschrieben werden. Die Steifigkeit ist somit

abhängig von Temperatur und Lastdauer. Im intakten Zustand der Verglasung treten in der Folie nur geringe Dehnungen, kleiner 1 % auf. Diese können mit linear viskoelastischen Materialmodellen beschrieben werden [4]. Hierzu existieren bereits vollständige Modellparameter für den gesamten baurelevanten Temperaturbereich und entsprechende Lastdauern [2]. Für hohe Dehnungen und variierende Luftfeuchten fehlen bislang Versuchsdaten zur Entwicklung solcher Modelle.

Probekörper

Die getesteten Folien stammen vom Hersteller *Kuraray*. Es handelt sich um Folien der Art *Trosifo® BG R15* mit einer Nenndicke von 0,76 mm, welche seit dem 1. Oktober 2017 unter dem Namen *Trosifo® Clear B100 MR* vertrieben werden. Vor der Versuchsdurchführung wird vom Hersteller ein Laminationsprozess simuliert und die Folien entschrumpft. Die kleinformatischen Probekörper mit einem verjüngten Bereich von 12 mm stellen eine Alternative zu Versuchen am gesamten Bauteil dar.

Kriechversuche

Kriechversuche dienen zur Ermittlung des Verformungsverhaltens von Werkstoffen bei gleichbleibender Belastung und Umgebungsbedingungen. Bei gebrochener Verglasung muss eine definierte Last über eine festgelegte Dauer abgetragen werden. Kriechversuche kommen diesem Nachweis am nächsten. Zu den üblichen Verfahren in der Materialforschung zur Ermittlung von Dehnungseigenschaften gehören unter anderem der Dehnungsmessstreifen (DMS), Messungen mittels Extensometer und Lasermessungen. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche sind diese Messverfahren jedoch nicht geeignet, da große Verzerrungen berührungslos gemessen werden sollen. Die Wahl fällt daher auf die digitale Bildkorrelation. Dieses, im Englischen als Digital Image Correlation (DIC) bezeichnete Verfahren,

ist in der Lage hohe Dehnungen berührungslos zu messen. Dazu wird auf den Probekörper ein schwarz/weißes Muster aufgebracht. Dieses ist in der Regel punktförmig und wird im Referenzzustand, sowie in den deformierten Zuständen aufgezeichnet [5]. Die Qualität dieses Musters bestimmt, welche Genauigkeiten bei der Auswertung erreicht werden kann. Über das aufgenommene Bild wird ein Korrelationsfenster bewegt, welches an jeder Stelle eine Grauwertmatrix erstellt und diese mit dem Referenzbild vergleicht. Durch diese Vergleiche wird eine Verschiebung errechnet.

Versuchsdurchführung

Vorangegangene Versuche an anderen Instituten zeigen, dass die Durchführung von Kriechversuchen mit Polymeren an Universalprüfmaschinen schwierig ist [6]. Daher werden die hier durchgeführten Versuche an einer speziell entwickelten Versuchsanlage (siehe Abbildung 3) durchgeführt. Diese wird vollständig in einem Wechselklimaschrank platziert. Die Probekörper werden, wie in Abbildung 3 dargestellt, am oberen Ende zwischen zwei Stahlplatten fixiert. Am unteren Ende erfolgt die Einspannung über zwei Aluminiumplatten. An Bohrungen in diesen Platten werden anschließend die Prüfgewichte eingehängt. Über einen Seilzug kann der Versuch von außen gestartet werden. Es werden drei Spannungen (bezogen auf den Ursprungsquerschnitt) gemäß Tabelle 1 für die Belastung der Probekörper gewählt.

Bezeichnung	σ_1	σ_2	σ_3
Spannung [N/mm ²]	0,25	0,50	0,75

Tab. 1: Spannungsniveaus im Kriechversuch bezogen auf den Ursprungsquerschnitt

Bei diesen wird je Temperatur und Feuchtigkeit mindestens ein Versuch mit einer Dauer von 24 Stunden durchgeführt.



Abb. 3: Versuchsapparatur mit Folien bei laufendem Versuch

Versuchsauswertung

Die Messrate während des Versuches beträgt 0,5 Hz. Als primäre Auswertungsgröße wird die Dehnung des Probekörpers erfasst. Alle Versuche werden über eine Zeitdauer von 24 Stunden kontinuierlich ausgewertet. Die Ergebnisse zum Ende dieser Messungen sind in Abbildung 4 in Bezug auf die technische Dehnung dargestellt. An einigen Stellen konnten die Versuche aufgrund der Randbedingungen des verwendeten Wechselklimaschranks nicht durchgeführt werden. Bei hohen Temperaturen und gleichzeitig hohen relativen Luftfeuchten wurden innerhalb weniger Minuten Dehnungen von über 300 % gemessen. Aufgrund der hohen Dehnungsgeschwindigkeiten konnten daher einige Versuche nicht ausgewertet werden. Neben der in Abbildung 4 dargestellten

technischen Dehnung wird die wahre Dehnung, wahre Spannung und der Elastizitätsmodul über die Zeit ausgewertet.

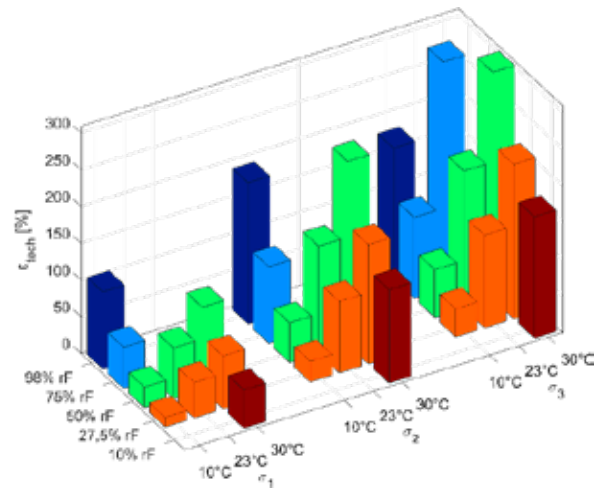


Abb. 4: technische Dehnung der Probekörper nach 24 Stunden

Bewertung der Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich bei der Auswertung festhalten, dass die Einflüsse der Feuchtigkeit auf die Steifigkeit der PVB-Folie nicht zu vernachlässigen sind. In Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte ergeben sich Steifigkeitsunterschiede von über 300 %. Die Dehnrate der Probekörper nimmt bei höheren Temperaturen wie auch bei höherer relativer Luftfeuchtigkeit zu.

Mit den gewonnenen Versuchsdaten können Materialmodelle entwickelt werden, welche den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Zwischenfolie berücksichtigen. Ziel soll am Ende sein, ein Materialmodell für gebrochenes Glas zu entwickeln, welches Großbauteilversuche zur Bestimmung der Resttragfähigkeit ersetzen kann. Die Bestimmung der ggf. notwendigen Materialparameter kann mit kleinformatischen Kriechversuchen schneller und günstiger realisiert werden. Auf diese Weise lassen sich besonders Glasprodukte mit kleinen Stückzahlen oder Sondergrößen wirtschaftlicher entwickeln und ihre Resttragfähigkeit nachweisen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: DIN 18008-5. Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 5: Zusatzerfordernungen an begehbbare Verglasungen.
- [2]: J. Kuntsche. Mechanisches Verhalten von Verbundglas unter zeitabhängiger Belastung und Explosionsbeanspruchung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
- [3]: Trosifol Manual. Kuraray Europe GmbH Division TROSIFOL®, 2012.
- [4]: W. Grellmann, S. Seidler. Kunststoffprüfung. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag München, 2015.
- [5]: Frederik Blumrich. Optische korrelationsbasierte Messtechnik mittels zufälliger Punktemuster. Dissertation, Universität Stuttgart, 2009.
- [6]: Bianca Farr. Untersuchungen zum nichtlinear viskoelastischen Materialverhalten polymerer Verbundglaszwischen-schichten. Masterarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2018.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Geralt Siebert, Iris Maniatis. Tragende Bauteile aus Glas – Grundlagen, Konstruktion, Bemessung, Beispiele. 2. Aufl., Wilhelm Ernst & Sohn, 2012.
2. Jens Schneider, Johannes Kuntsche, Sebastian Schula, Frank Schneider, Johann-Dietrich Wörner. Glasbau - Grundlagen, Berechnung, Konstruktion. 2. Auflage., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001, 2016.
3. Friedrich R. Schwarzl. Polymermechanik. Springer-Verlag, 1990.
4. W. Grellmann, S. Seidler. Kunststoffprüfung. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag München, 2015.
5. Christian Schuler. Einfluss des Materialverhaltens von Polyvinylbutyral auf das Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas in Abhängigkeit von Temperatur und Belastung. Dissertation, Technische Universität München, 2003.
6. Johannes Franz. Untersuchungen zur Resttragfähigkeit von gebrochenen Verglasungen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Springer-Verlag GmbH Germany, 2015.

Autor

Klaus Wilhelm trat 2015 in die Offizierslaufbahn bei der Bundeswehr ein. Seit 2016 studiert er Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften mit der Vertiefungsrichtung konstruktiver Ingenieurbau an der Universität der Bundeswehr München. Er ist studentische Hilfskraft an der Professur für Baukonstruktion und Bauphysik von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Geralt Siebert. Im Rahmen seiner Tätigkeit als studentische Hilfskraft unterstützt er die Forschung im konstruktiven Glasbau, sowie die Durchführung von Versuchen der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Glasprodukte am Labor für konstruktiven Ingenieurbau.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Universität der Bundeswehr München, am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Professur für Baukonstruktion und Bauphysik unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Geralt Siebert. Betreut wurde die Arbeit von M.Sc. Martin Botz.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.



ISBN 978-3-89650-481-4 // € (D)

