



DAS
BAYERISCHE
BAUGEWERBE

HOCHSCHULPREIS
des Bayerischen Baugewerbes

2023

WETTBEWERBSBEITRÄGE

IMPRESSUM

Herausgeber

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

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

Mit Beiträgen von

Sandro Bauer • Maike Bihlmeier • Christine Braun • Katharina Gramlich • Juliana Grosser •
Antonia Hartmann • Eva Jägle • Lisa Kellermann • Kristina Kroner • Leonie von Oepen •
Johannes Paule • Johanna Schlögel • Michael Scholz • Nick Sommer

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 2023

VORWORT

Die Stiftung Berufsförderung Bayerisches Baugewerbe schreibt jährlich den Hochschulpreis des Bayerischen Baugewerbes aus. Herausragende Bachelor- und Masterarbeiten der Fachrichtung Bauingenieurwesen mit hohem Praxisbezug für die Anwendung in Unternehmen der klein- und mittelständisch geprägten Bauwirtschaft und nachvollziehbarer, verständlicher Darstellung werden ausgezeichnet. Der Preis wurde 2023 zum 15. Mal vergeben.

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

In diesem Jahr wurden insgesamt einundzwanzig Bachelor- und Masterarbeiten von

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

eingereicht. Aus den einundzwanzig Arbeiten hat der Wettbewerbsausschuss entschieden, drei Arbeiten mit einem Geldpreis und elf Arbeiten mit einer Teilnahmeurkunde auszuzeichnen. Beherrschendes Thema in diesem Jahr war die Verbesserung der Nachhaltigkeit und des CO₂-Fußabdrucks im Baugewerbe.

Mit dem 1. Preis wurde Frau Christine Braun für ihre Masterarbeit „Experimentelle und statistische Analyse zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Mauerwerksprüfkörpern in Anlehnung an DIN EN 1052-2“ ausgezeichnet. Frau Braun wird für ihren wissenschaftlichen Beitrag zur Bestimmung von Biegezugfestigkeitswerten ausgezeichnet. Sie

belegt mit statistischen Methoden deren Abhängigkeit von der Qualifikation des ausführenden Personals. Es zeigt sich, dass die nationalen Vorgaben in Deutschland auch beim Einsatz von angelerntem Personal zu konservativ ist.

Den 2. Preis erhielt Juliana Grosser für ihre Bachelorarbeit zum Thema „Untersuchungen zur Wirksamkeit von Ziegelmehl als Zementzusatzstoff im Vergleich zu Steinkohleflugasche“.

Der 3. Preis ging an Maike Bihlmeier für ihre Bachelorarbeit „CO₂-armer Zement aus Magnesiumsilikat – Ein Beitrag zur Substitution von konventionellem Zement durch klimaschonende Bindemittel“.

Der Wettbewerbsausschuss:

Benedikt Baumann

Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann

Georg Gerhäuser

Brigitte Nagy

Prof. Dr.-Ing. Thomas Neidhart

Axel Neißer-Deiters

Thomas Schneider

Dr.-Ing. Ricarda Sposito

Olaf Techmer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel

Inhaltsverzeichnis

Sandro Bauer , Bachelor Thesis Gegenüberstellung von Sand und Flüssigboden in Bezug auf die Verfüllung von Gräben mit Kabelschutzrohrpaketen	Seite 3
Maike Bihlmeier , Bachelorarbeit CO ₂ -armer Zement aus Magnesiumsilikat Ein Beitrag zur Substitution von konventionellem Zement durch klimaschonende Bindemittel	Seite 8
Christine Braun , Masterarbeit Experimentelle und statistische Analyse zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Mauerwerksprüfkörpern in Anlehnung an DIN EN 1052-2	Seite 13
Katharina Gramlich , Masterarbeit Vergleichende Lebenszyklusanalyse zwischen der Bestandsstrecke B 16 und einer Variante	Seite 18
Juliana Grosser , Bachelorarbeit Untersuchungen zur Wirksamkeit von Ziegelmehl als Zementzusatzstoff im Vergleich zu Steinkohleflugasche	Seite 23
Antonia Hartmann , Bachelorarbeit Studie über eine multifunktionale und versetzbare Trennwand im Albert Einstein Discovery Center Ulm	Seite 28
Eva Jäggle , Master's Thesis Monitoring cement and concrete hydration using coda wave interferometry	Seite 33
Lisa Kellermann , Bachelorarbeit Untersuchung von alternativen Bindemitteln, deren Einsatzbereiche und Wirtschaftlichkeits- Betrachtung	Seite 38
Kristina Kroner , Bachelorarbeit Digitaler Zwilling für das Road Asset Management	Seite 43
Leonie von Oepen , Bachelorarbeit Nachhaltigkeitsbewertung ökologischer Betone durch den Entwurf einer vergleichenden Lebenszyklusanalyse	Seite 48
Johannes Paule , Bachelorarbeit RC-Beton als Zementzusatzstoff Untersuchung des Abbindeverhaltens von Mörtel mit RC-Mehl als Zementzusatzstoff	Seite 53
Johanna Schlögel , Masterarbeit Bewehrungskonzepte für den extrusionsbasierten 3D-Druck mit Beton	Seite 58
Michael Scholz , Bachelorarbeit Analyse von Lagereinrichtungen kippsgefährdeter Spannbetonbinder unter Berücksichtigung statischer Herausforderungen	Seite 63
Nick Sommer , Masterarbeit Numerische Simulationen des Pfahleinbringungsprozesses von offenen Stahlrohrpfählen mit dem IN 2 und 3D	Seite 69

GEGENÜBERSTELLUNG VON SAND UND FLÜSSIGBODEN IN BEZUG AUF DIE VERFÜLLUNG VON GRÄBEN MIT KABELSCHUTZROHRPAKETEN

Bachelorarbeit

Sandro, Bauer

Die eingereichte Arbeit beschäftigt sich mit dem Verfüllen von Rohrpaketen in Leitungsgräben mittels Flüssigboden und Sand. Auf einem unter realen Baustellenverhältnissen nachgebildeten Versuchsfeld wurden umfangreiche Feldversuche durchgeführt. Eine wichtige Rolle spielt hierbei die Prüfung mittels des Plattendruckversuches nach ZTVE-StB, um die vorgeschriebene Güte des Straßenunter- bzw. Straßenoberbaus nachzuweisen. Als Ergebnis wurde herausgearbeitet, dass sich mit Flüssigboden eine sehr gute und hohlraumfreie Verdichtung der Rohrpakete realisieren lässt. Dabei werden die geforderten Werte ohne Probleme und ohne großen Aufwand bei reduziertem Personal- und Geräteeinsatz erreicht.

Keywords: Flüssigboden, Sand, Grabenverdichtung, Kabelschutzrohrpaket, Verfüllbaustoffe, Leitungstiefbau

Einleitung

Aktuell wird verstärkt der Ausbau von Glasfaserstrecken zur Digitalisierung sowie der Ausbau des Stromnetzes u.a. für die Elektromobilität vorangetrieben. Um diese Ziele zu erreichen, ist ein optimierter Kabelleitungsbau erforderlich. Aufgrund der großen Anzahl von neuen und zu erneuernden Versorgungsleitungen werden immer häufiger Kabelleitungen in Schutzrohren bzw. in sogenannten Schutzrohrpaketen verlegt. Bei der großen Anzahl von Schutzrohren, die in einem Rohrpaket

verlegt werden, sind die zu verfüllenden Zwischenräume zwischen den Rohren sehr klein. Diese Tatsache führt im Leitungsbau zu großen erdbautechnischen Problemen bei der ordnungsgemäßen Verfüllung dieser Hohlräume und der Verdichtung des Verfüllmaterials. Neben der klassischen Verwendung von Sand als Verfüllmaterial, stehen neue Methoden mit der Verwendung von selbstverdichtendem Flüssigboden zur Verfügung. Hierzu gibt es bisher noch wenige Erfahrungswerte hinsichtlich der erdbautechnischen Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit.

Zielsetzung

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es, die Verfüllbaustoffe Sand und Flüssigboden zu vergleichen und daraus die Vor- und Nachteile abzuleiten. Weiter werden die Hintergründe und Informationen zum Thema Flüssigboden zusammengefasst und kompakt dargestellt. Dabei soll auch auf das RAL-GZ 507 (Reichs-Ausschuss für Lieferbedingungen Gütezeichen 507 Flüssigboden) eingegangen werden, welches den Grundstein für das Flüssigbodenverfahren legt.

Weiter soll mit Plattendruckversuchen nachgewiesen werden, ob der Flüssigboden mit bzw. ungebundenen Oberbau die geforderten Werte erreicht. Hierfür werden die Vorgaben der Stadt Nürnberg mit einem E_{v2} -Wert für den dynamischen Plattendruckversuch von 45 MN/m² herangezogen.

Begriffsbestimmung

„Flüssigboden gemäß den Anforderungen RAL Gütezeichen 507 (RAL-GZ 507) ist ein kohäsiv, friktional rückverfestigendes Material aus der Gruppe der zeitweise fließfähigen Verfüllmaterialien [1].“ Im RAL-GZ 507 werden die zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllmaterialien klar klassifiziert und der Begriff Flüssigboden eindeutig definiert. Flüssigboden zeichnet sich dadurch aus, dass er unter Zugabe eines Bindemittels, Zusätzen und Wasser aus fast jedem Boden oder Recyclingmaterial hergestellt werden kann [2].

Stand der Technik

Generell unterscheidet sich Flüssigboden im Vergleich zu herkömmlichen Verfüllbaustoffen dadurch, dass dieser keine Fremdkörper oder starre Strukturen ausbildet. Dadurch wird trotz dem Aus- und Wiedereinbau des Materials die vorhandene Struktur des umgebenden Bodens

nicht verändert. Hierdurch werden Setzungsdifferenzen, z.B. in Straßen, vermieden. Besonders im Leitungstiefbau eignet sich der Flüssigboden für die Wärmeabfuhr von erdverlegten Hochspannungskabeln. Weiter findet er oftmals Anwendung für die Verfüllung von Gräben mit verzweigten Rohr- bzw. Kabelverläufen. Bei diesem Verfahren ist eine Verfüllung mittels herkömmlicher Verfüllbaustoffen, wie z.B. Sand, nahezu unmöglich, da eine ausreichende und hohlraumfreie Verdichtung nicht gewährleistet werden kann.

Versuchsfeld

Für die Feldversuche wurde ein Versuchsfeld mit den Abmessungen von 18,0 m Länge, 1,25 m Breite und 1,25 m Tiefe auf dem Gelände der Nibler Unternehmensgruppe erstellt, welches in der Abbildung 1 dargestellt ist. Dadurch konnten die Baustellenbedingungen originalgetreu in einem ruhigen Arbeitsumfeld simuliert werden. Um den Unterschied zwischen der Verfüllung mit Sand und Flüssigboden genauer überprüfen zu können, wurde je ein Feld mit Rohrpaket und Flüssigboden und ein Feld mit Rohrpaket und Sand verfüllt. Innerhalb der Felder wurden nochmals drei Bereiche für den Schotteroberbau gebildet. Diese unterschieden sich durch 0 cm Schotter, 10 cm Schotter und 27 cm Schotter.



Abb. 1: Versuchsfeld mit Übersicht über die 3 Kammern

Durchgeführte Versuche

Bis 56 Tage nach dem Einbau des Flüssigbodens wurde der dynamische Elastizitätsmodul in

regelmäßigen Abständen geprüft und dokumentiert.

Dies geschah getrennt nach den verschiedenen starken Schichten des Schotteroberbaus.

Ebenfalls wurde nach 28 Tagen eine Messung mit der statischen Lastplatte vorgenommen und im Anschluss wurden die Werte mit den Herstellerangaben verglichen. Dabei wurde zudem die Korrelation zwischen dem dynamischen und statischen Plattendruckversuch hergeleitet.

Um den verwendeten Flüssigboden genauer klassifizieren zu können, wurde direkt während des Einbaus das Ausbreitmaß überprüft.

Im weiteren Verlauf wurde die Volumenstabilität und die einaxiale Druckfestigkeit im Labor der technischen Hochschule Nürnberg geprüft.

Um zu erkennen, wann sich für die Druckfestigkeit ein konstanter Wert einstellt, erfolgte die letzte Prüfung der Probekörper 112 Tage nach dem Einbau des Flüssigbodens.

Für die Klassifizierung des verwendeten Sandes wurden die im Folgenden aufgeführten Versuche im Labor durchgeführt:

- Bestimmung des Wassergehaltes nach DIN EN ISO 17892-1
- Bestimmung der Korndichte nach DIN EN ISO 17892-3
- Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4
- Gipsersatzverfahren nach DIN 18125-2
- Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung nach DIN 18126

Der direkte Vergleich der Verfüllung der beiden Versuchsfelder Sand und Flüssigboden erfolgte mittels einer Sichtprobe. Wie der Abbildung 3 zu entnehmen ist, wurden die Rohre hierbei lagenweise mittels des Saugbaggers freigesaugt und die Zwischenräume überprüft. Um einen direkten Blick zwischen die Hohlräume der Rohre

zu bekommen, wurde bereits in der Bauphase des Versuchsfeldes darauf geachtet, die Kopfplatten abnehmbar zu konstruieren (siehe Abbildung 2). Des Weiteren wurde der Hohlraumgehalt zwischen den Rohren im Versuchsfeld Sand rechnerisch, mit Hilfe des Volumens und Gewichtes des Sandes, bestimmt.



Abb. 2: Ansicht der Kopfseite vom Versuchsfeld Flüssigboden



Abb. 3: Lagenweise Ausbau Flüssigboden mittels Saugbagger

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche für den verwendeten Sand und Flüssigboden sind in der Abbildung 4 bzw. 5 dargestellt.

In der Gegenüberstellung der ermittelten Werte und der Vorgaben des Herstellers bzw. der Gütegemeinschaft lässt sich klar erkennen, dass alle Vorgaben eingehalten wurden.

Vergleicht man den klassifizierten Sand mit den aus den Versuchen hervorgehenden Werten mit den verschiedenen Normen, kann der Sand als Verfüllbaustoff eingesetzt werden.

	Vorgabe Hersteller	Ermittelter Wert
Ausbreitmaß	570 – 610 mm	580 mm
Zugabewasser Baustelle	max. 29 l/m ²	15,78 l/m ²
Volumenstabilität	< 1 %	0,52 %
Einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen q_c	0,05 – 0,15 N/mm ²	0,104 N/mm ²
Dichte über 112 Tage	-	1,97 g/cm ³
Wassergehalt über 112 Tage	-	21,75 %
Festigkeitszuwachs f_t	< 0,15 N/mm ² für leichte Wiederaushubfähigkeit	0,03 N/mm ²

Abb. 4: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Versuchen zum Flüssigboden

Wassergehalt	w	[%]	6,35
Korndichte	ρ_s	[g/cm ³]	2,53
Bodenart	[-]	gS, ms, fg	Grob sand, mittelsandig, schwach feinkiesig
Bodengruppe	[-]	SE	ang geduffte Sande
Ungleichförmigkeitszahl	C_u	[-]	2,80
Dichte ρ	ρ	[g/cm ³]	mittel: 1,55 min: 1,43 max: 1,60
Trockendichte	ρ_d	[g/cm ³]	mittel: 1,46 min: 1,38 max: 1,50
natürlicher Porenanteil	n	[-]	0,43
Lagerungsdichte	ρ_L	[-]	0,30
Bezugene Dichte	b	[-]	0,36
Verdichtungsfähigkeit	v	[-]	0,91
Lagerung	[-]		mitteldicht

Abb. 5: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Versuchen zum Sand als Verfüllmaterial

Bei der Verfüllung der Rohrpakete mit Flüssigboden gestaltete sich der Einbau sehr einfach. Die Verfüllung und Verdichtung mit Sand war dagegen sehr aufwändig. Die Tragfähigkeit wurde beim Flüssigboden direkt erreicht. Um diese beim Sand zu erreichen, ist ein weiterer Schritt nötig, bei dem mehr Schotter oder Bodenaushub eingebaut werden muss.

Im Allgemeinen muss beim Einsatz von Flüssigboden immer die Wirtschaftlichkeit bedacht werden, da der reine Kubikmeterpreis deutlich höher ist als beim Sand. Es wird klar herausgestellt, dass bei konventionellen Kabelgräben die Verfüllung weiterhin mit Sand, anstatt mit Flüssigboden erfolgen sollte, da die Vorteile von diesem hier nicht ausgespielt werden können.

In die Abwägung zwischen einer Verfüllung mit Sand oder Flüssigboden müssen schlussendlich auch die Baustellenbedingungen mit einbezogen werden. Dabei spielen das Platzangebot und die

Menge des Aushubs eine wesentliche Rolle. Des Weiteren sind auch die Verfüllbedingungen bezüglich Gerätebedarf und Einsatz zu bedenken.

Das Flüssigbodenverfahren entspricht dem Kreislaufwirtschaftsgesetz. Es wird kein Bodenaushub durch das Abfahren von der Baustelle zu Abfall. Der gesamte ausgehobene Boden wird dem Kreislauf wieder zugeführt. Nebenbei werden Ressourcen geschont, weil keine neuen Verfüllbaustoffe abgebaut werden müssen. Dadurch und durch wegfallende LKW-Fahrten wird CO₂ eingespart [3].

Fazit

In der Arbeit konnte das Ziel der Gegenüberstellung von Flüssigboden und Sand zur Verfüllung von Gräben mit Kabelschutzrohrpaketen klar erreicht werden.

Anhand der Untersuchungen und der daraus resultierenden Ergebnisse wurde dargestellt, dass die Verfüllung von Rohrpaketen in Leitungsgräben mit Flüssigboden deutlich besser funktioniert als mit Sand. Dabei können alle geforderten Werte eingehalten werden. Mit Setzungen und daraus resultierenden Oberflächenschäden bzw. Nachbesserungsarbeiten ist nicht zu rechnen.

Weiter wurde das Thema Flüssigboden grundlegend dargestellt. Dadurch konnte das Themengebiet auch bei der Firma Nibler weiter ausgeführt werden. Aufgrund der durchgeführten Versuche und der daraus resultierenden Ergebnisse wurde bereits auf aktuellen Baustellen Flüssigboden eingebaut. Bei diesen war der Einbau sowohl wirtschaftlich als auch bautechnisch sinnvoll.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: RAL Gütezeichen Flüssigboden: Gütesicherung nach RAL-GZ 507. Ausgabe Januar 2014. Sankt Augustin, Deutschland: RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., 2014.
- [2]: vgl. Bundesqualitätsgemeinschaft Flüssigböden e.V.: Qualitätsrichtlinien Flüssigböden (QRF). März 2017. Berlin, Deutschland: Bundesqualitätsgemeinschaft Flüssigböden e.V., 02.03.2017.
- [3]: vgl. Feickert, Rudolf: Selbstverdichtendes Verfüllmaterial – Vorteile der Flüssigböden. Kiel, Deutschland: 01.04.2008 <https://bi-medien.de/fachzeitschriften/umweltbau/kanalbaukanalbetrieb/selbstverdichtendes-verfuellmaterial-vorteile-von-fluessigboeden-u10012> (abgerufen am 05.11.2021)

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. FGSV- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau. Ausgabe 2012. Köln, Deutschland: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 2012.
2. Forschungsinstitut für Flüssigboden GmbH: RSS Flüssigboden Rezeptur für Verfüllung mit Durchwurzelungsschutz. Leipzig, Deutschland: 2020.
<https://www.fi-fb.de/app/download/13135744327/Produktinfo+RezWurzelschutz.pdf?t=1638185816>
(abgerufen am 04.11.2021)
3. Logistic Engineering GmbH: Erklärung der Anwendungsbereiche des RSS Flüssigboden. Anwendungsbereich – Kanal- und Straßenbau mit RSS FB. (o.D.)
<https://www.logic-engineering.de/kanal-und-strassenbau/> (abgerufen am 12.09.2021)
4. RAL Gütezeichen Flüssigboden: Gütesicherung nach RAL-GZ 507. Ausgabe Januar 2014. Sankt Augustin, Deutschland: RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., 2014.
5. Stolzenburg, Olaf: Flüssigboden nach RAL-Gütezeichen 507. Gelsenkirchen: 05.09.2017.
https://www.fi-fb.de/app/download/13721434127/IKT_05+09+17_final.pdf?t=1572957205
(abgerufen am 20.09.2021).
6. DIN 18134 (04/2012): Baugrund- Versuche und Versuchsgeräte- Plattendruckversuch. Berlin, Deutschland: Beuth Verlag GmbH (2012).
7. DIN EN ISO 17892-7 (05/2018). Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 7: Einaxialer Druckversuch. Berlin, Deutschland: Beuth Verlag GmbH (2018).

Autor

Sandro Bauer, Bachelor of Engineering, Bauleitung im Kabelleitungstiefbau, Bauingenieur

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl Bauingenieurwesen, Fachbereich Geotechnik, der Technischen Hochschule Georg Simon Ohm Nürnberg und durch Prof. Dr.-Ing. Bernd Pläßmann betreut.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

CO₂-ARMER ZEMENT AUS MAGNESIUMSILIKAT

EIN BEITRAG ZUR SUBSTITUTION VON KONVENTIONELLEM ZEMENT DURCH KLIMASCHONENDE BINDEMittel

Bachelorarbeit

Maike Bihlmeier

Als ein möglicher Lösungsweg, um die hohen CO₂-Emissionen des Bausektors zu senken, wird die Entwicklung alternativer Bindemittel erforscht, deren Auswirkungen auf die Umwelt weniger schädigend ausfallen sollen als die der herkömmlichen Zementarten. Diese Arbeit betrachtet im Speziellen die Untersuchung neuartiger Bindemittel, deren Erhärtungsprinzip auf der Ausbildung von Magnesiumsilikat- (M-S-H-) Phasen beruht. Durch Variation der Bindemittelrezeptur und der Herstellungsbedingungen kann nachvollzogen werden, wie diese sich jeweils auf die Materialeigenschaften und Leistungsfähigkeit auswirken. Die Druckfestigkeit der erstellten Probekörper wird nach 7 und 28 Tagen mittels einaxialer Druckfestigkeitsversuche (UCS) getestet. Darüber hinaus werden die Proben mit einem Röntgendiffraktometer (XRD) aufgenommen, um Erkenntnisse über die chemische Zusammensetzung und Struktur des entwickelten Materials zu erhalten. Die im Rahmen der geführten Untersuchungen erreichten Druckfestigkeitswerte bleiben hinter den Vergleichswerten von konventionellem Zement zurück, jedoch kann die Auswertung der XRD-Analyse die Bildung von M-S-H-Phasen bestätigen.

Keywords: Zement, Nachhaltigkeit, Magnesiumsilikat, M-S-H, Druckfestigkeit, XRD-Analyse

Einleitung

Mit seinen außerordentlichen Eigenschaften konnte Zement sich in vielen verschiedenen Anwendungsgebieten der Baubranche etablieren. Das leistungsstarke Material erfährt eine stetig wachsende Nachfrage auf globaler Ebene. Etwa zwei Drittel der von der Zementindustrie verursachten CO₂-Emissionen stehen in direktem Zusammenhang mit den eingesetzten Rohstoffen [1]. Die CO₂-Bilanz des Endprodukts ist

demensprechend stark von der Wahl der eingesetzten Rohstoffe abhängig. Insofern kann diese als Ansatzpunkt für die Minderung der Umweltauswirkungen der Zementindustrie genutzt werden. Diesbezüglich erregten Bindemittel, die als Ausgangsstoff das Mineral Magnesiumsilikat einsetzen, vermehrt Aufmerksamkeit. Da in dem zugrundeliegenden Herstellungskonzept keine carbonatisierten Rohstoffe verarbeitet werden, besteht die

Möglichkeit, dass sich die freigesetzten Mengen an CO₂ erheblich reduzieren lassen. Darüber hinaus wird die Möglichkeit der CO₂-Speicherung in derartigen Bindemitteln betrachtet, womit die CO₂-Bilanz derartiger Produkte noch weiter verringert werden könnte [2].

Problemstellung

Aus Sicht des Klimaschutzes ist die Marktfähigkeit und großflächige Anwendbarkeit solcher ökologischer Konzepte dringend notwendig [3]. Zur Klärung der Frage, ob Konzepte neuartiger Bindemittel geeignet sind, zum Erreichen der Klimaziele beizutragen, ist einerseits, die Energiebilanz des Verfahrens nachzuvollziehen und unter den derzeitigen Gegebenheiten aktualisiert zu bewerten. Des Weiteren sind die Materialeigenschaften zu ermitteln, weil diese den Rahmen des Erfolgspotentials der Bindemittel definieren. Damit neuartige Produkte konventionellen Zement vollständig substituieren können, ist es nicht ausreichend, wenn diese lediglich eine verbesserte CO₂-Bilanz aufweisen. Sie müssen ebenfalls für die diversen Anwendungsgebiete des Zements einsetzbar sein. Aus diesen vielfältigen Ansprüchen ergeben sich die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der neuen Materialien.

Zielsetzung und Vorgehensweise

Da das Gebiet der auf Magnesiumsilikat basierenden Bindemittel sehr weit gefasst werden kann, konzentriert sich diese Arbeit konkret auf die Betrachtung der Bindemittel, deren Festigkeit vorrangig durch die Ausbildung von M-S-H-Phasen bestimmt wird. Im Rahmen dieser Arbeit ist zu prüfen, inwiefern sich ein derartiges Bindemittel im Labor aus synthetischen Ausgangsstoffen herstellen lässt. Durch die Untersuchung der erstellten Probekörper in einaxialen Druckversuchen soll ein erstes Verständnis über die Leistungsfähigkeit des Materials gewonnen werden. Diese Betrachtung wird durch die Analyse der Proben mittels Röntgendiffraktion (XRD-Analyse) vertieft, die

Aufschluss über die Zusammensetzung der Proben gibt. Um ein Verständnis für die quantitativen Verhältnisse der entstandenen Phasen zu bekommen, wird letztere Untersuchungsmethode mithilfe der Rietveld-Methode ergänzt. Die abschließende Einschätzung vereint die erhaltenen Erkenntnisse und dient dazu, einen ersten Eindruck über die Leistungsfähigkeit von M-S-H-Zementen unter den angewandten Bedingungen und Parametern zu erhalten.

Untersuchungsprogramm

Zunächst war das Herstellungsverfahren auf die Probekörpererstellung im Labor anzupassen und grundsätzlich zu optimieren. Anschließend wurden verschiedene Probenreihen hergestellt, deren Rezepturen sich in den verwendeten Ausgangsstoffen, Mg/Si-Verhältnissen, w/z-Werten und Zusatzstoffen voneinander unterschieden. Die angefertigten Prüfkörper (3x3x3 cm) erhärteten für 7 oder 28 Tage, wobei sie jeweils 24 h nach der Herstellung ausgeschalt und in ihre spezifische Lagerungsbedingung eingebracht wurden. Wesentlicher Teil der Arbeit ist die Beurteilung, ob M-S-H-Phasen in den entwickelten Mischungen unter Bedingungen entstehen, die übliche Verhältnisse des Anwendungsbereichs von Zement abbilden. Zusätzlich dazu wurden auch Abwandlungen von diesen typischen Umgebungsbedingungen, in den Umfang des Untersuchungsprogramms aufgenommen. So wurde die Lagerung von Probekörpern an der Umgebungsluft des Labors, unter erhöhter Luftfeuchtigkeit, unter Wasser, sowie bei höherer CO₂-Konzentration betrachtet.

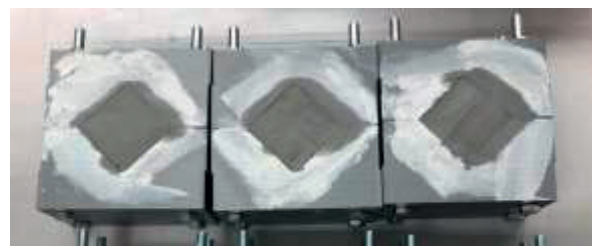


Abb. 1: Probewürfel im eingeschalteten Zustand

Anschließend konnte anhand der Ergebnisse aus den Druckversuchen und der Auswertung der XRD-Analyse abgeschätzt werden, in welchem Umfang sich die jeweilige Herstellungsvariante auf die Bildung der M-S-H-Phasen auswirkt.

Reaktionsprinzip von M-S-H-Zement

Der Reaktionsprozess zur Bildung von M-S-H-Phasen wurde mit synthetischen Stoffen nachvollzogen. Die Rezepturen setzen sich vorrangig aus Magnesiumoxid (MgO) und amorpher Kieselsäure zusammen. In einigen Rezepturen wurde die amorphe Kieselsäure durch Microsilica ersetzt, um ausgehend davon die Wirksamkeit beider Stoffe miteinander vergleichen zu können.

Zur Bildung von M-S-H-Phasen sind verschiedene Prozesse notwendig, die teilweise gleichzeitig ablaufen. Im ersten Schritt der Reaktionskette löst sich das, durch die Zugabe amorpher Kieselsäure oder Microsilica gegebene, Siliziumdioxid (SiO_2) im Wasser und bildet tetraedrische Siliziumnetze. Die Löslichkeit des SiO_2 steht in Abhängigkeit zu seiner Reaktivität und wird dadurch beeinflusst, ob der Stoff eine amorphe oder kristalline Struktur aufweist. Im weiteren Verlauf der Reaktion lagern sich die Siliziumstrukturen an das bis dahin bereits entstandene $\text{Mg}(\text{OH})_2$ an. Erst durch diesen finalen Schritt kommt es zur Bildung der charakteristischen M-S-H-Phasen. Damit die Umsetzrate der Stoffe möglichst hoch ist und die entwickelten M-S-H-Phasen hochwertige Eigenschaften erzielen, müssen die Ausgangsstoffe aufeinander abgestimmt sein. Die Reaktivität des MgO entscheidet über die Menge an $\text{Mg}(\text{OH})_2$, die während des Ablaufs entstehen kann. In diesem Zusammenhang bedeutet eine hohe Reaktivität des MgO , dass die Bildung von $\text{Mg}(\text{OH})_2$ beschleunigt abläuft, weshalb der Gleichgewichtszustand mit der vorhandenen Kieselsäure schnell überschritten wird. In diesem Fall entscheidet die Löslichkeit des amorphen Stoffes über die Geschwindigkeit der ablaufenden Reaktion [4]. Die Eigenschaften des gebildeten

Materials sind stark beeinflusst durch die Massenverhältnisse der reagierenden Stoffe, mögliche Zusatzstoffe, Umgebungsbedingungen, sowie weitere physikalische und chemische Eigenschaften der Ausgangsstoffe.

Ergebnisse der Druckversuche

Damit diese starken Abhängigkeiten der einzelnen Parameter der Reaktion erfasst werden konnten, wurden die hergestellten Variationen der Bindemittelrezepturen und Lagerungsbedingungen nach Ablauf der Erhärtungszeit zunächst hinsichtlich ihrer entwickelten Druckfestigkeiten untersucht.



Abb. 2: Prüfkörper nach Durchführung des einaxialen Druckfestigkeitsversuchs

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die betrachteten Ausgangsstoffe sich maßgeblich in ihren Eigenschaften und bezüglich der Eignung für das Herstellen der Prüfkörper unterscheiden. Besonders auffällig ist, dass Proben, die als siliziumhaltigen Ausgangsstoff Microsilica enthalten, die höchsten Druckfestigkeiten der gesamten Betrachtung erreichten. Dahingegen weisen Proben, deren Rezeptur mit amorpher Kieselsäure gebildet wurde, von allen durchgeführten Druckversuchen die geringsten Festigkeitswerte auf. Der maximale Druckfestigkeitswert von $2,110 \text{ N/mm}^2$ konnte erreicht werden, indem Proben an der

Umgebungsluft des Labors 7 Tage erhärteten. Der Mittelwert dieser Probenreihe (MR-MS-0,8-2,0-OZ-U-7d) liegt bei 1,548 N/mm², die Literatur verzeichnet für Rezepturen mit ähnlichen Mg/Si-Verhältnissen eine Festigkeit

von etwas über 2,0 N/mm². Die Druckfestigkeitswerte blieben auch bei einer Probenaushärtung von 28 Tagen in diesem Bereich.

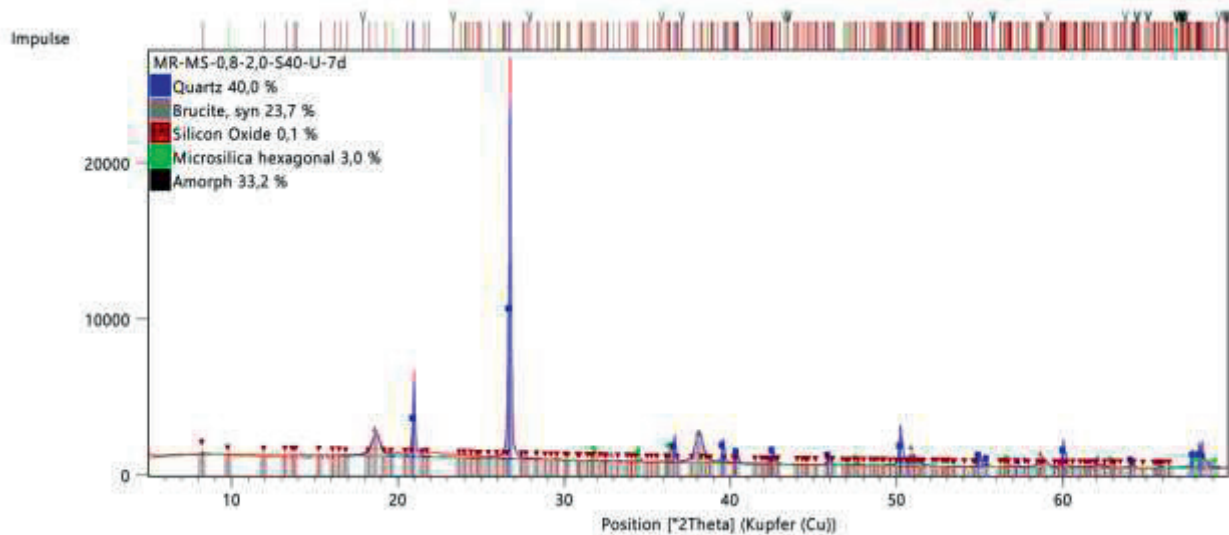


Abb. 3: Quantifiziertes Diffraktogramm MR-MS-0,8-2,0-OZ-U-7d

Erkenntnisse aus der XRD-Analyse

Für M-S-H-Phasen bei der XRD-Analyse lassen sich die charakterisierenden Peaks für 20,0, 26,7, 35,0 und 59,9 °2 θ feststellen. Diese folgen einem, für amorphe Phasen üblichen, breiten Verlauf mit geringer Impulshöhe [5]. Durch die XRD-Analyse konnte die Bildung der festigkeitsgebenden M-S-H-Phasen qualitativ bestätigt werden (Abb. 3). Zusätzlich wurde die Kristallstruktur von Microsilica modelliert. So konnte deren amorphe Anteile von denen der amorphen M-S-H-Phasen differenziert werden. Auf diese Weise ließen sich deren quantitativen Verhältnisse noch treffender ermitteln und auf ihren jeweiligen Einfluss bei der Festigkeitsentwicklung des Materials beziehen.

Zusammenfassung und Ausblick

Zwar konnte im Rahmen dieser Arbeit kein Bindemittel hergestellt werden, dessen Druckfestigkeiten an die üblichen Werte von Zement heranreichen, allerdings gelang die

Ausbildung und der Nachweis der charakteristischen M-S-H-Phasen. Da diese über die Leistungsfähigkeit des Materials entscheiden, ist in weiteren Untersuchungen deren Herstellung zu optimieren, damit das Potential des Materials vollständig ausgeschöpft werden kann. Magnesiumbasierte Bindemittel können CO₂ in ihre Struktur einbinden, weshalb sie sich grundsätzlich für sogenannte „Carbon Capture and Storage“ (CCUS)-Verfahren eignen. In Verbindung mit den geringen rohstoffbedingten Emissionen des Materials sind entsprechende Bindemittel demnach als äußerst vielversprechend hinsichtlich ihres Minderungspotentials der CO₂-Bilanz der Zementindustrie zu bewerten. Dementsprechend kann eine erweiterte Erforschung dieser Eigenschaften die Zukunft der Bauindustrie maßgeblich beeinflussen und dazu beitragen, die gesetzten Klimaziele zu erreichen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen

- [1] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Ed., 'Dekarbonatisierung von Zement und Beton - Minderungspfad und Handlungsstrategien.', 2020.
- [2] M. Achternbosch, C. Kupsch, E. Nieke, and G. Sardemann, *Sind "Green Cements" die Zukunft? Erste systemanalytische Abschätzungen zu innovativen Bindemitteln-Teil1: Novacem.* 2011.
- [3] W. W. F. Deutschland, 'Klimaschutz in der Beton-und Zementindustrie-Hintergrund und Handlungsoptionen', *WWF Berl.*, p. 36, 2019.
- [4] F. Jin and A. Al-Tabbaa, 'Thermogravimetric study on the hydration of reactive magnesia and silica mixture at room temperature', *Thermochim. Acta*, vol. 566, pp. 162–168, 2013.
- [5] B. Lothenbach, D. Nied, E. L'Hôpital, G. Achiedo, and A. Dauzères, 'Magnesium and calcium silicate hydrates', *Cem. Concr. Res.*, vol. 77, pp. 60–68, 2015.

Weitere für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. B. Panda, C. Sonat, E.-H. Yang, M. J. Tan, and C. Unluer, 'Use of magnesium-silicate-hydrate (MSH) cement mixes in 3D printing applications', *Cem. Concr. Compos.*, vol. 117, p. 103901, 2021.
1. C. Unluer and A. Al-Tabbaa, 'Enhancing the carbonation of MgO cement porous blocks through improved curing conditions', *Cem. Concr. Res.*, vol. 59, pp. 55–65, May 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2014.02.005.
2. F. Jin and A. Al-Tabbaa, 'Strength and hydration products of reactive MgO–silica pastes', *Cem. Concr. Compos.*, vol. 52, pp. 27–33, 2014.
3. D. Nied, K. Enemark-Rasmussen, E. L'Hôpital, J. Skibsted, and B. Lothenbach, 'Properties of magnesium silicate hydrates (MSH)', *Cem. Concr. Res.*, vol. 79, pp. 323–332, 2016.
4. E. Bernard, B. Lothenbach, D. Rentsch, I. Pochard, and A. Dauzères, 'Formation of magnesium silicate hydrates (MSH)', *Phys. Chem. Earth Parts ABC*, vol. 99, pp. 142–157, 2017.
5. B. Panda, C. Sonat, E.-H. Yang, M. J. Tan, and C. Unluer, 'Use of magnesium-silicate-hydrate (MSH) cement mixes in 3D printing applications', *Cem. Concr. Compos.*, vol. 117, p. 103901, 2021.

Autor

Maike Bihlmeier, B.Eng.

Seit 10/2022

10/2018 – 10/2022

Masterstudentin des Bauingenieurwesens; TU München

Bachelorstudentin des Bauingenieurwesens; Hochschule München

Betreuer

Die Arbeit wurde im Labor für Baustoffe der Hochschule München angefertigt.

Prof. Dr.-Ing. Andrea Kustermann

Prof. Dr. Thorsten Stengel

M. Eng. Benjamin Wolf

Die Arbeit wurde mit dem 3. Preis ausgezeichnet.

EXPERIMENTELLE UND STATISTISCHE ANALYSE ZUR BESTIMMUNG DER BIEGEZUGFESTIGKEIT VON MAUERWERKSPRÜFKÖRPERN IN ANLEHNUNG AN DIN EN 1052-2

Masterarbeit

Christine, Braun

Im Bereich des Bauwesens spielen Festigkeitswerte von Baustoffen eine wichtige Rolle und bilden die Grundlage für statische Berechnungen von Bauwerken. Mithilfe von experimentellen Untersuchungen wurde im Zuge dieser Arbeit ein Wert für die charakteristische Biegezugfestigkeit von Mauerwerk erforscht, da die DIN EN 1996-1-1 bei einer Belastung senkrecht zur Lagerfuge vorgibt, dass kein Wert angesetzt werden darf. Die Bestimmung erfolgte auf Basis einer statistischen Analyse von selbst erzeugten Messwerten. Ziel war es auch, die derzeitigen Entwicklungen im Arbeitsmarkt des Bauwesens zu betrachten, weshalb die Messreihe einen Unterschied des charakteristischen Wertes in Abhängigkeit von der Ausbildung des durchführenden Personals herausarbeitet. Diese Gegenüberstellung sollte als Grundlage für andere Festigkeitswerte betrachtet werden und zeigt deutlich die Notwendigkeit einer Ausbildung des ausführenden Personals. Zudem wurden die bisherigen Forschungserkenntnisse bestätigt und unter Betrachtung unterschiedlicher Einflussfaktoren gezeigt, dass eine charakteristische Biegezugfestigkeit angesetzt werden kann.

Keywords: charakteristischer Wert, Biegezugfestigkeit, Messserie, statistische Analyse, Fachpersonal,

Vorüberlegungen zur Bestimmung der charakteristischen Biegezugfestigkeit von Mauerwerk

Bei der charakteristischen Biegezugfestigkeit von Mauerwerk wird unterschieden zwischen einer Beanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen und einer Beanspruchung des Mauerwerks parallel zu den Lagerfugen. Für Ersteres gibt der deutsche nationale Anhang der DIN EN 1996-1-1 [1] vor, dass keine Festigkeit angesetzt werden darf. Forschungsprojekte haben jedoch gezeigt,

dass ein Wert von $0,20 \text{ N/mm}^2$ [2] unter Betrachtung unterschiedlicher Materialien durchaus erreicht wird, weshalb die Vorgaben des deutschen nationalen Anhangs als unzureichend angesehen werden. Deshalb sollten im Zuge dieser Arbeit die bisherigen Erkenntnisse untersucht und verifiziert werden. Hierbei war es wichtig, die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf den Festigkeitswert herauszuarbeiten und diese statistisch zu analysieren. Besonders sollte auch die Entwicklung des Arbeitsmarktes im Bauwesen miteinbezogen werden. Da der Fachkräftemangel in dieser Branche ein zunehmendes Problem

darstellt, war das Ziel, die Ergebnisse auf Basis dieser Thematik zu erarbeiten.

Aufgrund dessen wurde zur Bestimmung eines charakteristischen Werts eine Prüfserie mithilfe eines ausgebildeten Mauerers hergestellt und aber auch eine Prüfserie im Rahmen eines Studierendenpraktikums. Die Studierenden haben dabei Einweisungen durch Fachpersonal erhalten und sollten somit die Situation widerspiegeln, wie sie häufig auf Baustellen vorzufinden ist, wenn ungeschultes Personal zum Einsatz kommt.

Experimentelle Untersuchungen

Die Prüfkörper zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit nach DIN EN 1052-2 [3] sind aufwändig herzustellen und es wird viel Material benötigt. Um eine große Anzahl an Prüfkörpern untersuchen zu können, wurden deshalb im Zuge der Arbeit Drei-Stein-Prüfkörper verwendet und die bestimmten Festigkeitswerte anschließend über das Widerstandsmoment auf einen Mauerwerksverband umgerechnet. Im Folgenden ist ein Exemplar zu sehen (vgl. Abb. 1). Mithilfe von Gipsausgleichsschichten sollte eine ungestörte Lasteinleitung gewährleistet werden.



Abb. 1: Drei-Stein-Prüfkörper

Es wurden die drei in der Praxis verwendeten Mörtelauftragsverfahren mitberücksichtigt: Auftrag durch Tauchen, mithilfe einer Mörtelrolle und mithilfe eines Mörtelschlittens. Auch wurden zwei unterschiedliche Mörtelarten eingesetzt, um den möglichen Einfluss zu untersuchen: Leichter Dünnbettmörtel und schwerer Dünnbettmörtel. Während des Versuchs wurde die Verformung mithilfe von fünf Wegaufnehmern aufgenommen und die zugehörige Kraft über einen Kraftaufnehmer gemessen.

Übersicht Prüfkörper

Die Prüfkörper der Studierenden wurden von drei Gruppen hergestellt, wobei in jeder Gruppe die drei Auftragsverfahren verwendet wurde. Ziel war es, dass zu jedem Auftragsverfahren je Gruppe zehn Probekörper vorliegen, wobei fünf mit leichtem und fünf mit schwerem Dünnbettmörtel gemauert werden sollten. Dadurch, dass schon während des Praktikums einige der Prüfkörper zu Bruch gingen, konnten am Ende 80 Messwerte erzeugt werden. Diese wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten geprüft, wobei immer eine Mindest erhärtung von 30 Tagen gegeben war.

Um den Einfluss der Ausbildung des Personals untersuchen zu können, wurde eine weitere Prüfreihe hergestellt. Bei dieser Prüfreihe wurde sich auf das Auftragen mit der Mörtelrolle beschränkt, damit sowohl Zeit als auch Kosten gespart werden konnten. Hergestellt wurden die Drei-Stein-Prüfkörper von einem Anwendungstechniker, sprich ausgebildetem Personal. Insgesamt wurden 18 Probekörper mit leichtem Dünnbettmörtel hergestellt.

Auswertung der Ergebnisse

Die DIN EN 1052-2 [3] gibt vor, bei einer Prüfkörperzahl unter fünf, den charakteristischen Wert der Biegezugfestigkeit über den Mittelwert der Ergebnisse zu bestimmen und einen Sicherheitsfaktor von 1,5 einzuberechnen. Bei einer höheren Anzahl wird eine Auswertung nach der Lognormalverteilung vorgesehen, wobei der dimensionslose Beiwert k , welcher aus anderen Baustoffprüfungen bekannt ist, miteingeht. Dieser dient zur Berücksichtigung der Aussagewahrscheinlichkeit und des Stichprobenumfangs.

Im Zuge der Arbeit wurde von jeder Prüfreihe die Normalverteilung, die Lognormalverteilung sowie der Mittelwert $f_{m/1,5}$ gebildet. Zudem dienten statistische Kenngrößen, wie die Standardabweichung und der Variationskoeffizient zur besseren Beurteilung der Streuung.

Für jedes Auftragsverfahren, mit der Unterscheidung zwischen schwerem und leichtem Dünnbettmörtel, wurden die Ergebnisse dargestellt und ausgewertet. Ein Beispiel hierfür ist in untenstehendem Diagramm zu sehen (vgl. Abb. 2).

Anhand der Ergebnisse der Prüfreihe der Studierenden ist erkennbar, dass die Streuung sehr hoch ist, weshalb sich die Normalverteilung oftmals in den negativen Bereich entwickeln würde. Dies führt dazu, dass der charakteristische Wert vermindert wird, da bei der Berechnung von diesem die Standardabweichung miteingeht.

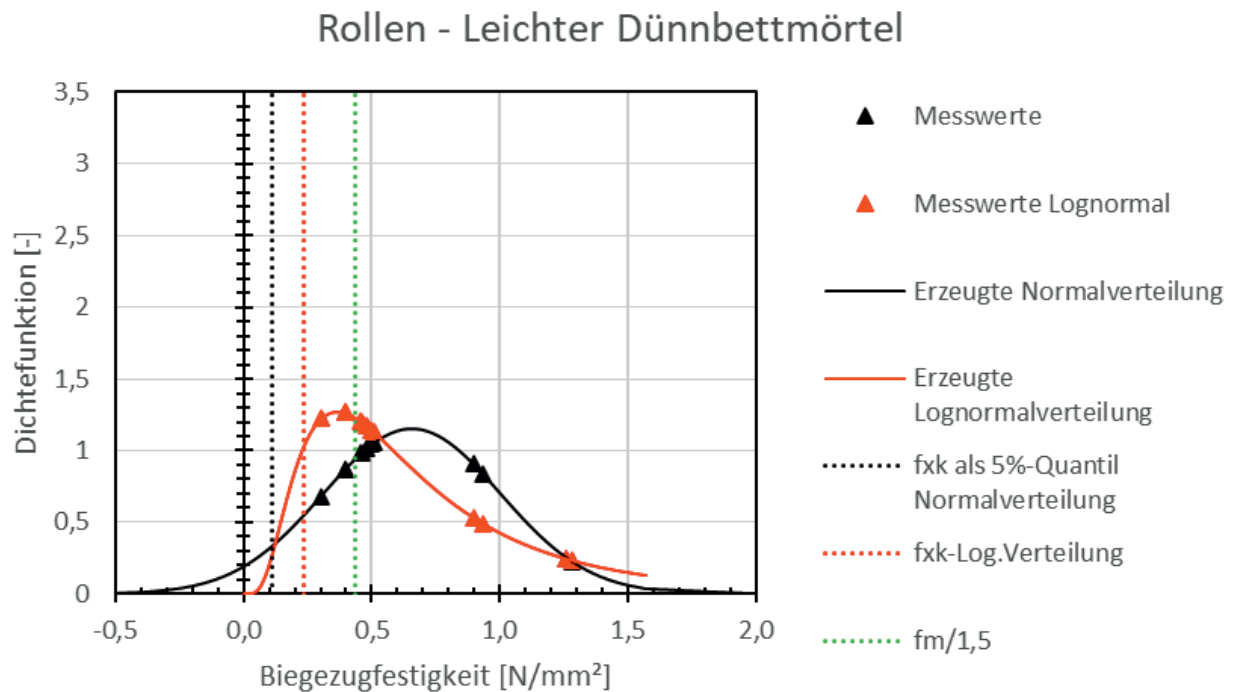


Abb. 2: Statistische Auswertung der Studierenden Prüfreihe mit dem Auftragsverfahren der Mörtelrolle und leichtem Dünnbettmörtel

Die Ergebnisse der Prüfreihe des Fachpersonals hingegen zeigten andere Entwicklungen. Die Streuung der Festigkeitswerte war sehr gering, wodurch der dadurch bestimmte charakteristische Wert nach DIN EN 1052-2 [3] deutlich höher lag. Zum Vergleich ergab die Messreihe der Studierenden mit leichtem Dünnbettmörtel durch Auftragen mit der Mörtelrolle ein f_{xk} von 0,24 N/mm², bedingt durch einen Variationskoeffizienten von 53%. Die Prüfreihe des Anwendungstechnikers (unter Verwendung der gleichen Materialien) erzeugt ein f_{xk} von 0,40 N/mm² mit einem Variationskoeffizienten von 15%. Die Festigkeitswerte wurden also

wesentlich von der Ausbildung des Ausführenden beeinflusst.

Bewertung der Messwerte

Der Verband eines Mauerwerks beeinflusst die Fläche, auf welcher sich Mörtel zwischen dem oberen und unteren Ziegel befindet. Im vorliegenden Versuch wurden die Ziegel direkt übereinander gemauert, weshalb diese Fläche maximal war.

Um dies auf die Praxis übertragen zu können, wurde das Flächenträgheitsmoment dieser Fläche im Vergleich zu der überdeckenden

Fläche zwischen den Ziegeln bei einem Mindestüberbindemaß bestimmt.

Anhand davon, wurde für beide Fälle das Widerstandsmoment berechnet und somit der prozentuale Anteil des Widerstandsmoments eines Mauerwerks vom vorliegenden Versuchsaufbau herausgearbeitet. Die berechneten Festigkeitswerte wurden mit diesem

Anteil multipliziert und somit verringert, was in nachfolgender Tabelle dargestellt ist (vgl. Tabelle 1). Diese reduzierten Ergebnisse bestätigen zwar nicht immer einen Mindestwert von $0,20 \text{ N/mm}^2$ [2], zeigen jedoch, dass die Biegezugfestigkeit unter Betrachtung unterschiedlicher Einflussfaktoren in erheblicher Größenordnung vorhanden ist.

Prüfgruppen	Charakteristische Biegezugfestigkeit [N/mm^2]	
	f_{xk} der Log.-Verteilung	Prozentualer Anteil f_{xk}
Rollen – Leichter DBM	0,24	0,18
Rollen – Schwerer DBM	0,22	0,16
Tauchen – Leichter DBM	0,21	0,16
Tauchen – Schwerer DBM	0,25	0,19
Mörtelschlitten – Leichter DBM	0,29	0,21
Mörtelschlitten – Schwerer DBM	0,28	0,21
Prüfserie Fachpersonal	0,40	0,30

Tabelle 1: Übertragung der charakteristischen Werte auf einen Mauerwerksverband

Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Angaben des nationalen Anhangs der DIN EN 1996-1-1 [1] konservativ sind und durchaus ein höherer Wert für die charakteristische Biegezugfestigkeit angesetzt werden kann. Dies bestätigt bisherige Forschungsergebnisse, wobei vor allem zu beachten ist, dass bei vorliegender Messreihe sowohl unterschiedliche Materialien miteinbezogen wurden als auch nicht geschultes Personal herangezogen wurde, um die Umsetzung in der Praxis möglichst nah zu simulieren und somit sichere Werte zu erhalten. Eine Betrachtung der einzelnen Auftragsverfahren hat generell keine großen Unterschiede gezeigt und lässt nicht folgern, dass

der charakteristische Wert der Biegezugfestigkeit wesentlich davon abhängt.

Ebenso wenig gab es einen auffallenden Unterschied zwischen den zwei Mörtelarten.

Was deutlich gezeigt wurde anhand der statistischen Analyse ist der Einfluss der Ausbildung des ausführenden Personals.

Leider zeigt sich in der Praxis immer häufiger, dass ungeschulte Arbeiter nach einer kurzen Einführung eingesetzt werden. Diese Vorgehensweise wurde anhand der Studierenden nachgebildet. Das Ergebnis war deutlich und belegt die Notwendigkeit der Ausbildung des ausführenden Personals. In Zukunft sollte dieser Aspekt bei anderen Festigkeitswerten untersucht werden.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für (2019) Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk - Nationaler Anhang.
- [2]: Brameshuber W., Saenger D.: Auswertung der Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Ziegel-Mauerwerk mit Normalmauer- und Dünnbettmörtel – F7080. Aachen, April 2010
- [3]: DIN EN 1052-2 (2018-12) Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 2: Bestimmung der Biegezugfestigkeit.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- 1. Brameshuber, W.; Schmidt, U. (2013) Biegezugfestigkeit von Mauerwerk in: Mauerwerk 17, H. 1, S. 38–43.
- 2. Kohn, W. (2005) Normalverteilung in: Statistik: Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung, S. 271–284.
- 3. Eierle, B. (2021) Mechanische Kennwerte - vom Versuch zum statischen Nachweis. Rosenheim: Technische Hochschule Rosenheim.

Autor

Studium

März 2017 – März 2021:	Bachelorstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg
Februar 2019 – Dezember 2019:	Auslandsjahr, Universidad Nacional de Santiago del Estero
März 2021 – Dezember 2022:	Masterstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg

Berufserfahrung

August 2018 – März 2021:	Studentische Hilfskraft im Bereich Geotechnik
August 2019 – Dezember 2019:	Bauleitung Firma Ingecon, Argentinien
Januar 2020 – März 2021:	Studentische Hilfskraft im Bereich Baustoffkunde
Januar 2020 – Februar 2019:	Studentische Hilfskraft im Bereich Ingenieurgeologie und Bodenmechanik
April 2021 – September 2022:	Lehrkraft für besondere Aufgaben im Bereich der Baustoffkunde

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt im Bereich des konstruktiven Ingenieurbaus der OTH Regensburg.
Betreuer der Arbeit ist Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer und Zweitprüfer ist Prof. Dipl.-Ing. Charlotte Thiel.

Die Arbeit wurde mit dem 1. Preis ausgezeichnet.

VERGLEICHENDE LEBENSZYKLUSANALYSE ZWISCHEN DER BESTANDSSTRECKE B 16 UND EINER VARIANTE

Master's Thesis

Katharina, Gramlich

Das Thema Treibhauspotential und Ressourceneffizienz ist im Ausschreibungs- und Bewertungsprozess von Straßen bisher noch nicht integriert. Jedoch besteht der Bedarf aufgrund des Klimawandels hierfür. In der Arbeit werden Methoden und Verfahren entwickelt, in denen die Bewertung anhand einer Bepunktung erfolgt. Dies wird anhand eines Variantenvergleichs zu einem Fallbeispiel durchexerziert. Wie bisher werden die raumstrukturelle Wirkung, die verkehrliche Beurteilung, die entwurfs- und sicherheitstechnische Beurteilung, die Umweltverträglichkeit und die Wirtschaftlichkeit berücksichtigt. Die Lebenszyklusanalyse wird in dieser Beurteilung integriert. Damit kann das Thema der Nachhaltigkeit in den Planungsprozess aufgenommen werden. Außerdem können damit entscheidende Stellschrauben für eine Treibhausgasminimierung identifiziert werden. Mithilfe des Verfahrens können sich auch Bauunternehmen besser auf die zukünftigen Anforderungen an „klimagerechtes Bauen“ einstellen und strategisch ausrichten. Es ist für nachhaltiges Bauen von Infrastruktur auf einen geringen Material- und Energieverbrauch zu achten.

Keywords: Lebenszyklusanalyse, Nachhaltigkeit, Variantenvergleich, Treibhauspotential, Vergleichende Lebenszyklusanalyse

Problematik Klimawandel

Die ausgestoßenen Treibhausgase tragen maßgeblich zum Klimawandel bei. Dabei macht der Bausektor einen sehr großen Teil aus. Jedoch gibt es bisher lediglich wenige Maßnahmen zur Einsparung der Emissionen beim Bau.

Besonders die öffentliche Hand sollte dabei in die Pflicht genommen werden. Aktuell wird diese Problematik nicht im Planungsprozess

berücksichtigt. Weil aber der Bedarf besteht, werden durch die Arbeit Verfahren entwickelt, die die Bewertung des Treibhausgaspotentials während der Planung ermöglichen.

Dabei wird durch die Bepunktung der Lebenszyklusanalyse und deren Unterkategorien der Teil Ökologie der Nachhaltigkeit in den Variantenvergleich integriert. Als Anwendungsbeispiel wird hierzu ein

Variantenvergleich für einen dreistreifigen Neubau beziehungsweise Ausbau verwendet.

Lebenszyklusanalyse

In der Lebenszyklusanalyse werden das Treibhauspotential, der Primärmaterialbedarf und der Primärenergiebedarf berücksichtigt. Das Treibhauspotential wird mithilfe der CO₂-Äquivalente bestimmt. [2]

Für die grobe Abschätzung der Emissionen in der Planungsphase der Voruntersuchung reichen Berechnungen zum Primärenergiebedarf und zum Treibhauspotential mithilfe von Emissionsfaktoren aus der Literatur aus. Zur Bewertung der Emissionen einer Straße muss deren gesamter Lebenszyklus betrachtet werden. Deshalb wurden die Kategorien Straßenbau, Betrieb und Erhaltung eingeführt.

Die Kategorie Straßenbau umfasst die Herstellung aller Materialien, den Transport, den Bau der Bauwerke und den Ein- bzw. Ausbau der Straße. Die Nutzung der Straße über den Nutzungszeitraum wird von der Kategorie Betrieb abgedeckt. Die Kategorie Erhaltung stellt die Verkehrssicherheit über die Nutzungsdauer sicher und wird in betriebliche und bauliche Erhaltung unterteilt.

Bewertung der Kategorien

Im Anwendungsbeispiel des Variantenvergleichs können die Unterschiede bezüglich der Streckenlänge, der Nutzung der Bestandstrasse und eines Tunnelbauwerks herausgearbeitet werden.

Die Herstellung stellt mit 67 Prozent das größte Treibhauspotential des Straßenbaus dar. Der Transport und der Ein- bzw. Ausbau spielen keine große Rolle. Bei der Herstellung weisen der Asphalt und das Bitumen die höchsten Emissionen auf, da hierfür die meiste Energie

aufgebracht werden muss. Die Gesteinskörnung weist geringere Treibhausgase auf, da diese lediglich gewonnen werden muss.

Die genaue Verteilung des Treibhauspotentials wird am Beispiel der Bestandstrasse in der ersten Abbildung gezeigt. Die Herstellung wird nochmals auf die verschiedenen Materialien aufgeteilt.

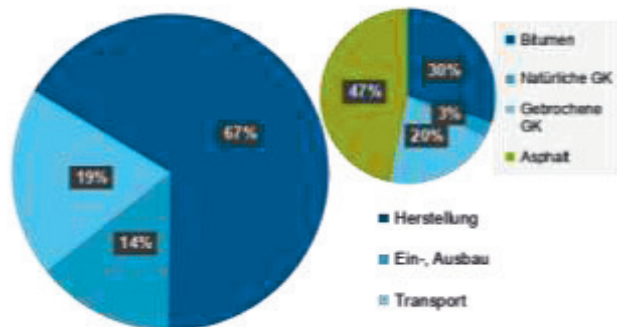


Abb. 1: Treibhauspotential des Straßenbaus

Deshalb reduzieren Varianten mit einem geringen Materialbedarf die Emissionen. Im Anwendungsbeispiel schneidet damit der bestandsorientierte Ausbau am besten ab. Da hierbei lediglich angebaut und nicht neugebaut werden muss. Für ein Tunnelbauwerk ist ein hoher Materialeinsatz und damit viele Emissionen für den Bau nötig.

Die Kategorie Betrieb steigt linear mit der Streckenlänge der Trassen an. Deshalb verteilen sich die Emissionen aufsteigend, je länger die jeweilige Variante ist.

Das Treibhauspotential der baulichen Erhaltung fällt um ein Vielfaches höher als bei der betrieblichen Erhaltung aus. Der Grund hierfür ist die Menge der verwendeten Materialien, weil die betriebliche Erhaltung zum größten Teil die Straßenausstattung betrifft.

Ergebnis der Lebenszyklusanalyse

Insgesamt liegt der Betrieb um das mindestens fünffache über dem Straßenbau, da der Straßenbau einmalig erfolgt und der Betrieb über

einen Nutzungszeitraum von 30 Jahren gerechnet wird.

Die Erhaltung ist um einen Faktor von circa 2 geringer als der Straßenbau. Dies ergründet sich aus dem Materialbedarf. Bei den Maßnahmen zur Erhaltung werden lediglich die Deck- und Binderschicht erneuert. Der Neubau benötigt den gesamten Straßenaufbau.

Diese Erkenntnisse werden im folgenden Kreisdiagramm beispielhaft für die Bestandstrasse übersichtlich dargestellt.

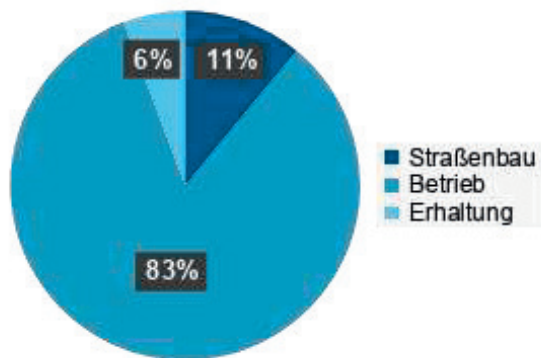


Abb. 2: Treibhauspotential

Variantenvergleich

Im Variantenvergleich werden die Varianten nach den Kategorien verkehrliche Belange, straßenbauliche Belange, Umweltbelange, Belange Dritter und sonstige Belange in Ränge eingeteilt. Wobei der höchste Rang die beste Bewertung darstellt. [1]

Die Lebenszyklusanalyse wurde als weiterer Punkt in den Variantenvergleich aufgenommen, um das Thema Nachhaltigkeit in die Bewertung zu integrieren.

Je nach Wichtigkeit der jeweiligen Kategorie werden Faktoren zwischen 0,5 und 2 vergeben. Die anderen Überpunkte weisen eine hohe Anzahl an Unterpunkten auf. Die Lebenszyklusanalyse besitzt lediglich drei Unterkategorien, weshalb dem Straßenbau, dem Betrieb und der Erhaltung ein Faktor von 2

zugeteilt wird, um diesen Unterschied auszugleichen.

Die Ränge der jeweiligen Kategorien werden mit den Faktoren multipliziert. Somit lässt sich eine Gesamtpunktzahl ermitteln. Die Variante mit der höchsten Punktzahl gewinnt den Variantenvergleich. [1]

Vergleich Bestand und Variante

Mit der vergleichenden Lebenszyklusanalyse kann ein Vergleich zwischen dem bestandsorientierten Ausbau und dem ursprünglichen Neubau gezogen werden. Ebenfalls wird der Unterschied zwischen der Zwei- und Dreistreifigkeit sowie der Fahrgeschwindigkeit bei der Nutzung herausgearbeitet.

Der Vergleich wird getrennt für die Kategorien Straßenbau, Betrieb und Erhaltung durchgeführt. Letztlich werden die Gesamtergebnisse verglichen.

Die Emissionen des Straßenbaus bei einem Anbau liegen unter denen eines Neubaus. Die Herstellung stellt bei beiden Trassen das größte Treibhauspotential dar.

Da der Betrieb von der Streckenlänge abhängig ist, liegen der An- und Neubau gleich auf. Jedoch wird durch die Dreistreifigkeit eine höhere Fahrgeschwindigkeit erreicht, weshalb die Emissionen ansteigen.

Die Steigung beziehungsweise das Gefälle der Trassen hat wenig Einfluss auf das Treibhauspotential, da diese linear ansteigt und sich in Gegenrichtung ausgleicht. Jedoch erhöht sich bei großen Steigungen die Konzentration der Feinstaubpartikel und der Stickstoffoxide exponentiell.

Für die Erhaltung werden die dreistreifige und zweistreifige Strecken miteinander verglichen.

Hierbei wird deutlich, dass mit einer Dreistreifigkeit mehr Aufwand verbunden ist. Damit kann ein Anstieg der Emissionen pro Fahrstreifen identifiziert werden.

Insgesamt ist das Treibhauspotential des Anbaus höher als beim Bestand. Der Straßenbau fällt geringer aus, aber die Kategorien Betrieb und Erhaltung überwiegen. Damit wird deutlich, dass die Emissionen durch eine geringere Fahrgeschwindigkeit und einen schlankeren Querschnitt deutlich eingespart werden können.

Vergleich mit restlichen Varianten

Aus dem Vergleich des Bestandes mit den ausgeschiedenen Varianten im Variantenvergleich führt zu weiteren Erkenntnissen.

Ein dreistreifiger Querschnitt weist beim Straßenneubau deutlich mehr Emissionen als ein zweistreifiger Querschnitt auf. Das Treibhauspotential des Betriebs ist direkt von der Streckenlänge abhängig. Eine höhere Fahrgeschwindigkeit wirkt sich negativ auf die Emissionen aus. Die Erhaltung steht im direkten Zusammenhang mit der Streckenlänge und dem Querschnitt der Trassen, da je größer die Fläche der Straße ist, umso mehr Material wird für die Erhaltungsmaßnahmen benötigt.

Fazit

Im Bereich Straßenbau ist die Lebenszyklusanalyse nicht üblich. Deshalb existieren bisher lediglich eine geringe Anzahl von Vergleichsprojekten. Die Ergebnisse dieser Arbeit stimmen mit der Literatur überein, dass der Betrieb die höchsten Emissionen verursacht und die Herstellung den größten Teil beim Straßenbau einnimmt.

Die in der Arbeit entwickelte Integration der Nachhaltigkeit in den Variantenvergleich stellt eine gute Möglichkeit dar, schon in der

Planungsphase die Emissionen zu berücksichtigen.

Für eine genauere Berechnung müssten mehr Datenquellen vorliegen. In der Arbeit wurden deshalb Emissionsfaktoren verwendet, die aber im Rahmen des Variantenvergleichs ausreichend sind.

Die Hauptfaktoren des Treibhauspotentials stellen die Streckenlänge, der Querschnitt und die Anzahl und Größe der Bauwerke dar. Die Straßenlängsneigung hat keinen Einfluss auf die Treibhausgase.

Verbesserungsmöglichkeiten

Die Verbesserungsmöglichkeiten stellen der Niedertemperaturasphalt, das Bitumen und der Recyclingasphalt dar.

Beim Niedertemperaturasphalt wird die Herstellungs- und Einbautemperatur herabgesetzt. Dies kann durch ein polymermodifizierten Bitumen erreicht werden. Dadurch können Treibhausgase und Energie eingespart werden. Jedoch wird dieser Asphalt bisher lediglich zu Oberflächenbehandlungen und für dünne Schichten eingesetzt. [3]

Zur Einsparung von Emissionen bei der Herstellung von Bitumen kann dessen Zusammensetzung verändert werden. Dazu werden die niedriger molekularen Erdölprodukte erhöht oder chemische Additive hinzugefügt. Damit kann die Temperatur reduziert werden. [4]

Ein hohes Einsparpotential liegt in der Verwendung von Recyclingasphalt, da das Bitumen und die Gesteinskörnung nicht hergestellt beziehungsweise gewonnen werden müssen. Die Zugabemenge ist in Deutschland sehr begrenzt. Durch Erhöhung des Recyclinganteils könnten Treibhausgase eingespart werden. [3]

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Dr. jur. Marcus Lau (2021): Straßenplanung - Die Variantenprüfung im Straßenbau. In: *Straßenverkehrstechnik* (9.2021), S. 664–672.
- [2]: M.Eng. Amina Wachsmann, Prof. Dr.-Ing. Christian Holldorb, Dr. Sonja Cypra (2021): Nachhaltigkeitsbewertung eines Bauprodukts im Straßenbau am Beispiel B2Last. Unter Mitarbeit von Institut für Verkehr und Infrastruktur der Hochschule Karlsruhe. In: Florian Schäfer und Technische Akademie Esslingen e. V (Hg.): 2. Kolloquium Straßenbau in der Praxis. Tübingen: expert verlag GmbH, S. 71–80.
- [3]: Prof. Dr. Susanne Kytzia, Thomas Pohl (2021): Themenheft Asphaltrecycling. Ökobilanz der Herstellung von Asphaltbelägen. In: *Straße und Autobahn* (8.2021), S. 641–652.
- [4]: Martin Vondendorf (2021): Neue Bitumen zur Reduzierung von Emissionen aus Asphalt. Unter Mitarbeit von Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg. In: Florian Schäfer und Technische Akademie Esslingen e. V (Hg.): 2. Kolloquium Straßenbau in der Praxis. Tübingen: expert verlag GmbH, S. 81–82.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- 1. Dipl.-Ing. Jan Birnbaum (2016): Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der Lebenszykluskosten von Straßen in Asphaltbauweise. Dissertation. Universität, Siegen. Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät.
- 2. Julia Sauer (2016): Ökologische Betrachtungen zur Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken der Verkehrsinfrastruktur. Dissertation. Technische Universität, München. Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Lehrstuhl für Massivbau. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1295092/1295092.pdf>.
- 3. Torsten Mielecke, Carl-Alexander Graubner, Carolin Roth (2016): Konzeptionelle Ansätze zu Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur. Unter Mitarbeit von Life Cycle Engineering Experts GmbH, Technische Universität Darmstadt, Hock Beratende Ingenieure GmbH. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH - Bremen (Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 126).

Autor, Coautoren

M. Sc. Katharina Gramlich

- 2017-2020: Bachelorstudium „Bauingenieurwesen“ an der Technischen Universität München
- 2020-2022: Masterstudium „Bauingenieurwesen“ an der Technischen Universität München
- 2022: Abschluss des Studiums mit dem Grad Master of Science

Betreuer

M. Eng. Marina Brust,

M. Sc. Norbert Lillin

Die Arbeit wurde am Lehrstuhl und Prüfamnt für Verkehrswegebau der TU München mit Unterstützung des Staatlichen Bauamts in Ingolstadt angefertigt.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNGEN ZUR WIRKSAMKEIT VON ZIEGELMEHL ALS ZEMENTZUSATZSTOFF IM VERGLEICH ZU STEINKOHLEFLUGASCHE

Bachelorarbeit

Juliana, Grosser

Die Verwendung von Ziegelmehlen als Zementzusatzstoffe (SCMs) rückt in den letzten Jahren vermehrt in den Fokus der Forschung, um die Zementindustrie umweltverträglicher zu gestalten. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Wirksamkeit von Ziegelmehlen als SCMs im Vergleich zu Steinkohleflugasche (FA) und Kalksteinmehl (KS). Drei Ziegelmehle unterschiedlicher Verunreinigungsgrade (neuer, ungenutzter Ziegel (ZN), gebrauchter, sortenreiner Ziegel (ZG), Ziegel aus Bauschutt (ZB)) werden für die Versuche verwendet. Die Ziegelmehle werden durch die Bestimmung der Dichte, spezifischen Oberfläche, Partikelgröße sowie chemischen und mineralogischen Zusammensetzungen charakterisiert. Zur Prüfung der Druckfestigkeiten werden Normmörtel hergestellt, welche nach 1, 7, 14, 28 und 91 Tagen geprüft werden. Zur Abschätzung der Reaktivität der Ziegelmehle wird der R³-Test durchgeführt. Dieser ordnet die Ziegelmehle basierend auf der freigesetzten Gesamtwärme und des Portlanditverbrauchs als puzzolanische, weniger reaktive SCMs ein. Diese Einordnung wird durch die Druckfestigkeiten der ziegelmehlhaltigen Mörtel bestätigt.

Keywords: Baugewerbe, Baustoffe, Zement, Portlandzementklinker, Zementzusatzstoffe, Ziegelmehl, Druckfestigkeiten, R³-Test, Reaktivität, Portlanditverbrauch, Gesamtwärme, Puzzolanität

Zielsetzung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss von Ziegelmehl als SCM im Vergleich zu FA und KS. Ziel ist eine kritische Untersuchung des Ziegelmehls und eine Einordnung, ob dieses in Zukunft vielversprechend und sinnvoll als SCM eingesetzt werden kann, um künftig eine Reduktion der CO₂-Emissionen und einen

Rückgang des Ressourcenverbrauchs zu ermöglichen. Neben Untersuchungen zur Puzzolanität von Ziegelmehl werden die Mörtelfestigkeiten ebenso unter Verwendung von Ziegelmehl bestimmt. Weiterhin werden der Einfluss der Verunreinigung sowie eine sinnvolle Austauschrate des Ziegelmehls durch Experimente herausgearbeitet. Deshalb werden für die Versuche drei in ihrer Herkunft ver-

schiedene Ziegel verwendet, um den Einfluss von Verunreinigungen auf die Wirksamkeit der Ziegel im Zement zu untersuchen. Neben ZN und ZG wird ZB mit großen Anteilen an Ziegel sowie geringeren Mengen von Mörtelresten, Backsteinen und Keramik für die Versuche genutzt. Außerdem werden drei mögliche Austauschraten von ZN in den Experimenten getestet, um den Effekt der Ziegelmehlmenge im Zement zu betrachten. Neben der Untersuchung der Einflussfaktoren der Verunreinigung und der Austauschrate werden als Referenzen ein reiner Portlandzement sowie die Zusatzstoffe FA und KS in jedem Versuch verwendet, um die Ziegelmehle mit gebräuchlichen SCMs vergleichen und ein Fazit über das Ziegelmehl als SCM ziehen zu können. Die Arbeit umfasst folgende Experimente unter Verwendung verschiedener Ziegelmehle:

- Charakterisierung
- Prüfung der Festigkeiten
- Abschätzung der Reaktivität

Kurzschreibweise

In dieser Arbeit wird eine Kurzschreibweise für die Zusammensetzungen der verschiedenen Mörtel verwendet, welche nun an einem Beispiel erklärt wird: C80/ZN20 $\triangleq$ Mörtel mit 20 Ma.-% Austauschrate des Prüfzements (C) durch Ziegelmehl aus neuem, ungenutztem Ziegel (ZN).

Ziegelmehl als SCM?

Charakterisierung der Ziegelmehle

Die Charakterisierung ist notwendig, da physikalische, mineralogische und chemische Eigenschaften der Ziegelmehle die Mörtelfestigkeiten beeinflussen. Außerdem kann die

Reaktivität der Ziegelmehle auf Grundlage ihrer Eigenschaften abgeschätzt werden.

Die Charakterisierung zeigt, dass die Ziegelmehle eine höhere spezifische Oberfläche nach *BLAINE* als die SCMs FA und KS besitzen. Die dadurch resultierende höhere Feinheit hat Auswirkungen auf die Entwicklung der Festigkeit, Hydratationswärmeentwicklung und den Portlanditverbrauch [1]. Da die spezifische BET-Oberfläche mit steigendem Verunreinigungsgrad der Ziegelmehle zunimmt, liegt die Vermutung nahe, dass ZG und ZB aufgrund der vorhandenen Nebenbestandteile eine höhere Porosität und eine gröbere Oberflächenstruktur besitzen als ZN, welches keine Verunreinigungen aufweist. Die Ergebnisse der mineralogischen Zusammensetzungen zeigen, dass die Ziegelmehle amorphe Anteile besitzen. Da diese Anteile die reaktive Phase der SCMs sind, deuten diese auf eine Reaktivität der Ziegelmehle hin [2]. Die Untersuchung der chemischen Zusammensetzungen zeigt, dass die Ziegelmehle hohe Anteile an SiO_2 und moderate Anteile an Al_2O_3 enthalten. ZN, ZG und ZB können, wie auch FA, aufgrund der Zusammensetzung ihres amorphen Anteils als Puzzolane eingeordnet werden [3].

Prüfung der Festigkeiten der Ziegelmehle

Zur Untersuchung der Wirksamkeit von Ziegelmehlen als SCM werden die Druckfestigkeiten mittels Normmörtelprismen, bei welchen dem Zement verschiedene SCMs und Dosierungen beigelegt werden, bestimmt. Die Prüfung der Festigkeiten erfolgt nach 1, 7, 14, 28 und 91 Tagen. Die Druckfestigkeiten werden auf die Faktoren Verunreinigung sowie Austauschrate untersucht. Um den Einfluss der Verunreinigung zu erarbeiten, werden 20 Ma.-% der Zementmenge in den Mörteln durch die Ziegelmehle ZN, ZG und ZB ersetzt, um diese mit Mörteln mit

20 Ma.-% FA und KS sowie reinem Zementmörtel zu vergleichen (siehe Abbildung 1).

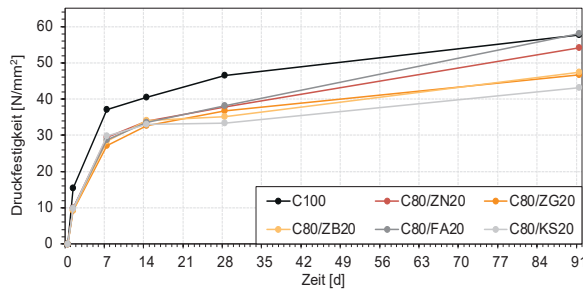


Abb. 1: Druckfestigkeiten der Mörtel in [N/mm²] mit reinem Zement (Referenz, C100) und Zementen unter Verwendung verschiedener SCMs (ZN, ZG, ZB, FA, KS) mit einer festgelegten Austauschrate von 20 Ma.-% über einen Hydratationszeitraum von 91 Tagen.

Die Ergebnisse zeigen eine Zunahme der Druckfestigkeiten aller Mörtel mit steigendem Hydratationsalter. Die Referenz C100 erreicht die höchsten Druckfestigkeiten über den Untersuchungszeitraum. Die Verringerung der Druckfestigkeiten der Mörtel, welche SCMs enthalten, entsteht aufgrund des Verdünnungseffekts in Folge des Austauschs des Zements durch die gleiche Masse an SCM. Eine Verringerung der Zementmasse führt zu einer Erhöhung des effektiven Wasser-Zement-Verhältnisses und impliziert weniger hydratisierten Zement und somit eine geringere Druckfestigkeit im Vergleich zur Referenz C100 [4]. Die Festigkeiten nach einem Tag sowie 7 und 14 Tagen zeigen kaum Unterschiede zwischen den SCMs, wodurch die zu Beginn der Hydratation dominierende Füllstoffwirkung bestätigt wurde [5]. Mit zunehmenden Hydratationsalter können Unterschiede zwischen den untersuchten SCMs festgestellt werden. C80/ZG20 und C80/ZB20 erreichen ähnliche Druckfestigkeiten wie C80/KS20 nach 91 Tagen. C80/FA20 und C80/ZN20 zeigen in hohem Hydratationsalter vergleichbare Druckfestigkeiten mit der Referenz C100, was für eine Einordnung des ZN als puzzolanisches SCM spricht.

Der Einfluss der Austauschrate auf die Festigkeiten wird durch eine variierende

Austauschrate des ZNs als SCM über einen Zeitraum von 91 Tagen erarbeitet. Die Ergebnisse der Festigkeiten der Mörtel, welchen 10, 20 oder 30 Ma.-% ZN beigefügt wurden, werden mit reinem Zementmörtel verglichen (siehe Abbildung 2).

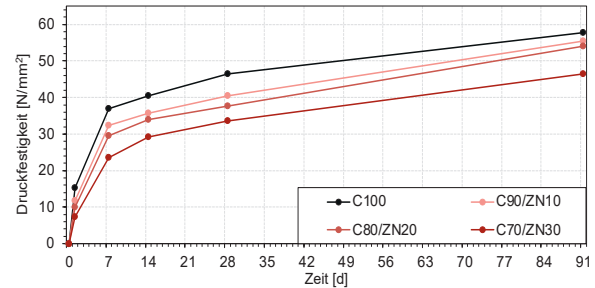


Abb. 2: Druckfestigkeiten der Mörtel in [N/mm²] mit reinem Zement (Referenz, C100) und Zementen unter Verwendung von ZN als SCM mit einer variierenden Austauschrate (10 Ma.-%, 20 Ma.-%, 30 Ma.-%) über einen Hydratationszeitraum von 91 Tagen.

Mit steigendem Hydratationsalter ist eine Zunahme der Druckfestigkeiten aller Mörtel erkennbar. Die Referenz C100 zeigt zu allen Prüfzeitpunkten die höchsten Druckfestigkeiten aufgrund des bereits erwähnten Verdünnungseffekts. Mit Erhöhung der Austauschrate an ZN nehmen jedoch die Druckfestigkeiten der Mörtel ab. Dies kann auf den mit zunehmender Austauschrate erhöhten Verdünnungseffekt zurückgeführt werden [4]. Die puzzolanische Reaktion in den Proben mit ZN kann die durch den Verdünnungseffekt entstandene Reduktion der Druckfestigkeiten nicht komplett kompensieren. Insgesamt nähern sich die Ergebnisse der Mörtel mit ZN über die Zeit der Referenz C100 an, wie ebenfalls von *O'Farrell et al.* beobachtet worden ist [6]. Nach 91 Tagen erzielten C90/ZN10 mit 55,4 N/mm² und C80/ZN20 mit 54,1 N/mm² trotz des auftretendem Verdünnungseffekts unwesentlich geringere Druckfestigkeiten als C100 mit 57,7 N/mm², wohingegen C70/ZN30 mit 46,4 N/mm² eine deutlich niedrigere Druckfestigkeit erreicht.

Die Prüfung der Festigkeiten zeigt, dass der Verunreinigungsgrad sowie die Austauschrate die Mörtelfestigkeiten beeinflussen. Auf Grundlage der Ergebnisse kann ZN mit Austauschraten von 10 bis 20 Ma.-% ohne maßgebliche Reduktion der Endfestigkeit als SCM verwendet werden.

Abschätzung der Reaktivität der Ziegelmehle

Der R^3 -Test wird zur Abschätzung der Reaktivität der Ziegelmehle im Vergleich zu FA und KS durchgeführt. Diese Methode erzielt die separierte Analyse der puzzolanischen Reaktion durch die Simulation einer Reaktionsumgebung von hydratisierendem Zement mit SCM ohne das wirkliche Vorhandensein von Zement [7]. Die Reaktivität der SCMs wird dabei durch die Messung der Gesamtwärme und des Portlanditverbrauchs bestimmt. Auf Grundlage der durchgeführten Messungen können die Ziegelmehle sowie FA und KS als puzzolanische, latent hydraulische oder inerte SCMs eingeordnet werden (siehe Abbildung 3) [8]. Hintergrund für eine puzzolanische Zuordnung ist die puzzolanische Reaktion, bei welcher das SiO_2 des SCMs mit vorhandenem Portlandit zu C-S-H-Phasen reagiert. Ein hoher Portlanditverbrauch und eine moderate bis hohe Gesamtwärme deuten demnach auf ein puzzolanisches SCM hin, da dieses während der puzzolanischen Reaktion Portlandit verbraucht und Wärme freisetzt. Der R^3 -Test ordnet die Ziegelmehle als puzzolanische, weniger reaktive SCMs aufgrund ihrer Portlanditverbräuche und der entstandenen Gesamtwärmen ein. ZN erreicht im Vergleich zu ZG und ZB die höchste Reaktivität.

Reaktivität und Druckfestigkeiten

Die durch den R^3 -Test festgestellte Reaktivität der SCMs korreliert nach Avet *et al.* mit den Druckfestigkeiten der Normmörtel über den gesamten Verlauf der Hydratation [9]. Die Ergebnisse dieser

Arbeit bestätigen die Korrelation zwischen der Reaktivität der drei Ziegelmehle und der Druckfestigkeiten der Mörtel C80/**ZN**20, C80/**ZG**20 und C80/**ZB**20.

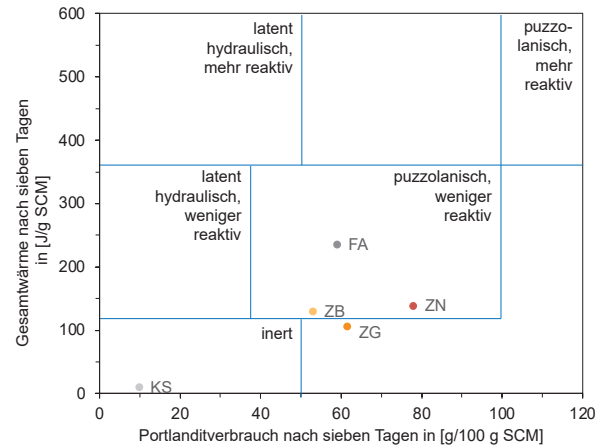


Abb. 3: Klassifikation der Zementzusatzstoffe anhand des Portlanditverbrauchs in [g/100 g SCM] sowie der Gesamtwärme in [J/g SCM] nach sieben Tagen [8].

Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend kann basierend auf den Ergebnissen der Festigkeiten und der Untersuchung der Reaktivität festgestellt werden, dass ZN ähnliche Resultate wie die untersuchte FA zeigt. ZN mit einer Austauschrate von 10 bis 20 Ma.-% hat deshalb das höchste Potenzial zukünftig als SCM genutzt zu werden.

Die Verbesserung der Umweltverträglichkeit der Zementindustrie sowie die zukünftige Knappheit von gebräuchlichen SCMs drängen zur Verwendung neuer SCMs. Da die Verfügbarkeit von Ziegelmateriale hoch ist, kann dieses zukünftig für Zement von Bedeutung werden. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche bestätigen, dass weitere Forschungsarbeiten an Ziegelmehlen sinnvoll erscheinen. Dafür könnte in zukünftigen Forschungsvorhaben der Einfluss der gezielten Carbonatisierung auf die Ziegelmehle untersucht werden, um die Festigkeiten sowie die Reaktivität zu verbessern.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen und für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen

- [1]: F. Moghaddam, V. Sirivivatnanon und K. Vessalas, "The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended cement pastes," Case Studies in Construction Materials, Bd. 10, 2019, doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00218.
- [2]: R. Kriegel und Buchwald, "Amorpher Anteil und Reaktivität von Flugaschen," 2003.
- [3]: V. F. Rahhal, M. A. Trezza, A. Tironi, C. C. Castellano, M. Pavlíková, J. Pokorný, E. F. Irassar, O. Jankovský und Z. Pavlík, "Complex Characterization and Behavior of Waste Fired Brick Powder-Portland Cement System," Materials (Basel, Switzerland), Early Access. doi: 10.3390/ma12101650.
- [4]: M. Cyr, P. Lawrence und E. Ringot, "Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength," Cement and Concrete Research, Bd. 36, Nr. 2, S. 264–277, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.07.001.
- [5]: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg., Zement-Taschenbuch, 51. Aufl. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2008.
- [6]: M. O'Farrell, B. B. Sabir und S. Wild, "Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments," Cement and Concrete Composites, Bd. 28, Nr. 9, S. 790–799, 2006, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.05.014.
- [7]: R. Snellings und K. L. Scrivener, "Rapid screening tests for supplementary cementitious materials: past and future," Mater Struct, Bd. 49, Nr. 8, S. 3265–3279, 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0718-z.
- [8]: P. Suraneni, A. Hajibabaei, S. Ramanathan, Y. Wang und J. Weiss, "New insights from reactivity testing of supplementary cementitious materials," Cement and Concrete Composites, Bd. 103, S. 331–338, 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.05.017.
- [9]: F. Avet, R. Snellings, A. Alujas Diaz, M. Ben Haha und K. Scrivener, "Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays," Cement and Concrete Research, Bd. 85, S. 1–11, 2016, doi: 10.1016/j.cemconres.2016.02.015.

Autor

Juliana Grosser, Bachelor of Science (ab März 2023), TU München

ab 2023 Masterstudentin des Bauingenieurwesens, TU München

seit 2022 Studentische Hilfskraft, Professur für Mineral Construction Materials, TU München

seit 2021 Werkstudentin, BLUES GmbH, München

2019 – 2023 Bachelorstudentin des Umweltingenieurwesens, TU München

2018 Allgemeine Hochschulreife, Theresia-Gerhardinger-Gymnasium, München

Betreuer

Die Arbeit wurde an der TUM School of Engineering and Design, Department of Materials Engineering, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), Professur für Mineral Construction Materials der TU München angefertigt. Die Betreuung erfolgte durch Prof. Dr. Alisa Machner, Dr.-Ing. Anne Heisig und Luis Schnürer, M.Sc.

Sonstiges

Die Ergebnisse der Arbeit wurden von Juliana Grosser gemeinsam mit Prof. Dr. Alisa Machner, Dr.-Ing. Anne Heisig und Luis Schnürer, M.Sc. als Konferenzbeitrag für die Internationale Baustofftagung 2023 (ibausil) eingereicht.

Die Arbeit wurde mit dem 2. Preis ausgezeichnet.

STUDIE ÜBER EINE MULTIFUNKTIONALE UND VERSETZBARE TRENNWAND IM ALBERT EINSTEIN DISCOVERY CENTER ULM

Bachelorarbeit

Antonia Hartmann

Trennwände zwischen Nutzungseinheiten in Hallen können neben Brandschutz unter anderem auch Anforderungen an Schallschutz und Durchfahrerschutz aufweisen. Im konkreten Anwendungsfall soll ein Trennwandsystem zusätzlich auch auf eine flexible Nutzung durch eine spätere örtliche Versetzung der Trennwand ausgelegt werden. Dazu wurden verschiedene gängige Konstruktionsmaterialien auf ihre Eignung für diesen konkreten Anwendungsfall untersucht und daraus Varianten zusammengestellt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Matrix mit einem Punktesystem entwickelt, welche eine gesamtheitliche Bewertung und den Vergleich der einzelnen Materialien untereinander erlaubt. Es wurden drei verschiedene Wandkonstruktionen ausgearbeitet, nachgewiesen und miteinander verglichen. Der Aufbau, welcher insbesondere unter dem Augenmerk der Versetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit am Besten abgeschlossen hat, ist eine Kombination aus einem massiven Sockel aus Betonblöcken mit einer darauf aufgesetzten leichten Trennwand. Die vorliegende Arbeit bietet somit Lösungen zu flexiblen Trennwänden in Industriehallen mit verschiedenen bauphysikalischen und konstruktiven Anforderungen und stellt eine Basis zur Entwicklung von vorgefertigten Bauteilen für diese Problemstellung dar.

Keywords: Trennwand, Brandschutz, Schallschutz, Durchfahrerschutz, Versetzbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit, Flexibilität

Anforderungen

Bauwerke und ihre Bestandteile sind entsprechend den Landesbauordnungen für eine angemessene Zeitdauer zu errichten [1].

Dementsprechend werden die verschiedensten Bauweisen für den einmaligen Einbau und die Entsorgung am Ende ihrer Lebenszeit konzipiert. Die Veränderungen in den industriellen Wertschöpfungsketten führt jedoch zunehmend dazu,

dass bestehende Produktions- und Lagerhallen nicht mehr ausschließlich von einem Unternehmen genutzt, sondern in Teilen untervermietet werden. Auch wenn das eingemietete Unternehmen zur gleichen Unternehmenskategorie gehört, so werden die vermieteten Bereiche bauordnungsrechtlich oft als eine andere Nutzungseinheit betrachtet, welche brandschutztechnisch abzutrennen ist, obwohl oder auch gerade weil der Begriff der „Nutzungseinheit“ im Gesetz nicht abschließend geklärt ist.

Einen besonderen Anwendungsfall stellt die „alte Posthalle“ in Ulm dar. In diese Industriehalle soll eine stetig wachsende Versammlungsstätte integriert werden. Dadurch bestehen weitreichende Anforderungen an die Wandkonstruktion. Die rund 28 m breite Trennwand mit einer Höhe von 6,9 m soll jeweils an die Unterzüge des Sheddachs angeschlossen werden. Des Weiteren soll die Trennwand innerhalb der Halle in regelmäßigen Abständen versetzt werden können, um die schrittweise Umnutzung der Lagerhalle zu gewährleisten. Aktuell wird die Stahlbetonhalle als Lager für Material eines Infrastrukturprojektes genutzt. Die geplante Umnutzung eines Hallenbereiches als Veranstaltungsstätte und Ausstellungsraum durch den Verein Albert Einstein Discovery Center e.V. (AEDC e.V.) führt bauordnungsrechtlich zu zwei parallelen Sonderbaunutzungen im gleichen Gebäude, welche voneinander brandschutztechnisch abzutrennen sind.

Aus dieser Teilung resultiert das Erfordernis einer tragfähigen, raumabschließenden und feuerhemmenden Trennwand, die zusätzlich den Durchfahrtschutz bei Anprall durch einen PKW und Baumaschinen von Seiten des Lagers sicherstellt. Damit die Ausstellungsräume uneingeschränkt genutzt werden können, sind außerdem eine gute Schalldämmung der Trennwand und ihre Dichtigkeit gegen eine Staub- und Geruchsbelastung wichtig. Die zentrale

Frage der Versetzbarkeit der Trennwand korreliert direkt mit der wirtschaftlichen Ausführung.

Konstruktionsmaterialien

Auf Basis dieser Anforderungen wird im ersten Schritt eine Auswahl an üblichen Bauweisen untersucht. Aus der Gruppe der leichten Trennwände werden der Metall- bzw. Holzständerbau und Gipswandbauplatten untersucht. Aus dem Gebiet des Massivbaus werden (bewehrtes) Mauerwerk, Stahlbeton, Betonfertigteile und Porenbetonelemente in die Betrachtung einbezogen. Auf Grund der besonderen Anforderungen kommen außerdem aus dem Bereich der Fassaden Sandwichelemente, Mehrfachsteplatten und Pfosten-Riegel-Fassaden in Betracht.

Um den Grad der Eignung der einzelnen Bauweisen festzustellen, werden diese in einer Matrix anhand der benötigten Eigenschaften verglichen. Die Einstufung von „++“ bis „- -“ und die anschließende Aufsummierung ergibt eine Gesamtpunktzahl, wie in Abbildung 1 dargestellt, die einen einfachen Vergleich zulässt. Zusätzlich werden Ausschlusskriterien, wie ein mangelhafter Feuerwiderstand, in die Betrachtung einbezogen

Kriterium	Holz	Betonfertigteile	Sandwichelement	Pfosten-Riegel-Fassade
Abmessungen	0	0	+	+
Brandschutz	0	+	+	+
Durchfahrtschutz	0	++	-	-
Schallschutz	+	+	-	+
Wärmeschutz	+	0	++	+
Dichtigkeit	+	0	+	+
Versetzbarkeit	0	++	+	+
optische Qualität	+	+	+	++
Anschluss	+	0	+	+
Verarbeitbarkeit	+	+	+	+
Wirtschaftlichkeit	+	+	+	-
Gesamtergebnis	7	9	8	8

Abb. 1: Auszug Bewertungsmatrix

Es wird deutlich, dass sich sowohl leichte Bauweisen wie Ständerwände, als auch Fassadenelemente gut eignen. Hervorzuheben sind die Betonfertigteile, deren Alleinstellungsmerkmal ein guter Durchfahrtschutz bei gleichzeitig gegebener Versetzbarkeit ist. Auf dieser Grundlage werden drei Varianten näher auf ihre Eigenschaften untersucht und überschlägig bemessen.

Entwurf Variante A

Die erste Variante besteht aus einem massiven Sockel aus Betonfertigteilen, auf dem eine leichte Trennwand aus Metallständern, bzw. eine Holzrahmenbauwand errichtet wird.

Die Betonblöcke mit Abmessungen von

$$b/h/l = 60/60/180 \text{ [cm]}$$

werden in drei Reihen aufeinander gestapelt. Um die horizontalen Lasten aus Anprall aufnehmen zu können, ist eine Verbindung zwischen den einzelnen Elementen notwendig. Diese wird durch das Einstecken von Stahlrohrverbindern in vorgesehene Hohlräume der Blöcke erzielt (vgl. Abb. 2).



Abb. 2 Betonblock mit Verbinder

Diese Verbinder ermöglichen nicht nur eine Übertragung von Momenten, sondern stellen auch das Mitwirken des Eigengewichts der angrenzenden Blöcke sicher. Durch seine großen Abmessungen und das damit einhergehende Eigengewicht erreicht der Betonsockel einen sehr guten Schallschutzwert von 66 dB, der konservativ abgeschätzt wurde. Laut Herstellerangaben besitzen die Blöcke mindestens eine Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten. Die trockene Montage ohne Eingriff in den Bestand ermöglicht das Versetzen und die Wiederverwendung der Blöcke.

Die aufgesetzte leichte Trennwand stellt den übrigen Raumabschluss sicher, durch den Sockel wirken nur geringe Lasten auf sie ein, sodass eine wirtschaftliche Bemessung anhand der Brand- und Schallschutzanforderungen möglich ist.

Die Metallständerwand kann nach Norm mit Standard CW-Ständerprofilen aus Stahl mit 75 x 125 mm mit einer 40 mm starken Dämmung und einer doppellagigen Beplankung mit 12,5 mm starken Gipskartonbauplatten ausgeführt werden.

Durch die Kombination mit dem Betonblock-Sockel wird die maximal zulässige Höhe dieser Wand von 6 m nicht überschritten [2]. Damit wird die Brandschutzanforderung erfüllt und ein Schalldämmmaß von 48 dB erreicht. Die Kosten dieser Variante liegen bei rund 750 € pro laufendem m Wand.

Die Alternative dazu ist die Ausführung in Holz mit $b/h = 60/100$ [mm] breiten Ständern. Auch diese leichte Trennwand muss mit einer 40 mm starken Dämmung aus Mineralwolle gefüllt und einer beidseitigen Beplankung ausgeführt werden. Diese besteht aus je einer 12,5 mm starken innenliegenden Gipskartonplatte und einer Feuerschutzplatte. Mit der gewählten Variante wird ein Schalldämmmaß von 43 dB erreicht. Die Versetzbarkeit wird durch die Ausführung als Holzrahmenbau erzielt, bei der im Vergleich zum Ständerbau großflächige Elemente vorgefertigt und als Ganzes versetzt werden können. Zuletzt ist als Vorteil der Bauweise die optische Gestaltungsfreiheit zu nennen, da sowohl eine bewusst rohe Oberfläche als auch ein Verputzen oder die Verdeckung mit Bannern möglich ist. Die Kosten dieser Ausführung belaufen sich auf ca. 1.000 € pro laufenden Meter Wand. Dieser deckt nur die einmalige Errichtung ab, nicht einberechnet sind hingegen Kosten für das Versetzen und ggf. anfallende Ersatzteile, die in Variante A durch den konsequenten Einsatz von großen Elementen gering sind. Außerdem können die Betonblöcke nach ihrem Einsatz weiterverwendet oder verkauft werden.

Entwurf Variante B

Die zweite Variante besitzt den selben Grundaufbau mit massivem Sockel, allerdings wird anstelle der leichten Trennwand eine Pfosten-Riegel-Fassade aufgesetzt. Um die geforderten Brandschutzeigenschaften zu erreichen, lassen sich diese Fassadensysteme mit zusätzlichen Bauteilen ertüchtigen, sodass eine feuerhemmende Ausführung erreicht wird. Das Schalldämmmaß hängt stark von den verwendeten Paneelen und dem konkreten Aufbau ab, sodass sich nur ein Wertebereich von 34 bis 47 dB angeben lässt [3].

Die Dichtigkeit der Konstruktion wird allein durch die Konzeption als Fassade erreicht, die per Definition auch bei Schlagregen dicht sein muss. Obwohl die Bauweise für einen permanenten Einsatz konzipiert ist, lässt sie sich auf Grund der Schaub- und Klemmverbindungen dekonstruieren. Der repräsentative Charakter der Fassade und die Möglichkeit einen Durchblick in den angrenzenden Hallenteil zu schaffen, gehen allerdings zu Lasten der Wirtschaftlichkeit, was sich in den Kosten von rund 4.400 € pro laufenden m der Wand widerspiegelt.

Entwurf Variante C

Die dritte Konstruktion wird aus Sandwichpaneele als raumabschließenden Elementen hergestellt. Diese werden horizontal an einer Unterkonstruktion aus Stahlprofilen befestigt, die im unteren Bereich durch einen waagerechten Balken für den erforderlichen Durchfahrtschutz ertüchtigt wird. Die Sandwichelemente besitzen bei einer Stärke von 100 mm einen Feuerwiderstand von F120 [3]. Allerdings kann dies analog zu einer Schachtwand nur einseitig für die Trennwand angesetzt werden. Um schutzzielorientiert den Feuerwiderstand auch von der Versammlungsstätte auf das Lager sicherzustellen, wird zusätzlich im unteren Bereich auf Seiten der Versammlungsstätte eine Vorsatzschale (siehe Abb. 3) errichtet.

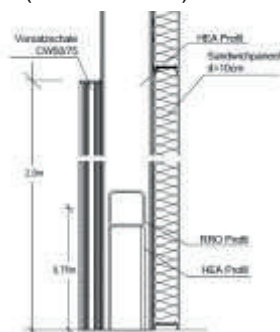


Abb. 3: Schnitt Gesamtaufbau Variante C

Diese verhindert eine direkte Brandeinwirkung auf die Unterkonstruktion im unteren Bereich. Außerdem stellt sie eine zusätzliche Widerstandsebene gegen Durchstoßen dar und verkleidet den Anprallbalken. Die Kosten dieser Variante liegen mit ca. 1.000 € pro laufenden m Wand ähnlich hoch wie die Kosten der Variante A.

Diskussion

Da alle Varianten die grundlegenden Anforderungen aus Brand- und Durchfahrtschutz erfüllen, sind für die Auswahl einer Vorzugsvariante nur die Parameter Schallschutz, Versetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu vergleichen.

Aus der direkten Gegenüberstellung dieser Werte wird deutlich, dass Variante A mit einer Holzrahmenbauwand die günstigsten Eigenschaften aufweist. Der Schallschutz von 43 dB kann bei Bedarf durch weitere Maßnahmen verbessert werden, sodass der Referenzwert von 55 dB erreicht wird. Die höheren Errichtungskosten dieser Ausführung im Vergleich zur Metallständerwand werden in einer gesamtheitlichen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durch die Einsparung beim Versetzen der Wand aufgewogen, da hier keine maßgeblichen Reparaturkosten und kein wesentlicher Materialaustausch anfallen. Im direkten Vergleich zu Variante C wird neben dem besseren Schallschutz ebenfalls die Wirtschaftlichkeit maßgebend, die in Variante A durch die Weiterverwendung, bzw. den Verkauf der Betonblöcke einen Vorteil erzielt. Die Variante B ist durch die hohen Installationskosten nicht wirtschaftlich. Jedoch wenn bei der Bewertung der einzelnen Trennwände auch gestalterischen Anforderungen des Bauherrn in die Überlegungen einbezogen werden, könnte dies die Mehrkosten rechtfertigen.

Damit ist eine Mischkonstruktion aus einem massiven Sockel aus Betonblöcken im Verkehrsbereich und einer aufgesetzten Holzrahmenbauwand unter Einhaltung aller Anforderungen aus Brand- und Durchfahrtschutz sowie der Abwägung der Schallschutzeigenschaften, der Wirtschaftlichkeit und der geforderten Versetzbarkeit die Beste Ausführungsvariante für ein Trennwandsystem innerhalb der Posthalle. Die Erkenntnisse dieser Arbeit können somit für die Entwicklung spezieller versetzbarer und standsicherer Wandsysteme herangezogen werden, die in dieser Form bisher nicht vorhanden sind.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Bayerische Bauordnung, Fassung vom 14. August 2007
- [2] MORO, J.L.; SCHLAICH, J. Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail, Bd. 3, 3. Auflage; Berlin: Springer Vieweg, 2021. ISBN 978-3-662-64154-5
- [3] RAICO BAUTECHNIK GMBH: THERM+ S-I/FS-I - Planung/Verarbeitung Stahlfassade, Brandschutz, 2018, <https://download.raico.de/de/Download/Kundenbereich/Kataloge/THERM/Brandschutz.php> [Zugriff am: 04.11.2022].
- [4] FISCHER PROFIL: FischerFIREPROOF MW 100 - Fischer Profil, 2022, <https://www.fischerprofil.de/de/fischerfireproof-mw-100/> [Zugriff am: 25.10.2022].

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- 1. JÄGER, W. Mauerwerk. In: Fouad, N.A. (Hrsg.): Lehrbuch der Hochbaukonstruktionen; Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 143-220. ISBN 978-3-519-35015-6.
- 2. BKI BAUKOSTENINFORMATIONSZENTRUM. BKI Baukosten 2022 Neubau – Statistische Kostenkennwerte für Positionen; Stuttgart: BKI, 2022. ISBN 9783948683313.
- 3. HESTERMANN, U.; RONGEN, L. Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1, 36. Auflage; Wiesbaden: Teubner, 2006. ISBN 978-3-8351-0001-5.
- 4. RUPP, G. (Hrsg.). Technologie für Stuckateure und Trockenbauer – Mit Lernfeldern, Fachrechnen und -zeichnen, Studium,, 4. überarb. und aktualisierte Auflage; Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009. ISBN 978-3-8348-0870-7.
- 5. DEMMAR GMBH: Multiblock System | Profi für Modul Sicherheitsbausteine in Bayern, 2017, <https://betonblock-demmar.de/vorteile-von-betonbloecken/demmel-multibloc-system/> [Zugriff am: 14.10.2022].
- 6. LANGE, J.; BERNER, K. Sandwichelemente im Hochbau. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Neue Normung im Hochbau, Leichtbau, Stahlbau-Kalender22. Jahrgang (2020); Berlin: Ernst & Sohn, 2020, S. 905-971. ISBN 9783433032909.
- 7. JÄGER, W. Mauerwerk. In: Fouad, N.A. (Hrsg.): Lehrbuch der Hochbaukonstruktionen; Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 143-220. ISBN 978-3-519-35015-6.

Autor

Antonia Hartmann wurde 2001 in Marktredwitz geboren. Das Abitur erhielt sie 2019 am Otto-Hahn Gymnasium Marktredwitz und begann im Anschluss ihr Studium des Bauingenieurwesens an der Ostbayerischen Technischen Hochschule in Regensburg.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät Bauingenieurwesen der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg bei Prof. Dr. Kathrin Grewolls.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

MONITORING CEMENT AND CONCRETE HYDRATION USING CODA WAVE INTERFEROMETRY

Master's Thesis

Eva Jäggle

Die Hydratation bestimmt maßgeblich die Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton. Etablierte Verfahren zur Überwachung der Hydratation sind in Bezug auf die Größe der untersuchten Proben oder den Einsatz zur in-situ Überwachung der Eigenschaftsentwicklung in Bauteilen begrenzt. In dieser Arbeit wurden Methoden der Ultraschall basierten Coda Wellen Interferometrie (CWI) verwendet, um die frühe Phase der Hydratation bis zu 24 Stunden in-situ zu überwachen und mit Hilfe konventioneller Methoden zu charakterisieren. Die Untersuchungen an Zementleimen und Beton lieferten reproduzierbare Trends der Ultraschallsignalentwicklung. Die Ergebnisse der CWI-Analyse konnten zudem mit zugrundeliegenden Mechanismen wie dem Main Hydration Peak und der Ettringitbildung nach Erschöpfung der Kalziumsulfate in Verbindung gebracht werden. Das Potential für eine großskalige Anwendung der Methode zur kosteneffizienten in-situ Überwachung hydratationsspezifischer Phänomene konnte hierdurch aufgezeigt werden.

Keywords: Hydratation, Dauerhaftigkeit, Ultraschall, Coda Wellen Interferometrie, in-situ Überwachung

Die Hydratation

Die Entwicklung eines festen Gefüges durch Bildung von Hydraten bewirkt im Verlauf der Hydratation den Übergang der initial fluiden Mischung zu einem festen Material [1, 2].

Die Charakterisierung und Überwachung der exothermen Hydratation erfolgt häufig mit kalorimetrischen Methoden. Hierbei wird die bei der Reaktion freiwerdende Wärme als Ausdruck der Reaktivität über die Zeit evaluiert. Wird die Reaktion isotherm durchgeführt, zeigt der Wärmefluss eines gewöhnlichen Portlandzements (OPC) den in Abbildung 1 dargestellten typischen Verlauf.

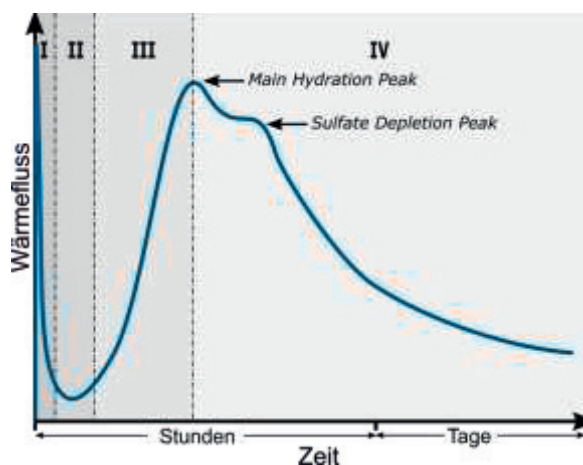


Abbildung 1: Typischer isothermer Wärmefluss eines Portlandzements während der Hydratation. Einteilung in vier Hauptphasen [1].

Nach einer initialen starken Reaktion (I) flacht diese und der damit verbundene Wärmefluss ab. In der anschließenden dormanten Phase (II) werden wenige Hydrate gebildet und es kommt zu keinem signifikanten Strukturaufbau. Eine erneute Intensivierung der Reaktion führt zur Ausbildung eines Wärmepeaks (III), welcher auch als *Main Hydration Peak* bezeichnet wird. In dieser Phase wird überwiegend C-S-H und Portlandit gebildet und es erfolgt der Aufbau einer initialen Festigkeit. Nach einigen Stunden wird ein Wärmeflussmaximum erreicht, wonach die Reaktion stetig, aber niemals vollständig zurückgeht (IV). [1]

Um den Strukturaufbau durch das bei der Hauptreaktion gebildete C-S-H und Portlandit nicht zu stören und ein unerwünscht frühes Erstarren der Mischung zu verhindern, wird die Bildung von Ettringit durch die Zugabe von Kalziumsulfaten verzögert [1]. Sind die Mengenverhältnisse richtig eingestellt, werden die Kalziumsulfate erst nach dem *Main Hydration Peak* aufgebraucht und es kommt erst dann zu einer verstärkten Ettringitbildung. Im Wärmeflussdiagramm ist diese Reaktion dann häufig als zweiter, kleinerer Peak oder Schulter (*Sulfate Depletion Peak*) zu erkennen.

Problemstellung

Derzeit gängige Methoden für die Untersuchung der Hydratation sind beschränkt auf Labormesstechnik und die Analyse von Proben mit Abmessungen von wenigen Milli- oder Zentimetern. Hierdurch ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf große Materialmengen und die Anwendung dieser Methoden bei realen Bauteilen eingeschränkt.

Zielsetzung

Ziel war es, die Anwendung von Methoden der Ultraschall basierten Coda-Wellen-Interferometrie für die Überwachung der frühen Zementhydratation (bis 24 h) breit aufgestellt zu untersuchen. Hierzu sollte die Hydratation für

verschiedene Zemente konventionell und mittels thermodynamischer Modellierung charakterisiert werden. Diese Informationen sollten im Anschluss für die Interpretation von Ultraschall basierten CWI-Auswertungen herangezogen werden.

Coda Wellen Interferometrie

Transmissionsverfahren mittels Ultraschall für die Hydratationsüberwachung auf dem Stand der Technik evaluieren die Entwicklung der direkten Welle über die Zeit [2]. Für die kosteneffiziente Überwachung von Stahlbetonstrukturen wird derzeit die Ultraschall basierte Coda-Wellen-Interferometrie (CWI) erforscht. Die CWI nutzt mehrfach gestreute Wellen zur Erkennung selbst marginaler Materialveränderungen [3, 4]. Der Begriff Coda bezieht sich dabei auf den späten Teil des Ultraschallsignals [5], der Informationen aus diesen Wellen enthält. Die gestreuten Wellen durchlaufen das Material ausgiebig, die Coda ist daher empfindlicher für Materialveränderungen als die direkte Welle.

Bei der CWI werden zwei Ultraschallwellen, die zu unterschiedlichen Zeiten aufgezeichnet wurden (Signal und Referenz), durch einen Korrelationskoeffizienten verglichen [3, 4]. Hierfür wird bei der *stretching technique* [6] das Signal gestreckt oder gestaucht, sodass der Korrelationskoeffizient CC zwischen Signal und Referenz maximiert wird. Der Streckungsfaktor ε entspricht dabei der Geschwindigkeitsvariation dv/v .

Bei Verwendung eines schrittweisen Referenzsignals kann zusätzlich die kumulierte Geschwindigkeitsvariation ε_c berechnet werden.

Ist die (kumulierte) Geschwindigkeitsvariation ungleich Null, hat sich das Signal – und folglich das untersuchte Material verändert. Negative Werte zeigen dabei eine Beschleunigung der Wellenausbreitung (z.B. aufgrund von Erstarrung) an. Der zugehörige Korrelationskoeffizient gibt Aufschluss darüber, wie gut die Veränderung in der Wellenform durch reine Streckung oder Stauchung aufgeklärt wird.

Diewald et al. [7] untersuchten die frühe Hydratation eines Betons mit CWI-Methoden und verglichen ihre Ergebnisse mit konventionellem Monitoring. Sie identifizierten grundlegende Trends, ließen die Interpretation der CWI-Parameter im Kontext hydrationspezifischer Phänomene jedoch weitgehend offen.

Experimentelle Untersuchungen

Die Untersuchungen umfassten zwei OPCs des Typs CEM I 42.5 R und CEM I 52.5 R, sowie einen Zement des Typs CEM II/A-LL 42.5 R. Alle Mischungen wurden mit einem Wasser/Zement-Wert von 0.45 hergestellt.

Für die Ultraschalluntersuchungen wurde ein Zementleim pro Zement und für CEM I 42.5 R zusätzlich eine Betonmischung hergestellt. Die Aufzeichnung der Ultraschallsignale während der ersten 24 h erfolgte mit eingebetteten Ultraschallsensoren entsprechend dem in Abbildung 2 gezeigten Aufbau.

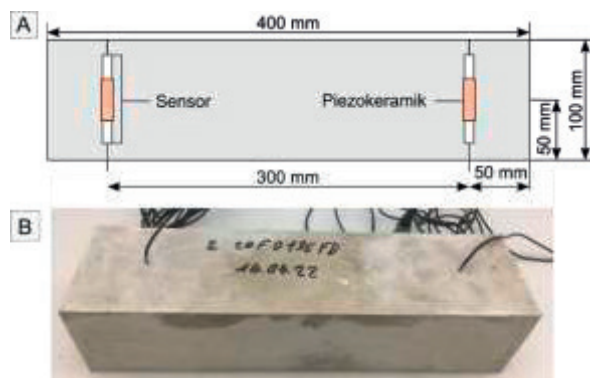


Abbildung 2: Versuchsaufbau für die Aufzeichnung von Ultraschallsignalen. (A) Schematischer Aufbau der 400x100x100 mm³ Probe mit zwei eingebetteten Sensoren. (B) Erstarrender Zementleim-Probekörper mit zwei eingebetteten Sensoren nach dem Ausschalen.

Für jeden Zement wurde die Hydratation zudem mit isothermer und semi-adiabatischer Kalorimetrie, thermogravimetrischer Analyse, quantitativer Röntgendiffraktometrie und Vicat-Tests konventionell untersucht. Ergänzend wurde auf Basis der Phasenzusammensetzung eine thermodynamische Simulation durchgeführt.

Ergebnisse und Diskussion

Mit Hilfe der konventionellen Methoden und thermodynamischen Simulation konnte für jeden Zement die Hydratation charakterisiert werden. Die Zemente unterschieden sich hauptsächlich in ihrer Reaktivität (Kinetik) und der Ausprägung des Sulfate Depletion Peaks.

Die Ultraschalluntersuchungen an Zementleimen und Beton lieferten reproduzierbare Verläufe in der Signalentwicklung in Übereinstimmung mit in der Literatur [2] beschriebenen Trends. Typische Signale sind in Abbildung 3 dargestellt. Dies zeigt, dass der verwendete Messaufbau geeignet ist, um die Entwicklung der Ultraschallwelle während der frühen Hydratation in-situ zu verfolgen.

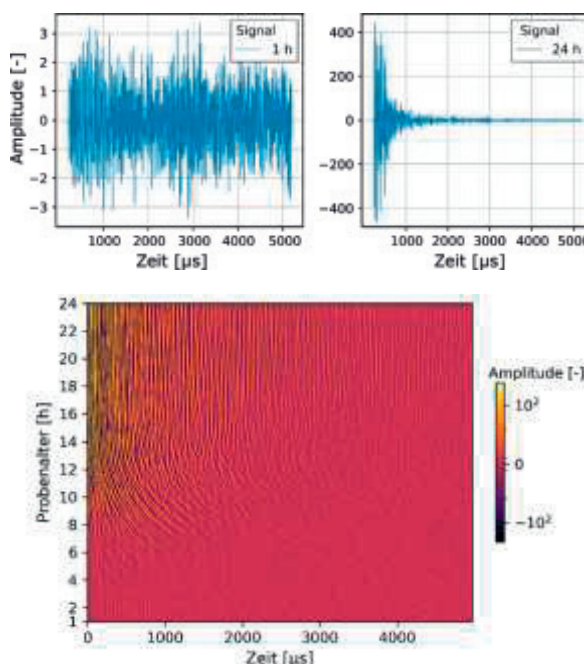
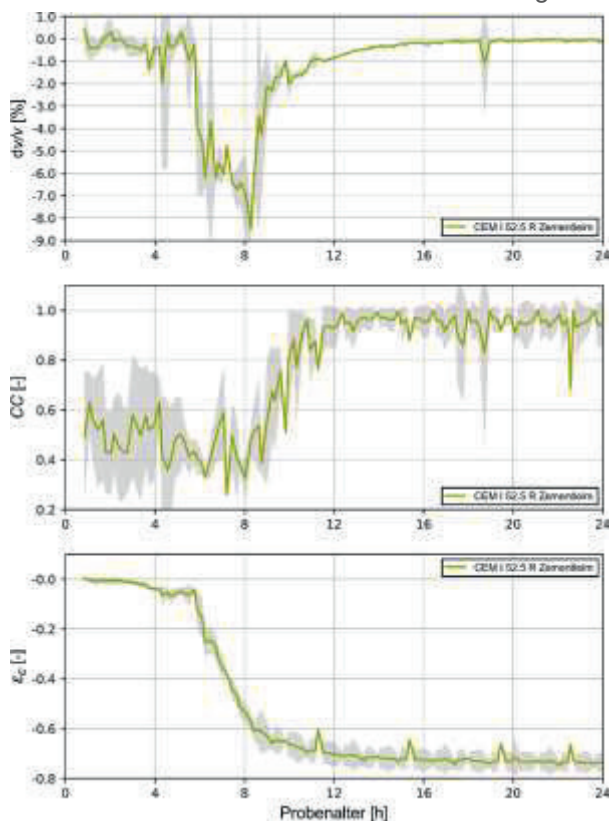


Abbildung 3: Typische Entwicklung der Signale während der frühen Hydratation. Aufbereitete Signale 1 h und 24 h nach Wasserzugabe (oben). Aufbereitete Signale zwischen 1 h und 24 h (unten).

Die Auswertung der CWI-Parameter zeigte Zementart übergreifend sowie für Zementstein und Beton Verläufe mit wiederkehrenden Charakteristika. Beispielhaft sind die Ergebnisse der CWI-Auswertung für CEM I 52.5 R und CEM II/A-LL 42.5 R Zementleim in Abbildung 4 dargestellt. Für alle Mischungen stimmen die

übergeordneten Trends mit den Beobachtungen von Diewald et al. [7] überein.

In den ersten Stunden nach Wasserzugabe schwankt dv/v um Null und der CC ist niedrig. Rauschen dominiert in dieser Zeit das Signal.



Während einer zweiten Phase nimmt dv/v negative Werte an (Geschwindigkeitsanstieg). Sowohl dv/v als auch CC konvergieren schließlich gegen 0 bzw. 1, da sich die Signale nach Erstarrung des Materials stabilisieren.

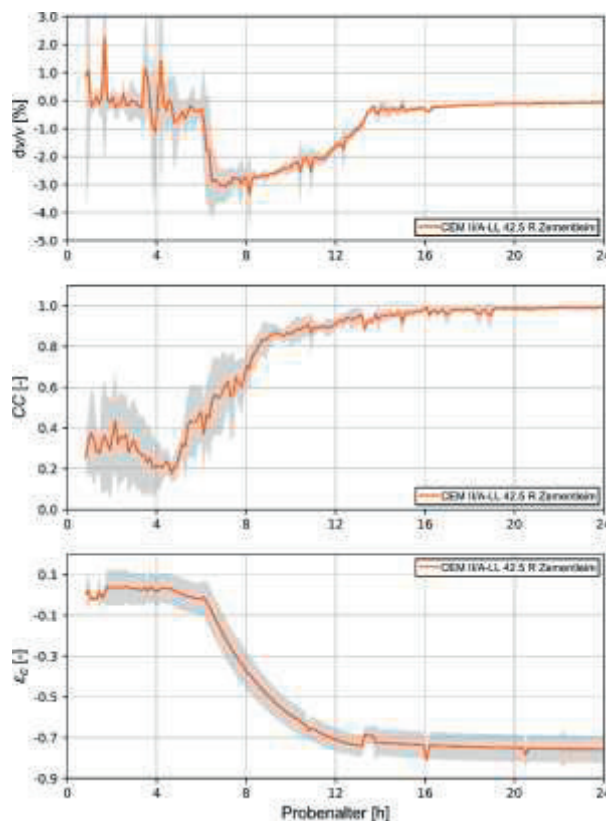


Abbildung 4: Ergebnisse der CWI-Auswertung mit schrittweisem Vergleich für CEM I 52.5 R Zementleim (links) und CEM II/A-LL 42.5 R Zementleim (rechts): Geschwindigkeitsvariation dv/v , Korrelationskoeffizient CC und kumulative Geschwindigkeitsvariation ε_c . Durchschnittswerte (bunte Linien) und Standardabweichung (grauer Bereich).

Die Geschwindigkeitsvariation dv/v erscheint als besonders vielversprechend für die Gewinnung von detaillierten Informationen über die Entwicklung des Materialgefüges. Die jeweilige Ausprägung des Verlaufs variiert dabei in Abhängigkeit des betrachteten Zements. In diesem Zusammenhang wurde diskutiert, dass die Entwicklung von dv/v die zugrundeliegende Hydratationskinetik widerspiegelt. Zudem wurde die Hypothese entwickelt, dass der Main Hydration Peak sowie der Sulfate Depletion Peak als lokale Kurvenminima der Geschwindigkeitsvariation beobachtbar sind.

Die Interpretation der CWI-Parameter durch Vergleich mit konventionellen Methoden wurde dabei wesentlich durch Temperaturunterschiede

von bis zu bis zu 15 C zwischen konventionellem und Ultraschall basierten Monitoring beschränkt.

Fazit und Ausblick

Das Potential von Ultraschall und CWI basierten Methoden für die Hydratationsüberwachung konnte durch die Ergebnisse dieser Arbeit aufgezeigt werden. Die Verwendung von eingebetteten Ultraschallsensoren ermöglicht die robuste in-situ Überwachung mikrostruktureller Materialentwicklungen mit größeren Probenmaßstäben als mit konventionellen Methoden. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um die diskutierte Interpretation der CWI-Parameter zu validieren und die Anwendbarkeit der Methode auf Strukturen im Bauwerksmaßstab zu prüfen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] H. F. W. Taylor, *Cement Chemistry*, 2nd ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997.
- [2] I. Gabrijel, S. Staquet, M. Krüger, J. Carette, C. U. Grosse, and G. Trtnik, "Ultrasonic Techniques for Determination and Monitoring Various Properties of Cementitious Materials at Early Ages," in *Springer Tracts in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2020, pp. 23–68. doi: 10.1007/978-3-030-39738-8_2.
- [3] T. Planès and E. Larose, "A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete," *Cem Concr Res*, vol. 53, pp. 248–255, 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.07.009.
- [4] R. Snieder, "The theory of coda wave interferometry," *Pure Appl Geophys*, vol. 163, no. 2–3, pp. 455–473, Mar. 2006, doi: 10.1007/s00024-005-0026-6.
- [5] K. Aki, "Theory of Earthquake Prediction with Special Reference to Monitoring of the Quality Factor of Lithosphere by the Coda Method," in *Practical Approaches to Earthquake Prediction and Warning*, Dordrecht: Springer Netherlands, 1985, pp. 219–230. doi: 10.1007/978-94-017-2738-9_2.
- [6] O. I. Lobkis and R. L. Weaver, "Coda-Wave Interferometry in Finite Solids: Recovery of P-to-S Conversion Rates in an Elastodynamic Billiard," *Phys Rev Lett*, vol. 90, no. 25, p. 254302, Jun. 2003, doi: 10.1103/PhysRevLett.90.254302.
- [7] F. Diewald, L. Irbe, T. Kränkel, A. Machner, and C. Gehlen, "Monitoring Early Cement Hydration with Coda Wave Interferometry," in *Proceedings of the 13th International Workshop on Structural Health Monitoring*, 2022, pp. 141–148. 26-6.

Für die Arbeit darüber hinaus vordergründig verwendete Quellen:

- 1. B. Lothenbach and M. Zajac, "Application of thermodynamic modelling to hydrated cements," *Cement and Concrete Research*, vol. 123. Elsevier Ltd, Sep. 01, 2019. doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105779.
- 2. K. Scrivener, A. Ouzia, P. Juilland, and A. Kunhi Mohamed, "Advances in understanding cement hydration mechanisms," *Cement and Concrete Research*, vol. 124, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105823.

Autor

Eva Jäggle, M.Sc.

Seit 2022	Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen, TU München
2020 – 2022	Masterstudium, Management & Technology, TU München
2019 – 2022	Wissenschaftliche Hilfskraft, Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen, TU München
2016 – 2020	Bachelorstudium, Management & Technology, TU München

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen (Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Christoph Gehlen), Department of Materials Engineering, TUM School of Engineering and Design der TU München. Die Arbeit wurde betreut von Fabian Diewald, M.Sc. am Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen in Kooperation mit Prof. Dr. Alisa Machner (Professur für Mineral Construction Materials).

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNG VON ALTERNATIVEN BINDEMITTELN, DEREN EINSATZBEREICHE UND WIRTSCHAFTLICHKEITS- BETRACHTUNG

Bachelorarbeit

Lisa Kellermann

Angesichts der knapper werdenden natürlichen Ressourcen ist nachhaltiges Bauen von wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Bedeutung. So wird auch im Bereich des Erdbaus ein möglichst geringer Verbrauch von Primärrohstoffen angestrebt. Die Behandlung von Boden mit Bindemitteln zur Verbesserung der bautechnischen Eigenschaften wird derzeit überwiegend mit klassischen Bindemitteln (Kalk, Zement, etc.) durchgeführt. Um diese teuren und wenig nachhaltigen Bindemittel zu ersetzen, wird nach Alternativen, vorrangig Sekundärrohstoffe, gesucht. Ein direkter Vergleich zwischen einem klassischen Bindemittel und Papier-, Flugasche und Kesselsand zeigt, dass für eine einfache Bodenverbesserung durch Wassergehaltsreduktion Papier- und Flugasche gut geeignet sind. Für eine qualifizierte Bodenverbesserung erwies sich Papierasche als anwendbare Alternative. Kesselsand ist für keinerlei Bodenverbesserung brauchbar. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit ist sowohl die Flug- als auch die Papierasche bei höheren Wassergehaltsreduktionen weitaus wirtschaftlicher als das Klassische. Zur Erlangung der Druckfestigkeitsanforderung zeigte sich die Papierasche bis zu einer bestimmten Druckfestigkeit als wirtschaftlicheres Bindemittel. Eine umwelttechnische Betrachtung der alternativen Bindemittel ergab, dass sich die Chemie des Bodens (z.B. pH-Wert, Leitfähigkeit, Elution von Schwermetallen) durch deren Zugabe nicht verschlechtert.

Keywords: Bodenverbesserung, Bindemittel, Wassergehaltsreduktion, Druckfestigkeitsentwicklung, Wirtschaftlichkeit

Grundlegendes

Auf jeder Baustelle werden unterschiedliche Böden angetroffen. Da jeder Boden verschiedene

Eigenschaften besitzt, müssen diese mit Laborversuchen bestimmt und hinsichtlich ihrer bautechnischen Merkmale und der damit verbundenen Verwendbarkeit klassifiziert werden. Wenn

die benötigten Eigenschaften mit dem anfallenden Boden nicht erreicht werden können, kommt eine Bodenverbesserung mit Bindemitteln zum Einsatz, um die Beschaffenheit des Bodens zu verbessern und ihm einen höheren Verwendungszweck zuzuführen.

Die Wahl der Bindemittelart ist abhängig vom Zweck der Bodenverbesserung. Es wird zwischen drei ausschlaggebenden Anforderungen, die das Bindemittel umsetzen soll, unterschieden [1]:

- Einfache Bodenverbesserung:
für eine Wassergehaltsreduktion
- Qualifizierte Bodenverbesserung:
für eine Druckfestigkeitserhöhung
- Bodenverfestigung:
für das Herstellen einer Frostsicherheit

Klassische und alternative Bindemittel

Hierbei wurde zwischen klassischen und alternativen Bindemitteln differenziert. In der Regel kommen klassische Bindemittel, wie Kalk und Zement oder eine Mischung aus beidem, zum Einsatz [2].

Aufgrund der aktuellen Ressourcenknappheit gewinnen alternative Bindemittel immer mehr an Bedeutung. Daher wurden verschiedene Bindemittel am Beispiel einer konkreten Baumaßnahme hinsichtlich zweier Prüfmerkmale (Wassergehaltsreduktion und Druckfestigkeitsentwicklung) untersucht und miteinander verglichen.

Beschreibung der Versuchsreihe

Die Versuchsreihe wurde an einem homogenen feinkörnigen Boden durchgeführt [3], da hier eine Wassergehaltsreduktion und die Festigkeitsentwicklung besonders gut ersichtlich sind. Anhand dieses Bodens wird untersucht, ob auch alternative Bindemittel für eine Bodenbehandlung geeignet sind.

Hierfür wurde das Ausgangsmaterial einer Eignungsprüfung unterzogen und verschiedene Indexversuche durchgeführt. Des Weiteren erfolgte eine abfallrechtliche Einstufung des vorliegenden Bodens [4] und die Ermittlung der resultierenden Belastungsklasse. Nach Abschluss dessen wurden Proctorversuche an unterschiedlichen Boden-Bindemittel-Gemischen mit verschiedenen Bindemittel- und Wassergehalten durchgeführt, um den jeweils optimalen Wassergehalt herauszufinden. Bei den verwendeten Bindemitteln im Boden-Bindemittel-Gemisch handelte es sich um:

- Bodenbinder 300
- Papierasche Cinerit:
fällt als Nebenprodukt bei der thermischen Verwertung biogener Reststoffe an.
- Flugasche Powerment:
entsteht aus Steinkohle im Kohlekraftwerk bei der Strom- und Wärmeerzeugung.
- Kesselsand Powersint:
entsteht im gleichen Herstellungsprozess wie Flugasche, nimmt aber nicht den Weg zum Elektrofilter.

Entsprechend der Vorgaben der Technischen Prüfvorschriften [1] wurden Ausgangs- und reduzierter Wassergehalt, Proctordichte (vgl. Abb. 1) und optimaler Wassergehalt ermittelt. Darauf folgend wurden Probekörper mit optimalem Wassergehalt und unterschiedlichen Bindemittelgehalten angefertigt.

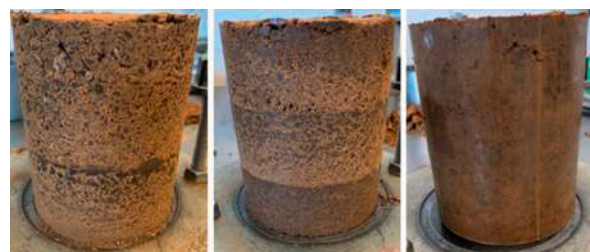


Abb. 1: Proctorversuche an Boden-Flugasche-Gemischen

Die Probekörper sind auf ihre einaxiale Druckfestigkeit nach Feuchtraum- und Wasserlagerung untersucht worden. Außerdem wurde vom Ausgangsboden, von jedem Bindemittel sowie den

3%-haltigen Boden-Bindemittel-Gemischen eine chemische Analyse eingeholt.

Der direkte Vergleich zwischen einem klassischen Bodenbinder 300 und mehreren alternativen Bindemitteln brachte mittels der durchgeführten Laboruntersuchungen Aufschluss über die jeweiligen Anwendungsfelder und Einsatzmöglichkeiten.

Ergebnisse bezüglich der Wassergehaltsreduktion

Wird eine einfache Bodenverbesserung durch Wassergehaltsreduktion beabsichtigt, lässt sich gemäß Abbildung 2 feststellen, dass Flugasche zwar am Anfang geringfügig wirksamer als Papierasche ist, aber bei Betrachtung des Verlaufes insgesamt am schlechtesten abschneidet. Bodenbinder 300 und Flugasche weisen einen nahezu gleichen Anstieg auf, wobei das Niveau des Bodenbinders 300 durchgehend etwas höher liegt.

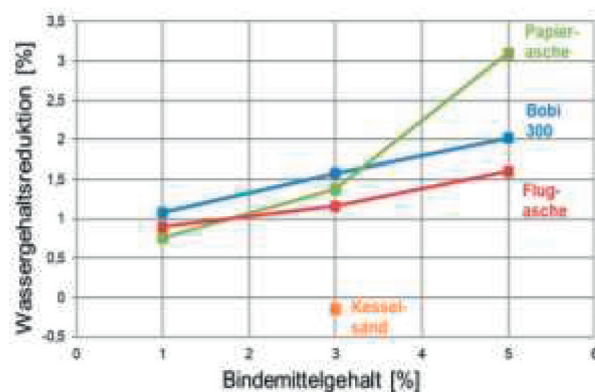


Abb. 2: Wassergehaltsreduktion in Abhängigkeit der Bindemittelmenge

Gemäß der Grafik erreicht Papierasche bei einem Gehalt von ca. 3,3% die Wirksamkeit von Bodenbinder 300. Bei allem was darüber hinausgeht, weist das alternative Bindemittel Papierasche eine bessere Wassergehaltsreduktion auf als der klassische Bodenbinder 300.

Für eine geringe Wassergehaltsreduktion können alle drei Bindemittel eingesetzt werden. Lediglich Kesselsand ist für keinerlei Bodenverbesserung

brauchbar, da er weder eine Wassergehaltsreduktion noch eine Festigkeitsentwicklung mit sich bringt. Bei hohen Wassergehaltsreduktionen ist Papierasche am besten geeignet.

Ergebnisse bezüglich der Druckfestigkeitsentwicklung

Alle Kesselsand-Probekörper sowie auch die 5%-Flugasche-Probekörper sind in der Wasserlagerung zerfallen, weshalb keine Druckfestigkeit nachgewiesen werden konnte. Die niedrige Druckfestigkeit bei geringem Flugaschegehalt wurde bei steigendem Bindemittelgehalt immer geringer, bis sie bei 5% der Wasserlagerung nicht mehr standhalten konnte (vgl. Abb. 3). Papierasche hatte bei 1% Gehalt dieselbe Druckfestigkeit wie Bodenbinder 300, zeigte aber erst bei über 3% Bindemittelgehalt höhere Druckfestigkeiten. Bodenbinder 300 bewirkte die größte Druckfestigkeitssteigerung.

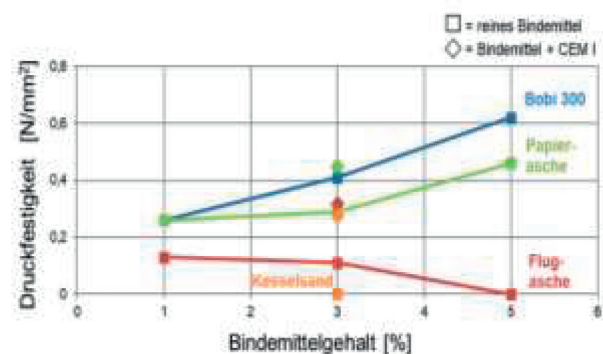


Abb. 3: Gemittelte einaxiale Druckfestigkeiten nach 27d + 1d Wasserlagerung

Zusätzlich zur reinen Bindemittelzugabe wurde auch eine Kombination aus 3% des jeweiligen alternativen Bindemittels mit 1% CEM I untersucht. Die Zugabe von CEM I bewirkte zwar bei jedem Bindemittel eine Festigkeitssteigerung, aber die notwendigen Kriterien konnten nach der Wasserlagerung dennoch nicht erreicht werden.

Die Anforderungen für eine qualifizierte Bodenverbesserung wurden bei dem klassischen Bodenbinder 300 erfüllt, was dessen geläufigen Einsatz rechtfertigt. Nur die Papierasche konnte bei 5% Bindemittelgehalt als einziges alternatives

Bindemittel den Anforderungen einer qualifizierten Bodenverbesserung gerecht werden.

Wirtschaftlichkeitsvergleich hinsichtlich der Wassergehaltsreduktion

Der Bindemittelvergleich im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit brachte Erkenntnisse über die Einsatzmöglichkeiten und Grenzen aus unternehmerischer Sicht. Der Erfolg einer Bodenbehandlung mit Bindemitteln hängt vom Verhältnis der erzielten Druckfestigkeit bzw. Wassergehaltsreduktion zu den aufgewendeten Kosten ab. Eine Bodenverbesserung ist nur dann wirtschaftlich, wenn das ausgewählte Bindemittel im Vergleich zum Preis eine hohe Wirksamkeit aufweist.

Der Einsatz alternativer Bindemittel für eine 1%-ige Wassergehaltsreduktion ist bei Papierasche um 83% und bei Flugasche um 39% teurer, als die Verwendung des konventionellen Bodenbinders 300. Ab einer Wassergehaltsreduktion von 1,18% erweist sich der Einsatz von Flug- und Papierasche als preisgünstiger. Mit steigender Wassergehaltsreduktion sind beide alternativen Bindemittel weitaus wirtschaftlicher als der Einsatz des Bodenbinders 300.

So können beispielsweise mit der Verwendung von Papierasche im Gegensatz zu Bodenbinder 300 bereits bei 2% Wassergehaltsreduktion die Kosten mehr als halbiert werden (1,29 €/m² anstatt 2,75 €/m²). Die Rentabilität der alternativen Bindemittel nimmt bei steigender Wassergehaltsreduktion immer weiter zu.

Wirtschaftlichkeitsvergleich hinsichtlich der Druckfestigkeit

Beim Vergleich der Wirtschaftlichkeit hinsichtlich der einaxialen Druckfestigkeiten für eine qualifizierte Bodenverbesserung wird lediglich die Papierasche dem klassischen Bodenbinder 300 gegenübergestellt. Die alternativen Bindemittel Flugasche und Kesselsand werden wegen ihrer

geringen Druckfestigkeitsentwicklung bzw. des Druckfestigkeitsabfalls nicht betrachtet.

Hieraus wird ersichtlich, dass für den untersuchten Boden bis zu einer Druckfestigkeit von < 0,70 N/mm² die Verwendung der Papierasche die wirtschaftlichere Möglichkeit darstellt. Es wird zwar mehr Papierasche benötigt, um die gleiche Druckfestigkeit des Bodenbinders 300 zu erreichen, doch der niedrigere Preis des alternativen Bindemittels zahlt sich bis zu einem Gehalt von 5,7% Papierasche aus.

Für eine Druckfestigkeit von 0,70 N/mm², die bei einem Papieraschegehalt von 5,8% oder einem Bodenbinder 300-Gehalt von 3,8% erreicht wird, sind die Kosten mit 2,16 €/m² identisch. Erst bei höheren Druckfestigkeiten und den damit verbundenen Mehrmengen an Bindemittel erweist sich der Einsatz von Bodenbinder 300 als wirtschaftlicher.

Chemische Analyse

Obwohl es sich bei den alternativen Bindemitteln um Abfallprodukte handelt, ergab die umwelttechnische Betrachtung, dass sie alle die Anforderungen von klassischen Bindemitteln einhalten und sich die Chemie des Bodens (pH-Wert, Leitfähigkeit, Elution von Schwermetallen) durch deren Zugabe nicht verschlechtert.

Bisherige Vergleichsuntersuchungen

Bei der Betrachtung von Vergleichsuntersuchungen wird ebenfalls das Potential der Sekundärrohstoffe hinsichtlich ihrer Wirkungsweise für eine baustoffliche Verwendung verdeutlicht. Allerdings ist auch hier noch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich verschiedener Faktoren (Reaktionszeit, Verhältnis der Mischung, Grad der Feinheit der Bindemittel, etc.) notwendig, um eine zukunftsfähige Alternative zu schaffen. Insbesondere das Zusammenspiel dieser Faktoren kann das Ergebnis ausschlaggebend beeinflussen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (2012): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB). Teil B 11.1. Köln: FGSV-Verlag; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (2010): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB). Teil B 11.3. Köln: FGSV-Verlag.
- [2]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (2021): Merkblatt über Bodenbehandlungen mit Bindemitteln (M BmB). Köln: FGSV-Verlag.
- [3]: Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18196:2011-05. Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für Bautechnische Zwecke. Berlin: Beuth Verlag.
- [4]: o.V. (2007): Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums für die Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial - Baden-Württemberg (VwV Boden).

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (2017): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB 17). Köln: FGSV-Verlag.
2. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (2004): Merkblatt über Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln. Köln: FGSV-Verlag.
3. Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18127:2012-09. Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch. Berlin: Beuth Verlag.

Autor

Lisa Kellermann

Bachelor of Engineering

2018 Abitur am Christian-von-Bomhard-Gymnasium in Uffenheim

2018-2022 Bachelorstudium der Fachrichtung Bauingenieurwesen (B. Eng.) an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg – Schweinfurt

Seit 2022 Masterstudium der Fachrichtung Baumanagement (M. Eng.) an der Hochschule Karlsruhe

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg – Schweinfurt, im Fachbereich Geotechnik unter der Betreuung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Benjamin Aulbach und der Firma Leonhard Weiss GmbH & Co. KG in Bad Mergentheim.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

DIGITALER ZWILLING FÜR DAS ROAD ASSET MANAGEMENT

Bachelorarbeit

Kristina, Kroner

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Erstellung eines digitalen Zwillings einer Straße im Bestand für das Road Asset Management. Digitale Zwillinge werden in der Infrastruktur bereits integriert und als Planungs- und Kommunikationswerkzeug genutzt. Jedoch fehlt die Anwendung digitaler Zwillinge in der Instandhaltung der Straßen. Aufgrund dessen wird untersucht, wie ein realitätsnahes und verformungsgerechtes 3D-Modell einer Bestandsstraße modelliert werden kann und welche Vorteile das Arbeiten mit einem digitalen Zwilling für eine Kommune in der Straßenerhaltungsplanung sowie in der Baupraxis bietet. Für einen strukturierten Prozess wird auf die Methode Building Information Modeling (BIM) eingegangen. Anhand der Anwendungsfälle des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV), wird ein digitaler Zwilling mit semantischen Informationen des Erhaltungsmanagements und ein dazugehöriges Handbuch erstellt. Das Ergebnis ist ein BIM-fähiger digitaler Zwilling, welcher sich als Basis für den BIM-Workflow im Bestand und in der Erhaltung eignet.

Keywords: Digitaler Zwilling, Erhaltungsmanagement, Building Information Modeling, digitale Lösungen

Ausgangslage

Die Arbeitsweisen verändern sich und die Digitalisierung schreitet weiter voran. Das zeigt die Telekom-Studie „Digitalisierungsindex Mittelstand 2021/2022“. In dieser Studie wurden rund 2000 Unternehmen online befragt und ein Digitalisierungsindex berechnet. Der durchschnittliche Index liegt bei 59 von 100 möglichen Punkten. Die Baubranche erreicht mit 53 Punkten die geringste Punktzahl und liegt somit unter dem Durchschnitt [1]. Der Ausbau und die Anwendung digitaler Prozesse ist in der Baubranche aufgrund dessen

ein wichtiges und aktuelles Thema. In einer PwC-Studie vom Dezember 2021 stellte sich heraus, dass im Bereich „digitale Lösungen“ noch großer Nachholbedarf besteht. In dieser Studie wurde die Anwendung digitaler Lösungen von den Befragten zu 62% als ausbaufähig bewertet [2]. Zu den digitalen Lösungen gehört unter anderem die realitätsnahe digitale Abbildung eines Bauwerks. Durch die Verknüpfung mit semantischen Informationen ist ein digitaler Zwilling ein virtuelles Modell, welches ein schnelleres und effektiveres Arbeiten ermöglicht. In der Infrastrukturplanung sind digitale Zwillinge

bereits integriert und werden als Planungs- und Kommunikationswerkzeug genutzt. Jedoch fehlt die Anwendung digitaler Zwillinge in der Instandhaltung der Straßen. Sowohl in der Ausführung als auch in der Nutzungsphase entstehen bereits Abweichungen zur Planung. Um die Verformungen und Straßenzustände aufnehmen zu können, werden bei der Erstellung digitaler Zwillinge von Bestandsstraßendementsprechend angepasste Herangehensweisen und geeignete Arbeitsmethoden benötigt.

BIM-Methode

Eine passende Arbeitsweise mit digitalen Zwillingen ist die BIM-Methode. Diese Methode ermöglicht eine objektorientierte Strukturierung von Daten, die Gewährleistung der Kontinuität, Auffindbarkeit, eine zielgerichtete Verteilung von relevanten Informationen und die Optimierung der Kommunikation [3].

BIM-Ziel und Anwendungsfälle

Zu der BIM-Methode gehören zuvor festgelegte BIM-Ziele und dazugehörige BIM-Anwendungsfälle. Für die Erstellung des digitalen Zwillinges wurden die Anwendungsfälle (AWF) des BMDV betrachtet. Für die Nutzung eines digitalen Zwillinges für das Road Asset Management wurde das BIM-Ziel „modellbasierte Zustandsbewertung“ definiert. Zum Erreichen des Zieles war der AWF 1 – Bestandserfassung, der AWF 4 – Visualisierung und der AWF 20 – Betrieb und Erhaltung relevant [4].

AWF 1 Bestandserfassung

Um einen digitalen Zwilling im Bestand zu modellieren, werden Bestandsdaten der Straße benötigt. Somit ist der AWF 1 – Bestandserfassung die Basis für ein erfolgreiches Umsetzen aller Anwendungsfälle. Zu diesem AWF gehören alle Daten, welche den aktuellen Zustand der Straße beschreiben [5].

Für diese Arbeit wurden vom Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung

(LDBV) von der Rothenburger Straße in Nürnberg Katasterdaten, ein digitales Geländemodell (DGM) des ausgewählten Bereiches, Orthofotos, und City Geography Markup Language Daten (CityGML-Daten) zur Verfügung gestellt.

Zusätzlich waren Zustandsdaten der Stadt Nürnberg der Zustandserfassung und -bewertung aus dem Jahr 2019 (ZEB 2019) als eine Shape-Datei vorhanden. Für den AWF 20 – Betrieb und Erhaltung, sind die Zustandsdaten die Basis für weitere Anwendungen [6]. Durch das Laden der Shape-Datei in das Geoinformationssystem (QGIS) konnten die Zustandsdaten der einzelnen Streckenabschnitte im Streckenband entnommen werden. Es wurden die Zustandswerte, die Gebrauchswerte, die Substanzwerte, die Gesamtwerte und die Zustandsklassen der 10-Meter-Abschnitte der Straße berücksichtigt [7].

Ergänzend wurde der Straßenbereich der Rothenburger Straße Nürnberg mit dem VW T5 Bus der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm befahren. Während der Fahrt wurden Erschütterungs- und Beschleunigungsdaten mit der alternativen Zustandserfassung aufgenommen. Die aufgenommenen Daten wurden als CSV-Datei heruntergeladen, als Excel-Datei gespeichert und mit zwei Makros für die Weiterverwendung aufbereitet. In QGIS konnten die Beschleunigungsdaten den Straßenabschnitten entnommen werden [8].

Für hochpräzise Aufnahmen der Straßenoberfläche, wurde ein Teilbereich der Bestandsstraße mit dem Messfahrzeug der Firma Oßwald GmbH vermessen. Das Fahrzeug besteht aus einem modularen System namens Urban Mapper (MUM) des Fraunhofer-Instituts für Physikalische Messtechnik (IPM). Bestandteile des Aufbaus sind zwei Oberflächenkameras, zwei Ladybug-Kameras, ein Pavement Profile Scanner (PPS), ein Längsebenenmesssystem, ein Clearance Profile Scanner (CPS) und ein Pyrometer. In der Abbildung 1 und in der Abbildung 2 ist der Aufbau des Messfahrzeuges zu sehen [9].



Abb. 1: Messfahrzeug der Firma Oßwald GmbH, Seitenansicht



Abb. 2: Messfahrzeug der Firma Oßwald GmbH, Rückseite

Die Messdaten wurden in dem Datenformat LAZ/LAS übermittelt. Über die Autodesk Software Recap Pro konnten die Punktwolke angesehen, bearbeitet und in das Dateiformat RCP konvertiert werden. Als Ausgangsbasis für die Modellierung der Asphaltdeckschicht wurden die Punktdates des PPS-Scanners verwendet. Die Punktwolke wurde in der Autodesk Software Civil 3D geladen. Anhand der Achswerkzeuge konnte entlang der einzelnen Punkte eine Rand- und Mittelachse der Straße gelegt werden. Aus den Punktkoordinaten wurde anschließend ein DGM erstellt. Für die Erprobung der Machbarkeit wurde auf zwei Weisen ein digitaler Zwilling modelliert. Die erste Variante des digitalen Zwilling entspricht einer

Länge von 20 Metern und basiert auf dem DGM der Punktwolke des PPS-Laserscanners und die zweite Variante umfasst eine Strecke von ca. 600 Metern und wurde anhand der Punktkoordinaten des LDBV erstellt. Der Unterschied der Modelle liegt in der Genauigkeit und Detailtreue. Die im weiteren beschriebenen Vorgehensweisen beziehen sich auf beide Methoden.

Nach der Erstellung eines Längs- und Querschnittes konnte ein 3D-Profilkörper mit einem Regelquerschnitt über das Country Kit von Autodesk erstellt werden. Der Regelquerschnitt besitzt jedoch eine lineare Oberfläche mit einem gewählten Gefälle. Da eine Bestandsstraße davon abweicht, wurde der im Download mitgelieferte Subassembly Composer zur Erstellung eines Querschnittbestandteiles verwendet. Durch die Verknüpfung der Werkzeuge mit dem zuvor erstellten DGM konnte eine Asphaltdeckschicht modelliert werden, welche sich der Verformung der Straßenoberfläche anpasst.

AWF 20 Betrieb und Erhaltung

Um dem Modell benutzerspezifische Eigenschaften zuzuweisen, wurde der 3D-Profilkörper in 10-Meter-Abschnitte unterteilt. Hierfür wurde der 3D-Profilkörper entlang der Querprofilinien am Modell geschnitten. Nach der Unterteilung wurden die 3D-Profilkörper abschnittsweise ausgewählt und als Volumenkörper erkannt und konnten einzeln bearbeitet werden. Die Informationstiefe variiert je Bodenschicht. Aufgrund dessen wurden in Civil 3D über den Stylemanager erweiterte Eigenschaften für jede Bodenschicht definiert. Anschließend wurden die Ordnungsdaten, Zustandsdaten, Erhaltungsdaten und Beschleunigungsdaten je Bodenschicht eingetragen.

AWF 4 Visualisierung

Zur Visualisierung des Modells und der gesammelten Daten wurde die Autodesk Software Infraworks verwendet. Hierfür wurden alle Datenquellen geladen und zusammengeführt. Für das erstellte Modell wurde eine Wertskala mit einem Farbschema erstellt, um den Zustand der Straßenabschnitte entlang der Strecke zu visualisieren (siehe Abbildung 4). Ergänzend wurde das Modell mit Dokumenten und Fotos verknüpft (siehe Abbildung 5).



Abb. 3: Infraworks, Modell eines Straßenabschnittes

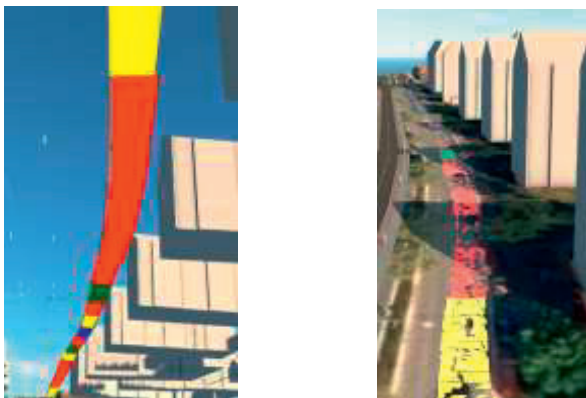


Abb. 4: Infraworks, visuelle Darstellung des Straßenzustandes

Fazit

Es stellte sich heraus, dass der Ablauf der Erstellung eines digitalen Zwillings anwenderfreundlich und weitestgehend unkompliziert funktioniert. Jedoch wird eine hohe Rechnerleistung vorausgesetzt, um die Oberfläche detailgetreu und realitätsnah abbilden zu können. Die Genauigkeit hat Auswirkung auf die Präzision der Straßenoberfläche und auf das damit verbundene visuelle Abbild der Schäden.

Wenn digitale Modelle mit Zustands-, Erhaltungs-, Ordnungs- und Beschleunigungsdaten verknüpft sind, ist die Arbeitsmethode BIM eine enorme Unterstützung für das Managementsystem. Durch das Verwenden eines digitalen Zwillings können Daten jederzeit schnell und in einer größeren Menge abgerufen werden. Durch die Volumenkörper können automatisch Mengenermittlungen erstellt werden, welche einen Vorteil für die Planung der Ressourcen und für die Kalkulation bieten.

Für die Baupraxis bietet der digitale Zwilling in Verbindung mit der BIM-Methode eine Sammlung wichtiger Informationen und hilfreicher Visualisierung des aktuellen Ist-Zustandes und der geplanten Tätigkeiten. Das ermöglicht eine bessere und übersichtliche Zusammenarbeit und ein problemloses Umsetzen eines Bauprojektes.



Abb. 5: Infraworks, Modell mit Verknüpfung zu Fotos und Dokumenten

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: D. T. C. Communications, „Digitalisierungsindex Mittelstand 2021/2022“, 2022. [digitales Dokument]
- [2]: PwC Deutschland, „Digitalisierung, Nachhaltigkeit und Corona in der Bauindustrie“, 2021. [digitales Dokument]
- [3]: A. Meister et al., „Masterplan für die Digitalisierung im Bundesfernstraßen-Bau“, Berlin, 2021. [digitales Dokument]
- [4]: Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, „BIM-Leitfaden Digitales Planen, Bauen und Betreiben im Bereich Straßen- und Brückenbau“, 2022. [digitales Dokument]
- [5]: BIM4INFRA / Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Steckbrief der wichtigsten Anwendungsfälle – Handreichungen und Leitfäden Teil 6“, Berlin, 2019. [digitales Dokument]
- [6]: BIM4INFRA / Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Umsetzung des Stufenplans Digitales Planen und Bauen“, 2018. [digitales Dokument]
- [7]: G. Bislimi, „Optimierungspotentiale des Erhaltungsmanagements im Straßenbau durch die Anwendung von Building Information Modeling“, 2018. [Masterarbeit, Ruhr Universität Bochum]
- [8]: H. Angerer, „Entwicklung von alternativen Methoden der Straßenzustandserfassung“, 2022. [Masterarbeit, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm]
- [9]: „Erfassung von Straßenumgebung und -oberfläche mit einem neuartigen multimodalen Messsystem“, 2021. [Tagungshandbuch Kolloquium Straßenbau in der Praxis]

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, „BIM-Leitfaden Digitales Planen, Bauen und Betreiben im Bereich Straßen- und Brückenbau“, 2022. [digitales Dokument]
2. BIM4INFRA / Bundesministerium für Verkehrs und digitale Infrastruktur, „Teil 7 Handreichung BIM Fachmodelle und Ausarbeitungsgrad“, Berlin, 2019. [digitales Dokument]
3. D. P. D. I. Krieger, „Einsatz von BIM im Asset Management der Straßeninfrastruktur“, 2021. [Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, Technische Akademie Esslingen]

Autor

Kristina Kroner

Studium an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm

10/2018 – 03/2023 Bachelorstudiengang Bauingenieurwesen, Vertiefungsrichtung Verkehrswesen

Betreuer

Berthold Best, Prof. Dipl.-Ing.

Helena Angerer, M.Eng.

Die Arbeit wurde an der Fakultät Bauingenieurwesen der TH Nürnberg angefertigt.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

NACHHALTIGKEITSBEWERTUNG ÖKOLOGISCHER BETONE DURCH DEN ENTWURF EINER VERGLEICHENDEN LEBENSZYKLUSANALYSE

Bachelorarbeit

Leonie von Oepen

Im Bausektor ist Beton der größte Klimaschädiger, wobei Zementklinker für die hohen CO₂-Emissionen verantwortlich ist. Die Verwendung von ergänzenden zementhaltigen Materialien (SCM) und Zusatzstoffen rückt zunehmend in den Mittelpunkt der Forschung, um den CO₂-Fußabdruck von Beton zu verringern. In diesem Zusammenhang ist die Lebenszyklusanalyse (LCA) als Instrument zur Berechnung der Kohlenstoffemissionen von entscheidender Bedeutung. In dieser Arbeit wird die Auswirkung der Klinkerreduzierung durch die Verwendung von landwirtschaftlichen Abfällen und kalziniertem Ton als SCM und Kalksteinmehl als inertes Füllmaterial auf den Kohlenstoff-Fußabdruck von Beton untersucht.

Sechs verschiedene Betonzusammensetzungen wurden analysiert. Portlandzement wurde durch kalzinierten Ton, Reisschalenasche und Kalksteinmehl zu je 25 Prozent ersetzt. Eine Kombination zweier Ersatzbinder als Ersatz um 50 Prozent wurde anschließend verglichen. Es konnte beobachtet werden, dass SCM die CO₂-Emissionen von Betonmischungen im Allgemeinen senkt und dass Kombinationen von reaktiven und inerten Materialien die CO₂-Bilanz sogar verbessern können.

Keywords: ökologischer Beton, alternative Binder, Ökobilanzierung, Klinkerreduktion, Life-Cycle Assessment (LCA), landwirtschaftliche Abfälle, Reisschalenasche, Kalksteinmehl, calcinierte Tone

Hintergrund der Arbeit

Alle Gebäude der Welt zusammen verursachen knapp ein Drittel des globalen Endenergieverbrauchs und etwa ein Fünftel aller Treibhausgasemissionen. Laut dem Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) kann angenommen werden, dass bis 2050

bei gleichbleibenden Entwicklungen mit einer Verdopplung oder Verdreifachung des weltweiten Endenergiebedarfs von Gebäuden und den entsprechenden Emissionen zu rechnen ist [1]. Der Einfluss des Bausektors trägt weltweit bereits zu 39 Prozent zu globalen CO₂-Emissionen bei, wodurch das Pariser Klimaschutzabkommen mit

der festgelegten 2°C-Erwärmungsgrenze, das ursprünglich sogar ein 1,5°C-Ziel war, Gefahr läuft, zu scheitern. Um auf ein „Netto-Null-Kohlenstoff“ im Gebäudesektor bis 2050 zu kommen, müssten die Emissionen bis 2030 halbiert werden [2]. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen alternative Baustoffe und Konstruktionen ermittelt werden, deren Ökobilanz entweder wesentlich geringer, kohlenstoffneutral oder sogar negativ ist, denn insbesondere die Wahl der Baustoffe hat einen wesentlichen Einfluss. Beton ist der meistgenutzte Baustoff der Welt. Der Zementklinker, der als Binder wesentlich für die Betonfestigkeit verantwortlich ist, ist Verursacher für die hohen CO₂-Emissionen: Jede Tonne Zement verursacht 600-900 kg CO₂ durch die Zersetzung von Kalziumkarbonat (CaCO₃) zu Kalziumoxid (CaO), den Energiebedarf bei der Verbrennung, die Verarbeitung und das Mahlen. Prozessoptimierung und Zementersatz sind daher wesentliche Strategien zur Verringerung des CO₂-Verbrauchs [3]. Forschungsarbeiten zu nachhaltigen Betonen und Bindemitteln sind daher sehr aktuell. Möglicherweise kann das Zementexportland Deutschland durch die Entwicklung optimierter Methoden neue Geschäftsfelder erschließen und zudem als Vorreiter und Vorbild helfen, die globale Dekarbonisierung voranzubringen.

Methodik

Um Prozesse besser zu verstehen und die Anwendung auf das Produkt bestmöglich durchführen zu können, werden theoretische Grundlagen wie traditionelle Beton-Herstellungsprozesse geklärt. Es ist notwendig, Alternativen zu finden, um die Beton- und Zementproduktion nachhaltiger zu gestalten und aufzuzeigen, welche Ideen und Technologien es bereits gibt; und diese folglich bezüglich ihrer Klimabilanz zu bewerten.

Um diese Alternativen zu bewerten, ist eine Ökobilanzierung das richtige Werkzeug. So ist zu erläutern, was eine Ökobilanz ist, warum diese in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen wird

und wie die Durchführung dieser funktioniert. Den Schritten folgend, wird nach Festlegung der Systemgrenzen bei einer Betonherstellung und der einfließenden Parameter mithilfe verschiedener Betonrezepturen eine Ökobilanzierung in der LCA-Software „SimaPro“ angewandt. Der ökologische Fußabdruck verschiedener Betone wird so analysiert, um eine Nachhaltigkeitsbewertung ökologischer Betone unter dem Einsatz alternativer Binder, bzw. in Abhängigkeit möglicher Klinkerreduktion durchzuführen. Nachdem die verantwortlichen Komponenten in der Zementherstellung identifiziert werden konnten, werden die Möglichkeiten zur Reduktion der Emissionen durch Klinkerreduktion ebenso betrachtet wie der Einsatz von alternativen Bindern wie landwirtschaftliche Abfälle, Reisschalenasche, Kalksteinmehl und calcinierte Tone und mithilfe einer Ökobilanzierung festgestellt, welche Optionen tatsächlich als ökologisch sinnvoll erachtet werden können. Die Ergebnisse sollen als Vorlage bzw. Entscheidungsgrundlage für angewandte Projekte dienen.

Dazu werden sechs verschiedene Betonrezepturen mit unterschiedlichen Klinkergehalten und Zusatzstoffen in die LCA-Software Sima Pro implementiert. Der Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen wie des Baustoffs selbst, der Rohstoffverfügbarkeit und der Transportwege wird durch Variation der Einflussgrößen ermittelt und so die Baustoffvarianten klassifiziert, sodass die ökologische Gesamtpformance eingeschätzt werden und die Ökobilanz als Benchmark und Entscheidungsgrundlage für angewandte Projekte dienen kann.

Durchführung

Ein herkömmlicher Beton mit 100 Prozent Portlandzement als Bindemittel ist die Grundlage, die durch Veränderung der Parameter analysiert und die Auswirkungen evaluiert wurden. Ausgehend von diesem Beton wurden verschie-

Rezept-nummer	Betonname (SimaPro)	alternatives Bindemittel	Anteil Portland-zement [%]	Anteil Portland-zement [kg/m ³]	Anteil SCM [%]	Anteil SCM [kg/m ³]
Beton 1	100OPC	keiner	100	335,00	0	0,00
Beton 2	25Ccl	calciniertes Ton	75	251,25	25	83,75
Beton 3	25RHA	Reisschalenaschen	75	251,25	25	83,75
Beton 4	25LS	Kalkstein	75	251,25	25	83,75
Beton 5	25Ccl25LS	calciniertes Ton und Kalkstein	50	167,50	jew 25	jew. 83,75
Beton 6	25RHA25LS	Kalkstein und Reisschalenasche	50	167,50	jew 25	jew. 83,75

Tab. 1: Untersuchte Betonrezepturen

dene Substitutionen vorgenommen, die aufgrund der Recherche und vorangegangener Veröffentlichungen am Lehrstuhl als sinnvoll erachtet wurden und den verwendeten Rezepturen zugrunde liegen. Diese Rezepturen zur Herstellung von 1 m³ Beton sind oben in Tabelle 1 dargestellt. Zusätzlich zu den Zementen folgt in der Herstellung im Betonwerk in allen Rezepturen die Zugabe von 160 kg/m³ Wasser, 1196 kg/m³ zerkleinertem Schotterkies und 774 kg/m³ Sand.

3 Ergebnisse

Beton 1 mit 100 Prozent Portlandzement hat einen Output von 356 kg CO₂-Äquivalent bei der Produktion von 1 m³ Beton, die es als Standardwert zu verbessern gilt.

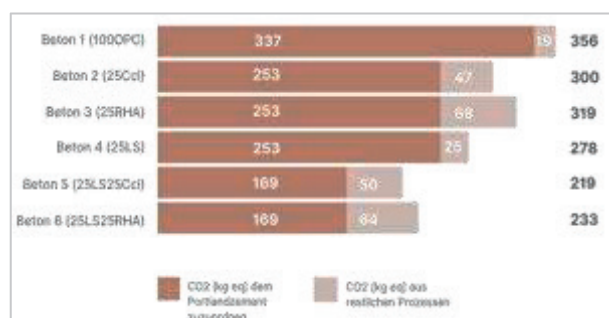
Das Ersetzen des Portlandzements zu 25 Prozent mit calcinierten Tonen erzeugt noch 300 kg CO₂-Äquivalent und zeigt somit eine leichte Verbesserung. Es ist jedoch anzumerken, dass der noch zu 75 Prozent beigefügte Portlandzement einen Anteil von 253 kg dieses Werts hat.

Den Portlandzement zu einem Viertel mit Reisschalenaschen zu ersetzen, bringt eine Verbesserung auf 319 kg CO₂-Äquivalent. Sowohl bei den calcinierten Tonen als auch bei den Reisschalenaschen sind alle Emissionen des Verbrennungsprozesses genau implementiert worden. Dennoch schneiden calcinierten Tone etwas besser ab, was in der Anwendung

genauestens überprüft werden sollte, da die Transportwege einen großen Einfluss haben, hier jedoch auf jeweils 100 Kilometer standardisiert wurden, und besonders in diesen beiden Fällen stark variieren können. Somit könnten die Ergebnisse projektspezifisch anders ausfallen.

Bei teilweisem Ersatz durch Kalksteinmehl kann ein CO₂-Äquivalent von 278 kg für 1m³ Beton erreicht werden. Beton 4 schneidet so als bester ab, was die Substitution um 25 Prozent betrifft.

Weiter wird in den letzten beiden Rezepturen eine Substitution zu 50 Prozent mit jeweils zwei der Substituenten untersucht. Zunächst wird ein Beton analysiert, der neben dem Portlandzement 25 Prozent calcinierte Tone und 25 Prozent Kalkstein enthält. Dieser stößt etwa 219 kg CO₂-Äquivalent aus, wobei nur noch 169 kg dem Portlandzement zuzuschreiben sind. Anschließend wird ein Vergleich zu einem Rezept mit 25 Prozent Kalkstein und 25 Prozent Reisschalenaschen möglich. Die Auswertung ergibt für diesen Beton einen Ausstoß von 233 kg CO₂-Äquivalent (siehe Tabelle 2).



Tab. 2: Übersicht Ergebnisse der Betonrezepturen im Vergleich

Auf Basis der erhaltenen Werte ist festzustellen, dass der Einfluss des herkömmlichen Portlandzements erheblich ist. Dieser kann nur schwer durch eine 25-prozentige Substitution ausreichend gesenkt werden. Dementsprechend ist ein Ersatz zu 50 Prozent durch die Kombination zweier alternativer Binder empfehlenswert. Leichte Verbesserungen sind jedoch bereits durch den Ersatz zu einem Viertel zu verzeichnen. Dabei schneiden die calcinierten Tone mit einer Verbesserung um 56 kg CO₂-Äquivalent bereits gut ab, eine Substitution mit Kalksteinmehl bringt eine weitere Verbesserung um 22 kg. Durch den Einsatz von Reisschalenaschen ist eine Minimierung des CO₂-Äquivalents um 37 kg im Vergleich zum Referenzbeton mit 100 Prozent Portlandzement möglich. Die Tatsache, dass die vielversprechenden Reisschalenaschen am schlechtesten der drei alternativen Stoffe abschneiden, kann an folgenden Gründen liegen:

1. Die Transportwege sind hier mit 100 km je Weg angesetzt worden. In den Ländern, in denen der Einsatz von Reisschalenasche am sinnvollsten ist, befindet sich meist ein Reisfeld in unmittelbarer Nähe, der Reis trocknet in der Sonne und kann manuell verbrannt werden. Oft werden kleinere selbst gebaute Öfen verwendet, dessen Emissionswerte nicht geschätzt werden können und unter denen von großen industriellen Anlagen liegen könnten.
2. Die Nutzung der bei der Verbrennung entstehenden exothermen Energie für den nächsten Verbrennungsprozess könnte eine große Einsparung bedeuten und wurde hier nicht eingerechnet.
3. Die bereits erwähnte Beobachtung, dass die Emissionen bei dem Standardbeton mit Beimengung von Flugasche im Verbrennungsprozess nicht in den Prozess miteingehen, lässt darauf schließen, dass der Wert des Referenzbetons noch wesentlich höher sein könnte, sofern andere vergleichbare Systemgrenzen gesetzt werden. Zudem ist es möglich, dass diese auch bei dem Prozess der

calcinierten Tone und des Kalksteinmehls nicht in dem Maße miteingehen, was eine direkte Vergleichbarkeit erschwert.

4 Fazit und Ausblick

Aus der selbst durchgeführten vergleichenden Lebenszyklusanalyse in SimaPro kann bereits geschlossen werden, dass der Ersatz zu 50 Prozent mit den Substituten Kalksteinmehl und calcinierten Tönen die vielversprechendsten Ergebnisse erbringen. Der Einsatz von Reisschalenaschen ist ein sehr aktueller Ansatz, der noch zu großen Teilen Inhalt offener Forschung ist. Die Verwendung dieses landwirtschaftlichen Abfallprodukts ist in entsprechenden Regionen mit unmittelbarer Nähe zu Reisfeldern zu empfehlen, da dort die Transportwege zu den alternativen Zusatzstoffen oftmals erheblich höher sind und es nach aktuellem Forschungsstand keine Einbußen der Dauerhaftigkeit und Festigkeit zu befürchten gibt.

Zusätzlich zu einem Umdenken in der Zusammensetzung der Standardbetone ist klar geworden, dass die Baubranche Veränderungen durchsetzen muss, um dem Anspruch einer ökologisch verantwortungsvollen Zukunftsbetrachtung gerecht zu werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei konstant weiterlaufendem Druck auf Regierung und die Bauindustrie zusätzliche Vorgaben und Handlungsrichtlinien auf den Weg gebracht werden, um den Einfluss der Branche auf die hohen Emissionswerte zu senken. So soll diese Arbeit als Grundlage für Projekte dienen und einen Handlungsrahmen geben, um mit den entsprechenden Anpassungen eine Ökobilanzierung nach diesem Muster durchführen zu können. Eindeutig ist, dass eine sofortige Handlung der einflussreichen Branche nicht nur möglich, sondern dringend nötig ist, um das Leben auf unserem Planeten auch für zukünftige Generationen zu erhalten und weitere Auswirkungen des bereits stattfindenden Klimawandels zu verhindern.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/08/SRCCL-SPM_de_barrierefrei.pdf

- [2] Programme, UNEP (2020). *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector* [Online]. Verfügbar unter: https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf

- [3] WWF Deutschland (2019). *Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf

Tabellenverzeichnis:

- Tabelle 1: Untersuchte Betonrezepturen (eigene Darstellung)
- Tabelle 2: Übersicht Ergebnisse der Betonrezepturen im Vergleich (eigene Darstellung)

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2021) Hrsg. *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2020*; Düsseldorf, 2021. [Online] Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/umweltdaten-der-deutschen-zementindustrie-2020>

- Gursel, A. P., Maryman, H., & Ostertag, C. (2016). *A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of "green" concrete mixes with rice husk ash*. *Journal of Cleaner Production*, 112, 823-836. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.029>

- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry*. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26. [Online]. Verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

Autorin, Co-Autorin

Leonie von Oepen, B.Sc. (TUM)
 Mareike Thiedeitz, M. Eng. (AG Betontechnologie)

Betreuende

Die Arbeit wurde angefertigt in der School of Engineering and Design im Department of Materials Engineering am Lehrstuhl Centrum für Baustoffe und Materialprüfung an der Technischen Universität München bei Frau Mareike Thiedeitz (M.Eng.) der Arbeitsgruppe Betontechnologie unter Prof. Gehlen.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

RC-BETON ALS ZEMENTZUSATZSTOFF

UNTERSUCHUNG DES ABBINDE-VERHALTENS VON MÖRTEL MIT RC-MEHL ALS ZEMENTZUSATZSTOFF

Bachelorarbeit

Johannes Paule

Durch Ersatz von Zement mit 10 beziehungsweise 20 Vol.-% RC-Mehl in Mörtelmischungen sollen Einflüsse auf das Abbindeverhalten sowie auf die Festigkeitsentwicklung nachvollzogen werden. Durch Feinmahlen in einer Kugelmühle und anschließendem Brennen bei unterschiedlichen Temperaturstufen (750°C, 800°C, 850°C, 900°C) wird versucht, Klinkerphasen des Zements in zwei verschiedenen RC-Mehlen wieder zu reaktivieren. An den RC-Pulvern wurden Prüfungen zum Glühverlust, der Dichte, der spezifischen Oberfläche sowie der Reaktivität durchgeführt. Anschließend wurde über die Normsteife der Wasseranspruch bestimmt und mittels Ultraschalluntersuchung die Erstarrungszeiten erfasst. Unter gleichbleibendem Wassergehalt wurden Versuche zur Biegezug- und Druckfestigkeit vollzogen. Die Dichte der RC-Mehle wurde durch die thermische Behandlung gesteigert. Die spezifische Oberfläche stieg zunächst bis zur ersten Brennstufe, fiel anschließend aber wieder ab. Der Wasseranspruch stieg unter Einsatz von gebranntem Mehl nur moderat an, bei ungebranntem fiel dieser. Bei allen Brennstufen, außer 850°C verlängerte sich die Gesamtdauer des Erstarrungsprozesses. Die Untersuchungen zur Festigkeit ergaben, dass eine Brenntemperatur von 750°C das meiste Potential zum Erreichen der höchsten Festigkeiten bietet. Es wurden sowohl bei der Biegezug- als auch bei der Druckfestigkeit um die 85-90% der Festigkeiten der Referenz erreicht.

Keywords: RC-Beton, RC-Mehl, Zementzusatzstoff, SCM, Abbindeverhalten

Einsatz von RC-Mehl

Das beim Abbruch von Beton in großen Mengen anfallende Betonmehl darf laut aktueller Normgebung nicht zum Recycling verwendet werden. In dieser Arbeit soll versucht werden, in

verschiedenen Teilen Zement durch dieses sogenannte RC-Mehl zu ersetzen. Es enthält große Mengen an Zementstein sowie nicht hydratisiertem Zement, Calciumhydroxid (Ca(OH)_2) sowie Calciumcarbonat (CaCO_3), aber auch herkunftsbedingt quarzistische sowie

carbonatische Gesteinsmehl- wie Sandanteile [1; 2]. Durch thermische Aufbereitung wird das RC-Mehl hohen Temperaturen ausgesetzt, um den Prozess der Zementhydratation rückgängig zu machen und die ursprünglichen Klinkerphasen zu reaktivieren. Bereits bei Temperaturen unter 100°C wird Wasser ausgetrieben, es erfolgt die Dehydration von Ettringit. Bis 400°C findet die vollständige Dehydration der C-S-H-Phasen statt. Dies beschreibt den Vorgang des Lösens des chemisch gebundenen Wassers. Zwischen 430°C und 550°C wird Portlandit (Ca(OH)_2) zu Calciumoxid (CaO) und Wasser (H_2O) zersetzt [3]. Bei darüberliegenden Temperaturen kann allerdings erneut Portlandit nachgewiesen werden, dies wird aber damit begründet, dass das entstandene CaO erneut mit dem frei gewordenen Wasser reagiert. Die für die Festigkeit wichtigen C2S-Phasen werden ab 650°C bis 900°C neu gebildet. Decarbonisierungsprozesse finden bereits ebenfalls bei 600°C statt, erreichen ihren Höhepunkt aber erst bei höheren Temperaturen [4].

Das vorrangige Ziel der thermischen Aufbereitung ist die Wiederherstellung der C2S-Verbindungen, da diese sich bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen bilden. Dies kommt der Umweltbilanz zugute, die sich aus den Faktoren der kurzen Transportwege, der Mahlbarkeit und der Brenntemperatur zusammensetzt.

Versuchsprogramm

Ziel dieser Arbeit ist es, den möglichen Beitrag von RC-Mehl als Zementzusatzstoff, Supplementary Cementitious Material (kurz: SCM), in Zementmörtel zum Abbindeverhalten in Abhängigkeit der Substitutionsrate und Brenntemperatur zu untersuchen. Dies soll dazu beitragen, einen qualitativ hochwertigen Einsatzbereich für einen bisher weitgehend nicht recycelten Teil des Bauschutts zu finden und so den Zementanteil im Beton zu reduzieren, was sich positiv auf die Umweltbilanz des Betons auswirken würde.

Ausgangsstoffe für die RC-Mehle waren zum einen eine rezyklierte Gesteinskörnung einer Recyclings-Firma (Bezeichnung: ET) sowie Betonbruch eines Abbruches aus München (kurz: BK).

Als Zement für die Referenzmischungen wurde ein CEM I 42,5 N der Firma Schwenk verwendet. Für die Herstellung der Zementmörtelprismen kam CEN-Normsand gemäß DIN EN 196 Teil 1 zum Einsatz.

Die Versuche an den RC-Mehlen waren zum einen die thermische Behandlung in den vier Brennstufen (750°C, 800°C, 850°C sowie 900°C) und die Ermittlung des dadurch auftretenden Glühverlusts. Hierzu wurden die RC-Mehle in zwei feuerfeste Tiegel eingefüllt und anschließend in einen Muffelofen gestellt (vgl. Abb. 1). Nach Erreichen der Zieltemperatur T nach 1,5 Stunden wurde diese für ca. 2 Stunden gehalten. Durch Wägung der Tiegel vor und nach dem Brennvorgang konnte der Masseverlust, welcher den Glühverlust widerspiegelt, ermittelt werden.

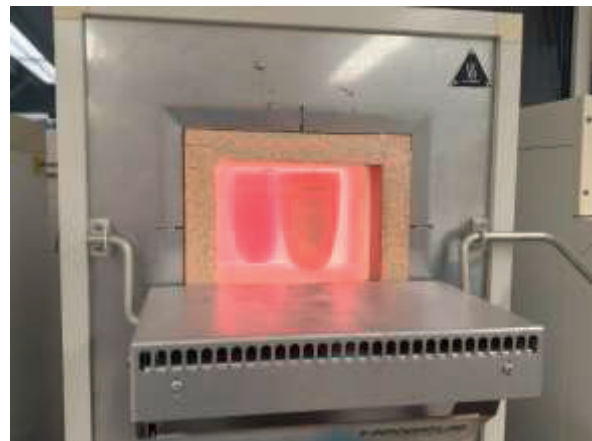


Abb. 1: Tiegel mit RC-Mehl im Muffelofen

Die Dichte wurde mittels Pyknometerverfahren bestimmt. Da das zur Verfügung stehende Pyknometer eine zu große Streuung der Ergebnisse aufwies, wurde dazu übergegangen, die Dichte mithilfe eines Messkolbens und der Flüssigkeit Aceton zu bestimmen, da Wasser mit dem RC-Mehl reagieren könnte.

Die spezifische Oberfläche der Mehle wurde durch den Blaine-Versuch ermittelt. Das Prinzip beruht darauf, welche Zeit Luft benötigt um eine bestimmte Probenmenge zu durchströmen. Anschließend kann die spezifische Oberfläche berechnet werden.

Das RC-Mehl aus dem Material der Firma ET wurde zusätzlich dem Chapelle-Test unterzogen. Dabei kann die puzzolanische Aktivität ermittelt werden.

Es werden Mörtelmischungen mit Rezepten unter 10 bzw. 20 Vol.-% Zementersatz durch die Mehle als SCM erstellt. Hierfür fand die Benennung der Proben nach dem Schema „Brenntemperatur – Ersatzmenge“ statt, beispielsweise 750-10, was die Probe von 10 Vol.-% Zementersatz mit bei 750°C gebranntem RC-Mehl beschreibt.

Anhand der Normsteife wird ein optimierter w/z-Gehalt für jede Mischung ermittelt und diese anschließend im Vergleich zu einer Referenzprobe ohne SCM-Ersatz auf den Erstarrungsbeginn und das Erstarrungsende getestet.

Das Abbindeverhalten wurde über eine Ultraschalluntersuchung mithilfe eines Vikasonic-Gerätes in den ersten 24 Stunden nach Erstellen der Mischung erfasst. Mithilfe der gemessenen Schallgeschwindigkeit ist auch der E-Modul-Verlauf des Frischmörtels aufgezeichnet worden. Durch die exotherme Reaktion von Zement mit Wasser kann über die Temperaturverfolgung, die dadurch ein wichtiger Indikator für die Erhärtung ist, das Abbindeverhalten genau beobachtet werden. Die Bestimmung des Erstarrungsbeginns erfolgte durch Ermittlung des Zeitpunkts der niedrigsten Temperatur nach Beginn der Aufzeichnung (vgl. Abb. 2). Das Erstarrungsende wurde am Punkt der höchsten Steigung der Kurve der Geschwindigkeit nach dem Erstarrungsbeginn festgelegt (vgl. Abb. 3). Hierzu wurde die Ableitung der Funktion der Geschwindigkeit gebildet und der Hochpunkt dieser bestimmt. Verglichen werden hier der Zeitpunkt, als auch der Wert der Schallgeschwindigkeit.

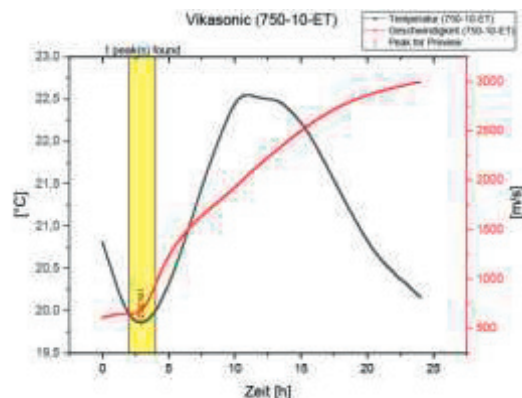


Abb. 2: Vikasonic Aufzeichnung der Probe 750-10-ET mit Bestimmung des Erstarrungsbeginns

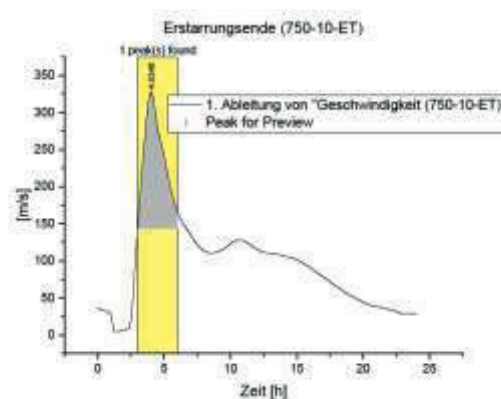


Abb. 3: 1. Ableitung der Funktion der Geschwindigkeit der Probe 750-10-ET

Mit dem RC-Mehl ET wird untersucht, einen Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und w/z-Wert zu ermitteln. Deshalb wird für die Mörtelrezepte zur Prüfung der Biegezug- und Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1 der Wassergehalt gleich gehalten.

Ergebnisse und Auswertung

Nach dem Brennvorgang konnte ein Masseverlust beider Mehle festgestellt werden. Das Material BK fiel im Vergleich deutlich verlustreicher aus. Eine höhere Carbonatisierungsrate könnte dies begründen. In den Dichtebestimmungen ist zu erkennen, dass diese mit zunehmender Temperatur anstieg. Auch die spezifische Oberfläche änderte sich. So wurde bei RC-ET eine deutliche Steigerung zwischen ungebrannt und erster Brennstufe

(750°C) erfasst. Anschließend sank diese mit steigender Temperaturbeaufschlagung. Beim RC-Mehl BK war ein ähnlicher Effekt zu erkennen, jedoch nicht in der gleichen Stärke. Im Chapelle-Test mit dem Mehl RC-ET konnten hohe Werte erreicht werden.

Bei der Ermittlung der Normensteife wurden im Gegensatz zur Referenzmischung ohne Zementersatz nur moderate Anstiege des Wasserverbrauchs festgestellt. Das Mehl BK erwies sich als das wassersparsamere Material, bei beiden konnte jedoch kein eklatanter Einfluss der Brenntemperatur auf das RC-Mehl ermittelt werden.

Zur Bestimmung der Erstarrungszeiten wurden an beiden Mehlen mit den erarbeiteten Rezepten der Normensteife Ultraschallmessungen durchgeführt. Dabei wies RC-ET gleichmäßige Eigenschaften auf. Der Erstarrungsbeginn reduzierte sich im Vergleich zur Referenz bei Ersatz von 10 Vol.-% Zement deutlicher als bei 20 Vol.-% (vgl. Abb. 4). Das Erstarrungsende blieb mit geringerer Substitution auf dem Niveau ohne Ersatz, mit 20 Vol.-% stieg dieses leicht (vgl. Abb. 5). Auffällig war die ähnliche Gesamtdauer der Erstarrung unter Einsatz des bei 850°C gebrannten Mehls mit der reinen Mörtelmischung ohne Zusatz.

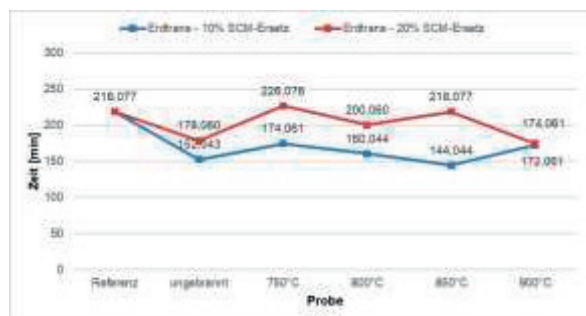


Abb. 4: Erstarrungsbeginn mit Zementersatz, RC-ET

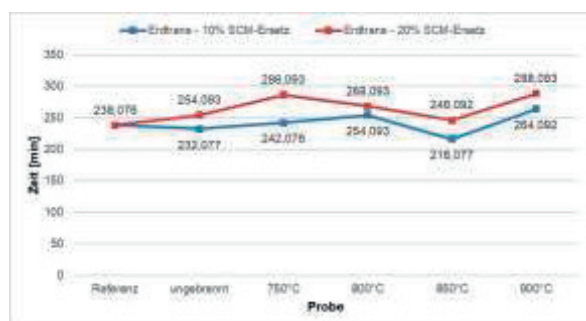


Abb. 5: Erstarrungsende mit Zementersatz, RC-ET

Das Material BK wies dagegen keine stringenten Muster auf. Es waren keine Zusammenhänge in Bezug auf die Brenntemperatur oder der Ersatzrate feststellbar. Im Vergleich zur Referenz war bei beiden RC-Mehlen zu erkennen, dass sich der E-Modul mit Erreichen des Erstarrungsendes nicht auf dem gleichen Niveau befand. Nach 24 Stunden konnten jedoch vergleichbare, beziehungsweise höhere Werte für diesen erreicht werden, wodurch eine deutliche Nacherhärtung feststellbar ist.

Mit dem RC-Mehl ET wurden Biegezug- und Druckfestigkeitsversuche unter Beibehaltung des Wassergehalts nach Norm durchgeführt. Bei den Biegezugfestigkeiten konnten Werte um die 90% der Referenz erzielt werden, mit dem besseren Abschneiden der Proben mit 20 Vol.-% Zementersatz. Eine optimale Brenntemperatur zur Erhöhung der Biegezugfestigkeit lässt sich nicht herstellen.

Bei den Versuchen zur Druckfestigkeit waren die Proben mit 10 Vol.-% Substitution die widerstandsfähigeren. Auch hier wurden Werte um die 90% der Referenz erreicht. Der Ersatz durch 20 Vol.-% ergab deutlich geringere Festigkeiten, mit Ausnahme der Proben mit dem bei 750°C gebrannten Mehl. Diese Brennstufe lässt sich als die Temperatur der vier erprobten Temperaturen mit dem höchsten Potential zum Erreichen maximaler Druckfestigkeiten unter Einsatz von RC-Mehl nennen.

Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein möglicher Verwendungszweck für Betonfeinanteile aus dem Betonabbruch untersucht. Durch weitere Untersuchungen, die in diesem Bereich notwendig sind, ließen sich dadurch Zementanteile im Beton einsparen. Auch ein möglicher Einsatz als Betonzusatzstoff, aufgrund der puzzolanischen Eigenschaften beispielsweise als Ersatz von Flugasche, ist denkbar. So kann der CO₂-Abdruck des Betons effektiv verringert werden.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Chen, X. et al. (2019) Study on Recycled Concrete Powders as Mineral Admixture in Recycled Concrete in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 330, S. 22113. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/330/2/022113>
- [2]: NOBIS, C.; VOLLPRACHT, A. Forschungsbericht F 7099: Verwendung von Recyclingmaterial in der Betonproduktion - Sachstand in: Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. 2015.2
- [3]: Sérgio C. Angulo et al. REHYDRATION OF CEMENT FINES: A TG /CALORIMETRY STUDY.
- [4]: Dora, B. (2001) Hydraulisch erhärtende Baustoffe aus Betonbrechsand [Dissertation]. Technische Universität Braunschweig.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Real, S. et al. (2020) Influence of the Treatment Temperature on the Microstructure and Hydration Behavior of Thermoactivated Recycled Cement in: Materials (Basel, Switzerland) 13, Nr. 18. <https://doi.org/10.3390/ma13183937>
2. Müller, A. (2018) Baustoffrecycling – Entstehung Aufbereitung Verwertung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
3. Serpell, R.; Zunino, F. (2017) Recycling of hydrated cement pastes by synthesis of α 'H-C2S in: Cement and Concrete Research 100, S. 398–412. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.001>
4. Serpell, R.; Lopez, M. (2015) Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials in: Cement and Concrete Composites 64, S. 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.08.003>
5. Shui, Z. et al. (2009) Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures.
6. Pavlů, T.; Šefflová, M.; Hujer, V. (2016) The Properties of Fine-Aggregate Concrete with Recycled Cement Powder in: Key Engineering Materials 677, S.
7. Kim, Y. J.; Choi, Y. W. (2012) Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement in: Construction and Building Materials 30, H. 2, S. 500–504. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.042>
8. Alonso, C.; Fernandez, L. (2004) Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments in: Journal of Materials Science 39, H. 9, S. 3015–3024. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000025827.65956.18>

Autor

Johannes Paule, Bachelor of Engineering - Allgemeines Bauingenieurwesen, Maurer

Betreuer

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

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

BEWEHRUNGSKONZEPTE FÜR DEN EXTRUSIONSBASierten 3D-DRUCK MIT BETON

Masterarbeit

Johanna Schlögel

Als Baustoff, der weltweit am häufigsten eingesetzt wird, dominiert der Beton die heutige Bauindustrie. Die Formgebung im derzeitigen Beton- bzw. Stahlbetonbau erfolgt überwiegend unter der Verwendung von Schalungsstrukturen, die einen hohen manuellen Aufwand mit sich bringen. Der Fakt, dass der Aufwand mit zunehmender geometrischer Komplexität der zu schalenden Elemente deutlich ansteigt, ist einer der Gründe, warum die Bauteile überwiegend lohnkosten- und nicht materialoptimiert geplant werden. Im Hinblick auf die Einsparung von Ressourcen und Energie ist dieser Ansatz allerdings wenig zukunftsorientiert. Um die Herstellung komplexerer Formen zu vereinfachen, ist die Additive Fertigung (AF) – auch als 3D-Druck bezeichnet – ein Erfolg versprechender Ansatz, da geometrisch flexible Strukturen schalungsfrei realisiert werden können. Um die Anwendung in der gesamten Bandbreite des Bauwesens zu ermöglichen, ist die Integration von Bewehrungsstrukturen zum Abtrag der Zugkräfte essenziell. Durch die AF des Betons werden besondere Anforderungen an den Bewehrungsprozess gestellt. Im Zuge der Masterarbeit wurden bestehende Ansätze zur Bewehrungsintegration in den extrusionsbasierten 3D-Druck zusammengetragen. Auf Grundlage dieser Informationen wurden die diversen Konzepte anhand ihrer materiellen und prozesstechnischen Eigenheiten in einem Verzweigungsdiagramm aufgegliedert, um eine schnelle und präzise Einordnung der Bewehrungsstrategien zu ermöglichen. Für die erfolgversprechendsten Konzepte erfolgte eine Zusammenfassung der relevantesten Daten in Form von Steckbriefen und eine Einstufung ihrer Prozessmerkmale mit Hilfe eines Bewertungsschemas. Basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit erwiesen sich einige Konzepte, beispielsweise der Einsatz von Kurzfasern, vielversprechender als andere.

Keywords: Betonbau, Additive Fertigung, Beton-3D-Druck, Extrusion, Bewehrungsintegration

Additive Fertigung im Massivbau

Derzeit finden sich im konventionellen Stahlbetonbau überwiegend einfache Formen und massige Bauteile wieder. Im Hinblick auf den

hohen Energiebedarf und den immensen CO₂-Ausstoß, der u. a. mit der Zementherstellung einhergeht, sowie die Ressourcenknappheit ist dieser Ansatz jedoch zu überdenken [1]. Um die

Herstellung von individuellen Geometrien zu vereinfachen, scheint die Additive Fertigung (AF) ein vielversprechender Ansatz zu sein. Kennzeichnend für diese Art der Fertigung ist ein schalungsfreier, schichtweiser Aufbau der Struktur, welcher durch unterschiedliche Verfahrensweisen realisiert werden kann. Die AF kann in Extrusion, Selektives Binden, Spritzbeton- und Gleitschalungsverfahren gegliedert werden.

Der Fokus der Arbeit liegt auf der Betonextrusion. Dabei wird ein fertig gemischter Beton unter Druck durch eine formgebende Öffnung (Düse) gepresst und schichtweise abgelegt. Während des Druckprozesses werden unterschiedliche Anforderungen an die Rheologie des Materials gestellt. Diese werden als Pumpbarkeit, Extrudierbarkeit und Verbaubarkeit definiert [2].

Fragestellung und Zielsetzung

Die Anwendung des Extrusionsdrucks in der Baupraxis beschränkt sich derzeit in weiten Teilen noch auf unbewehrte Wandelemente, die überwiegend Druckbeanspruchungen ausgesetzt sind. Um die Anwendungsmöglichkeiten auch auf zug- und biegebeanspruchte Bauteile auszuweiten, wird aktuell an unterschiedlichen Konzepten zur Integration von Bewehrungsstrukturen geforscht.

Die diversen Strategien und die Unterschiede hinsichtlich ihrer Herangehensweisen, ihrer Entwicklungsstände und bereits durchgeführten Versuche, bzw. abgewinkelte Projekte werden in dieser Masterarbeit detailliert betrachtet. Des Weiteren sollen Fragen zu sinnvollen Bewehrungsmaterialien und notwendigen Prozessschritten für die Integration der Bewehrung behandelt werden.

Die Ausarbeitung der Masterarbeit beinhaltet zudem zwei Schaubilder. Das erste Schaubild ermöglicht dem Leser einen prägnanten Überblick zu den Bewehrungsstrategien, um mit wenigen Blicken einschätzen zu können, welches Konzept für welchen Anwendungsfall zielführend ist. Hierfür werden material- und prozessspezifische

Eigenschaften mit Hilfe eines Verzweigungsdiagrammes kategorisiert und zusammengestellt. In einem zweiten Schaubild werden einige ausgewählte Ansätze in Form eines Steckbriefes abgebildet und hinsichtlich ihrer Eigenschaften bewertet.

Zudem werden bereits durchgeführte Versuche, die die Tragweise der entsprechenden Bewehrung überprüfen, ausgewertet. Anhand dieser Auswertung sollen die Wirksamkeit der jeweiligen Konzepte beurteilt und mögliche Problemstellungen eruiert werden.

Bewehrungskonzepte

Im Bereich des extrusionsbasierten 3D-Drucks existiert ein breites Spektrum von Strategien zur Integration einer Bewehrungsstruktur.

Ein weit verbreiteter Ansatz ist der Einsatz von Faserbetonen. Wobei überwiegend Polymer-, Stahl und Carbonfasern verwendet werden. Die Zugabe der Kurzfasern erfolgt dabei entweder in die Trockenmischung, in den fertig gemischten Druckbeton oder erst kurz vor der Düse [3].

Auch unterschiedliche Strangbewehrungen sind bereits Teil der Forschung. Dabei werden Stahlseile oder zu Endlossträngen verbundene Fasern in oder zwischen die Betonschichten eingezogen. Die Integration der Bewehrungselemente erfolgt kontinuierlich während des Druckprozesses.

Eine naheliegende Strategie ist der Einsatz von Betonstahl, wie er im konventionellen Stahlbetonbau verwendet wird. Dabei unterscheiden sich die Konzepte sowohl bei der Orientierung der Stäbe zum Druckpfad als auch hinsichtlich des Einbaupunktes der Bewehrung. Die Bewehrungsstäbe, Körbe oder Matten werden dabei entweder vor oder nach der Betonextrusion in Position gebracht. Weitere Konzepte untersuchen den Einsatz von geschraubten Bewehrungselementen oder Nägeln.

Alternativ dazu wird der kontinuierliche Aufbau einer Bewehrungsstruktur verfolgt. Die Verstärkung besteht dabei aus verschweißten Kurzstäben, einem Drahtnetz oder sie wird durch Auftragsschweißen aufgebaut.

Im Vergleich zu Strukturen aus Bewehrungsstahl ist der Einsatz von Textilgelegen geometrisch flexibler. Weiterhin kann aufgrund der Alkalibeständigkeit von Carbon- und Glasfaser die Betondeckung reduziert und somit Material eingespart werden [4]. Die Bewehrung erfolgt hier kontinuierlich analog zu den Druckschichten oder nach dem Prinzip „Bewehrung stützt Beton“. Letzteres nennt sich SCRIM, dabei wird das Carbondtextil in der angestrebten Form aufgespannt und mit Betonschichten bedruckt [5].

Relativ früh wurde bereits der Einsatz von vorgespannter Bewehrung im Zusammenhang mit gedruckten Bauteilen untersucht. Die Vorspannung erfolgt dabei intern oder extern am bereits ausgehärteten Bauteil [6].

Gegenüberstellung der Konzepte

Bei den vorhergehend beschriebenen Strategien zeigen sich deutliche Unterschiede, die maßgeblich den Bewehrungsprozess beeinflussen. Um diese zu erfassen, werden vier Gliederungspunkte definiert, anhand derer die Konzepte kategorisiert werden.

Die erste Untergliederung stellt der **Einbauzeitpunkt** dar. Dabei kann unterschieden werden in:

- Einbau vor der Extrusion, z. B. die Zugabe von Kurzfasern zur Betonmischung vor dem Druck;
- Prozessbegleitender Einbau, z. B. der kontinuierliche Einzug von Strangbewehrung in die Druckschichten;
- Einbau nach der Extrusion, z. B. das nachträgliche Zusammenspannen von ausgehärteten Bauteilen.

Der zweite Gliederungspunkt bezieht sich auf die **Hauptwirkung** der jeweiligen Bewehrung. Es wird nach drei Intentionen unterschieden:

- Rissbreitenbegrenzung;
- Zugtragfähigkeit;
- Schichtverbund.

Ein weiterer wichtiger Unterschied ist die **Ausrichtung der Bewehrung zum Druckpfad**. Dabei sind folgende Kategorien möglich:

- parallel, z.B. in die Druckfugen eingelegte Bewehrungsstäbe, Stränge oder Textilgelege;
- senkrecht, d.h. schichtübergreifende Bewehrung mit bspw. Stäben oder Schrauben;
- parallel und senkrecht, realisierbar durch bspw. Matten oder Körbe.

Die vierte Untergliederung stellt die Frage nach dem **Bewehrungsmaterial** dar.

Beispielhaft zeigt Abbildung 1 eine Strangbewehrung, die prozessbegleitend zur Extrusion eingebracht wird, um die Zugtragfähigkeit in Richtung des Druckpfades zu erhöhen. Sie ist parallel zum Druckpfad ausgerichtet und besteht aus mineralisch gebundenen Carbonfasern.

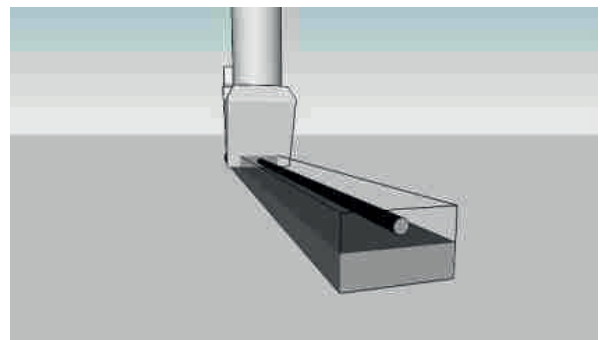


Abb. 1: Strangbewehrung in der Druckschicht parallel zum Druckpfad

Auswertung von Versuchen

Um eine erste Einschätzung der Effektivität und der erreichbaren Verbundqualität der Bewehrungskonzepte zu erhalten, werden bereits durchgeführte Biege- und Pull-Out Versuche ausgewertet und anhand von Vergleichswerten,

bezogen auf einen entsprechenden Referenzversuch, graphisch dargestellt.

Als Referenzwerte werden die Versuchsergebnisse an unbewehrten gedruckten Proben, für Biegeversuche und an konventionell gegossenen Probekörpern für die Pull-Out Versuche herangezogen. Die Versuchsaufbauten und Materialien bleiben dabei innerhalb der Studien gleich. Da sich die Versuchsaufbauten der jeweiligen Studien aber deutlich unterscheiden, kann die Auswertung nur als erster qualitativer Vergleich herangezogen werden.

Das Diagramm in Abbildung 2 zeigt die Auswertung der Pull-Out Versuche. Es zeigt für die Bewehrung mit Stahlseilen (blau; Kabel A, B und C) eine deutliche Verschlechterung des Verbundes bei den Druckproben im Vergleich zu den Versuchen an konventionell gegossenen Proben. Bei den Versuchen mit geschraubter Bewehrung (grün) zeigt sich zudem eine abnehmende Verbundqualität bei späterem Einbau der Bewehrung. Bei Einbringen 2 min nach dem Druck des Betons stellen sich mit -8% nur etwas schlechtere Verbundeigenschaften im Vergleich zu gegossenen Proben ein. Bei einem Einbau nach 50 min verschlechtert sich der Verbund zwischen Beton und Bewehrung drastisch.

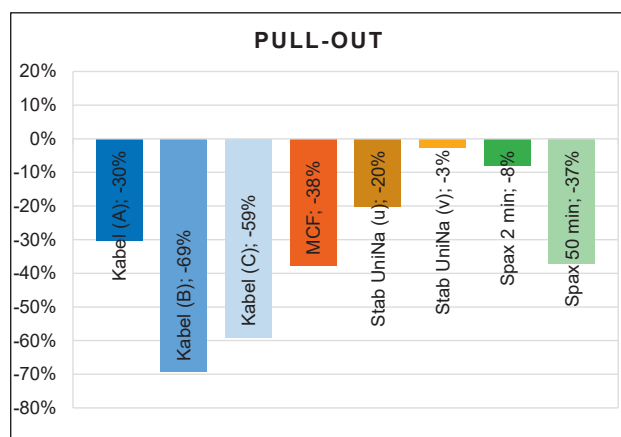


Abb. 2: Auswertung der Pull-Out Versuche

Fazit und Ausblick.

Resultierend aus den Erkenntnissen dieser Arbeit erweisen sich einige Konzept als mehr oder weniger sinnvoll für eine zukünftige Weiterentwicklung. Vielversprechend erscheint der Einsatz von Kurzfasern, da es für die Integration keiner zusätzlichen Einrichtung bedarf und erste Versuche bereits gute Ergebnisse zur Tragfähigkeitssteigerung liefern. Auch die Anwendung von Bewehrungsstäben scheint zukunftsfähig. Besonders die Integration der Stäbe in die Druckfugen ist unkompliziert und bietet eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung bei Belastung senkrecht zur Schichtebene. Für eine Bewehrung senkrecht zu den Druckschichten scheint eine geschraubte Bewehrung zweckmäßig, da sich der Verbund dadurch deutlich verbessert – oder die Anwendung von nachträglich aufgebracht Vorspannung

Als weniger empfehlenswert erscheinen die Konzepte mit kontinuierlichem Aufbau der Bewehrungsstruktur im Zusammenhang mit Schweißvorgängen. Obwohl sie im Hinblick auf die geometrische Flexibilität vorteilhaft wirken, überwiegen die Nachteile. Diese sind u.a. lange Fertigungszeiten, Hitzeentwicklung durch das Schweißen und ein hoher maschineller Aufwand.

Für die Bewehrungsstrategien sind weiterführend noch einige Problemstellungen zu bearbeiten, wie die Verbesserung des Verbundes, die Automatisierung des Bewehrungsprozesses und die Integration in den Druckvorgang. Des Weiteren sollte betrachtet werden, welche Bewehrungssysteme man miteinander kombinieren kann, um ein möglichst effizientes Ergebnis zu erzielen. Weiterhin müssen die Bewehrungssysteme im Zusammenhang mit einer optimierten Topologie betrachtet werden, um möglichst materialsparende, nachhaltige Bauteilformen zu realisieren.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Weger, D. (2020) *Additive Fertigung von Betonstrukturen mit der Selective Paste Intrusion – SPI*. München: Universitätsbibliothek der TU München.
- [2] Mechtcherine, V.; Nerella, V. N. (2019) *Beton-3D-Druck durch selektive Ablage* in: Beton- und Stahlbetonbau 114, H. 1, S. 24–32. <https://doi.org/10.1002/best.201800073>
- [3] Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. [Hrsg.] (2021) *Beton-Kalender/ Beton-Kalender 2022 – Schwerpunkte: Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung*. Berlin: Ernst & Sohn.
- [4] Kalthoff, M.; Raupach, M.; Matschei, T. (2021) *Investigation into the Integration of Impregnated Glass and Carbon Textiles in a Laboratory Mortar Extruder (LabMorTex)* in: Materials 14, Nr. 23, p. 7406. <https://doi.org/10.3390/ma14237406>
- [5] Ayres, P. et al. (2019) *SCRIM – Sparse Concrete Reinforcement in Meshworks* in: *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*. Cham: Springer International Publishing, pp. 207–220.
- [6] Mechtcherine, V.; Nerella, V. N. (2018) *Integration der Bewehrung beim 3D-Druck mit Beton* in: Beton- und Stahlbetonbau 113, H. 7, S. 496–504. <https://doi.org/10.1002/best.201800>

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. [Hrsg.] (2021) *Beton-Kalender/ Beton-Kalender 2022 – Schwerpunkte: Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung*. Berlin: Ernst & Sohn.
2. Claßen, M.; Claßen, J.; Sharma, R. (2020) *Konzeptionierung eines praxisorientierten 3D-Druckverfahrens für den Verbundwerkstoff Stahlbeton (AMoRC)* in: Beton- und Stahlbetonbau 115, H. 12, S. 934–942. <https://doi.org/10.1002/best.202000023>
3. Kalthoff, M.; Raupach, M.; Matschei, T. (2021) *Investigation into the Integration of Impregnated Glass and Carbon Textiles in a Laboratory Mortar Extruder (LabMorTex)* in: Materials 14, Nr. 23, p. 7406. <https://doi.org/10.3390/ma14237406>
4. Matthäus, C. et al. (2020) *Interlayer Reinforcement Combined with Fiber Reinforcement for Extruded Lightweight Mortar Elements* in: Materials (Basel, Switzerland) 13, Nr. 21, p. 4778. <https://doi.org/10.3390/ma13214778>
5. Mechtcherine, V. et al. (2020) *Extrusion-Based Additive Manufacturing with Carbon Reinforced Concrete: Concept and Feasibility Study* in: Materials (Basel, Switzerland) 13, Nr. 11. <https://doi.org/10.3390/ma13112568>

Autor

Johanna Schlögel Bachelorstudiengang (B.Eng.) und Mastersudium (M.Eng.) an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Hochschule München

Betreuer

Jörg Jungwirth, Prof. Dr.-Ing.
Christiane Sophie Richter, M. Sc.

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät 02 Bauingenieurwesen der Hochschule München.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ANALYSE VON LAGEREINRICHTUNGEN KIPPGEFÄHRDETER SPANNBETONBINDER UNTER BERÜCKSICHTIGUNG STATISCHER HERAUSFORDERUNGEN

Bachelorarbeit

Michael Scholz

Der Fertigteilbau hat sich in den letzten Jahrzehnten vor allem für den Bau von Industrieprojekten durchgesetzt. Dort müssen meist sehr große Dachspannweiten mit Dachbinder überbrückt werden. Die Firma KLEBL GmbH betreibt sechs Fertigteilwerke in Deutschland. In jedem dieser Werke werden Spannbetonbinder mit Längen über 30 m produziert. Dabei ist ein wichtiger Bestandteil der Produktion die korrekte Lagerung der kippgefährdeten schlanken Spannbetonbinder auf dem Lagerplatz. Im Zuge dieser Arbeit wurden drei ausgewählte Lagereinrichtungen auf ihre statische Eignung zur Lagerung der kippgefährdeten Spannbetonbinder untersucht. Mit Hilfe von zwei händischen Rechenverfahren und einer nichtlinearen Finite Elemente Berechnung wurde das Torsionsmoment am Auflager ermittelt. Hierfür diente als Berechnungsbeispiel ein 29,21 m langer Parallelgurtbinder, welcher für die Ermittlung der geometrischen Imperfektionen mittels Laserscanning aufgenommen wurde. Die abschließende Beurteilung mit Hilfe des Ausnutzungsgrades ergab, dass nur eine der drei Lagereinrichtung statisch ausreichend tragfähig ist. Bei einem Vergleich der drei Berechnungsverfahren wurde festgestellt, dass das händische Näherungsverfahren nach *König/Pauli* für die weitere Anwendung in der Praxis ausreichend genaue Ergebnisse für das Torsionsmoment am Auflager liefert.

Keywords: Stabilität, Kippen, Spannbetonbinder, Imperfektionen, Laserscanning, FEM-Berechnung, Lagereinrichtung, nicht-lineare Berechnung

Problemstellung

Das Kippen von Bauteilen ist ein gängiges Bemessungsproblem im Fertigteilbau, welches sowohl im Endzustand, Bauzustand aber auch im Lagerzustand berücksichtigt werden muss. In dieser Arbeit wird das Kippen von schlanken Spannbetonbindern im Lagerzustand näher

untersucht. Bei der Lagerung wirkt nicht nur das Eigengewicht, sondern deutlich mehr Faktoren auf den schlanken Träger ein. Dabei müssen die Vorspannung, geometrische Imperfektionen, Kriechen, Schwinden und äußere Temperatureinflüsse berücksichtigt werden.

Üblicherweise werden die Binder in der Praxis mittels eines einseitigen Gabelauflagers gelagert. Für diese Art der Lagerung sind auf dem Markt keine geeigneten Lagereinrichtungen verfügbar, ebenso gibt es keine genormte Regelung für eine korrekte Sicherung solcher Bauteile. Die Konsequenz daraus ist, dass individuelle Konstruktionen bemessen und angefertigt werden müssen. Jedoch wird für die Bemessung ein Torsionsmoment am Auflager benötigt. Das Problem dabei ist, dass in der DIN EN 1992-1-1 [1] lediglich ein vereinfachter Ansatz enthalten ist, welcher aufgrund der vereinfachten Annahmen stark auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse liefert. Eine Bemessung mit diesem Ansatz wäre zu unwirtschaftlich und die daraus resultierende Lagereinrichtung zu unhandlich. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein genaueres händisches Verfahren und die FEM-Berechnung verglichen und anhand der Ergebnisse ein maßgebendes Torsionsmoment am Auflager festgelegt.

Analyse der Lagereinrichtungen

Alle Berechnungen in dieser Arbeit wurden auf charakteristischem Niveau durchgeführt, um aussagekräftigere Ergebnisse für die Bewertung der Resttragfähigkeit zu erhalten. Die maximale Tragfähigkeit wurde von den drei meist verwendeten Lagereinrichtungen der Firma KLEBL GmbH ermittelt. Diese sind der Stahlrechen (vgl. Abb. 6), das Stahl-Stecksystem (vgl. Abb. 7) und das Wand-Stecksystem (vgl. Abb. 8). Da es sich dabei um Stahlkonstruktionen handelt, liegen der Bemessung die DIN EN 1993-1-1 [2] und die DIN EN 1993-1-8 [3] zugrunde.

Die Traglastermittlung erfolgte für den Stahlrechen und das Wand-Stecksystem mit Modulen der Baustatik Software mb Worksuite [4] und für das Stahl-Stecksystem mit der FEM-Programmsoftware SOFiSTiK [5]. Als maximale Traglast für das Stahlstecksystem konnte eine

Querkraft von 48,50 kN und ein zugehöriges Moment von 38,80 kNm ermittelt werden.

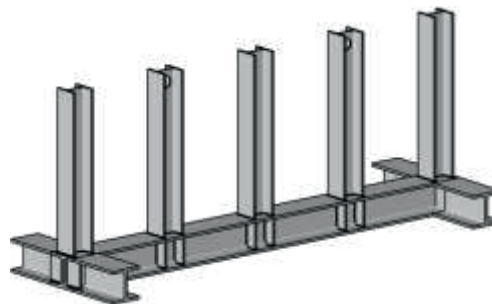


Abb. 6: Stahlrechen

Für das Stahlstecksystem war eine nichtlineare Berechnung notwendig, da im Einspannbereich des senkrechten Rohres lokal große Querkraften eingeleitet werden. Dadurch ist mit lokalem Ausbeulen und somit mit einem nichtlinearen Versagensmechanismus zu rechnen. Die Traglastermittlung ergab eine maximal aufnehmbare Querkraft von 11,60 kN und ein zugehöriges Moment von 17,98 kNm.

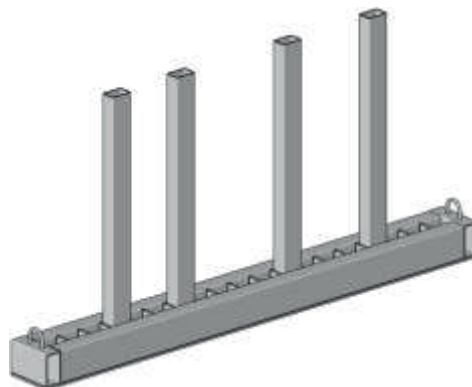


Abb. 7: Stahl-Stecksystem

Die Bemessung des Wand-Stecksystems erfolgte wiederum mit mb Worksuite und ergab eine maximal aufnehmbare Querkraft von 16,20 kN und zugehöriges Moment von 3,20 kNm.

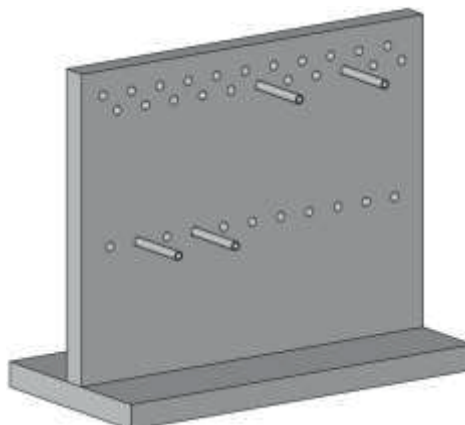


Abb. 8: Wand-Stecksystem

Berechnung mit Näherungsverfahren

Das erste betrachtete Näherungsverfahren ist das vereinfachte Verfahren, welches in der DIN EN 1992-1-1 Kapitel 5.9 [1] geregelt ist. Aufgrund der einfachen und kurzen Formel wird lediglich eine horizontale Vorverformung von $l/300$ im Ansatz berücksichtigt. Faktoren, wie die Querschnittsverdrehung, Kriechen oder Schwinden werden nicht berücksichtigt. Dieser Ansatz liefert als Ergebnis ein Torsionsmoment am Auflager von 55,32 kNm.

Als zweites Verfahren wurde das Näherungsverfahren nach *König/Pauli* [6] angewendet. Es kam zur Auswahl, da der Ansatz geometrische Imperfektionen, das Kriechen und die Bauteilsteifigkeiten im Zustand II enthält. Der gesamte Rechengang ist zudem händisch in einem vertretbaren Aufwand umsetzbar. Die Imperfektionen werden für die horizontale Vorverformung mit $l/500$ und für die Querschnittsverdrehung mit $0,43^\circ$ angesetzt. Das Kriechen wird vereinfacht durch Erhöhung der geometrischen Imperfektionen mit dem Faktor 2 berücksichtigt. Mit diesem deutlich umfangreicheren Näherungsverfahren wurde ein Torsionsmoment am Auflager von 37,90 kNm berechnet. Dieses ist im Vergleich zum Verfahren nach der DIN EN 1992-1-1 um 31,5 % kleiner.

Vermessung der Spannbetonbinder

Für die Berechnung mit der Finiten Elemente Methode werden zusätzlich zu den bereits bekannten Eingangswerte noch die unbekannten geometrischen Imperfektionen benötigt. Diese werden in dieser Arbeit mit Hilfe von Laserscanning-Vermessung des ausgewählten Beispielbinders ermittelt.

In der Theorie sind laut [7] die geometrischen Imperfektionen in Vorverkrümmungen und Vorverdrehungen zu unterteilen. Vorverkrümmungen resultieren primär aus

Ungenauigkeiten in der Schalungsgeometrie, sowie aus ungleichmäßigen Temperatur- und Schwindvorgängen über die Querschnittsdicke. Vorverdrehungen hingegen entstehen vor allem infolge der zweiachsigen Biegebeanspruchung, welche durch das seitliche Ausweichen des Druckgurtes hervorgerufen wird. Für die Eingabe in SOFiSTiK ist jedoch nicht die Zusammensetzung der Imperfektionen relevant, sondern lediglich die Absolutwerte der horizontalen Verschiebung in Feldmitte und der Querschnittsverdrehung des Binders.

Die Vermessung erfolgte mit der Trimble SX10 Totalstation in Kombination mit dem Controller Trimble TSC7 (vgl. Abb. 9).



Abb. 9: Trimble SX10 (links) und Trimble TSC7 (rechts) [8, 9]

Konkret wurden vier Spannbetonbinder mit identischer Geometrie gescannt. Dies ist zwar eine relativ kleine Messreihe, aber für die benötigten Genauigkeiten ausreichend. Für möglichst vergleichbare Messergebnisse wurden alle Binder auf derselben Position und im Lagerzustand mit einseitiger Einspannung vermessen. Das Ergebnis der Laserscans ist in Abb. 10 zu sehen. Darin ist die gesamte Punktwolke mit Farbinformationen dargestellt.



Abb. 10: Punktwolke des gescannten Binders

Die Auswertung der gescannten Punktwolken erfolgte im ersten Schritt graphisch mit dem CAD-Programm AutoCAD und im zweiten Schritt tabellarisch mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel. Die Ergebnisse der horizontalen Verschiebung zeigten, dass die Ansätze der Näherungsverfahren von $l/300$ und $l/500$ auf der sicheren Seite lagen. Die gemessenen Werte bewegen sich in einem Bereich von $l/2900$ bis $l/800$. Folglich wurde für die weitere Berechnung der ungünstigste Wert mit $l/800$ gewählt. Bei der Querschnittsverdrehung hingegen bewegen sich die gemessenen Werte im Bereich von $1,32^\circ$ bis $2,14^\circ$ und somit deutlich über dem Ansatz des Näherungsverfahrens nach *König/Pauli*. Aufgrund der ungleichmäßigen Verdrehungen über die Trägerlänge wurde für die weitere Berechnung eine konstante Querschnittsverdrehung des Binders von 2° festgelegt.

Berechnung mit FEM

Für die realitätsnahe Berechnung mit einem FEM-Programm wurde SOFiSTiK gewählt, da dieses alle relevanten Einflussfaktoren gezielt berücksichtigen kann. Die Eingabe des Spannbetonbinders erfolgte mit Hilfe der textbasierten Eingabe „Teddy“, welche sich durch die vielfältigen Eingabemöglichkeiten auszeichnet. Das ermöglichte unter anderem, die Verformungen durch Kriechen infolge der Vorspannung auf den Tag genau simulieren zu können.

Folglich war es auch möglich, den Binder mit den zuvor gewählten Imperfektionen zu verformen und anschließend durch das Eigengewicht zu belasten. In Abb. 11 ist die finale Verformungsfigur des Spannbetonbinders im Lagerzustand abgebildet. Darin sind die horizontale Auslenkung, die Querschnittsverdrehung und die Überhöhung infolge der Vorspannung deutlich zu sehen. Als Ergebnis der Berechnung resultierte ein Torsionsmoment am Auflager von 35,70 kNm.



Abb. 11: Verformungsfigur unter Eigenlast

Ergebnisse

Von den drei in dieser Arbeit untersuchten Berechnungsvarianten lieferte die Finite-Elemente-Berechnung für den hier untersuchten Spannbetonbinder das kleinste Torsionsmoment am Auflager. Somit wurde das maßgebende Moment von 35,70 kNm für die abschließende Bewertung der Lagereinrichtungen verwendet. Die Bewertung erfolgte anhand der Ausnutzungsgrade. Für den Stahlrechen konnte dieser zu 92 %, für das Stahl-Stecksystem zu 199 % und für das Wand-Stecksystem zu 130 % ermittelt werden. Folglich ist lediglich der Stahlrechen mit einer Resttragfähigkeit von 8 % für die Lagerung des untersuchten Spannbetonbinders geeignet.

Abschließend ist festzuhalten, dass der Stahlrechen für einen Großteil der produzierten Binder der Firma KLEBL GmbH für die einseitige Einspannung in den Lagereinrichtungen ausreichend ist. Das Stahl- und Wand-Stecksystem kann dennoch für die Lagerung von kleineren Bindern verwendet werden, jedoch nur mit zusätzlicher Kontrollrechnung. Hierfür ist der händische Nachweis mit dem Näherungsverfahren nach *König/Pauli* ausreichend genau, um die Eignung der Lagereinrichtung für andere Binder Geometrien nachzuweisen. Für die Lagerung von Bindern mit größeren Abmessungen müssen zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. die Anbringung einer zweiten Lagereinrichtung, getroffen werden.

Literatur

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Fingerloos, F.; Hegger, J.; Zilch, K.: Eurocode 2 für Deutschland – DIN EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit Nationalem Anhang: kommentierte und konsolidierte Fassung. Beuth, Berlin, 2016.
- [2] DIN EN 1993-1-1:2010-12, Eurocode_3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten_ - Teil_1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN_1993-1-1:2005_ + AC:2009.
- [3] DIN EN 1993-1-8:2010-12, Eurocode_3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten_ - Teil_1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN_1993-1-8:2005_ + AC:2009.
- [4] mb Worksuite Version 2022 [Software], <https://www.mbaec.de/produkte/> [Zugriff am: 14.12.2022].
- [5] SOFiSTiK Version 2023 [Software], <https://www.sofistik.de/> [Zugriff am: 14.12.2022].
- [6] Gert, K.; Walter, P.: Nachweis der Kippstabilität von schlanken Fertigteilträgern aus Stahlbeton und Spannbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau (1992), Heft 5, S. 109-112.
- [7] Agnieszka, K.: Architekt und Ingenieur – Untersuchungen zum Kippen schlanker Stahlbeton- und Spannbetonträger beliebiger Geometrie mit der nichtlinearen FEM. Technische Universität Dortmund, BetonbauHeft 6, Eigenverlag der TU Dortmund, Dortmund, 2015.
- [8] AllTerra Deutschland GmbH: Feldrechner TSC7 Controller, 2022, <https://allterra-dno.de/feldrechner-tsc7-controller/> [Zugriff am: 17.11.2022].
- [9] AllTerra Deutschland GmbH: Datenblatt Trimble SX10 Scanning-Totalstation, 2017, <https://allterra-dno.de/totalstation-sx10/> [Zugriff am: 17.11.2022].

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D.: Beton-Kalender 2016 – Beton im Hochbau Silos und Behälter, Beton-Kalender (VCH) *, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2016.
2. Otto, D.; Kurt, H.; Hans-Ulrich, L.: Übersicht über praktische Verfahren zum Nachweis der Kippsicherheit schlanker Stahlbeton- und Spannbetonträger. In: Beton- und Stahlbetonbau (1985), Heft 10, S. 274-280.
3. Gert, K.; Walter, P.: Nachweis der Kippstabilität von schlanken Fertigteilträgern aus Stahlbeton und Spannbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau (1992), Heft 6, S. 149-151.
4. Dieter, K.; Karl-Heinz, E.: Berechnung kippgefährdeter Stahlbeton- und Spannbetonträger nach der Theorie II. Ordnung. In: Beton- und Stahlbetonbau (1992), Heft 5, S. 113-118.

Autor

Michael Scholz

seit 2023	Studium: Master Bauingenieurwesen „Bauen im Bestand“, OTH Regensburg
2019 – 2023	Duales Studium: Bachelor Bauingenieurwesen, OTH Regensburg
2018 – 2022	Ausbildung: Beton- und Stahlbetonbauer, Firma KLEBL GmbH
2016 – 2018	Fachhochschulreife, Maximilian-Kolbe Schule Neumarkt i.d.Opf.

Betreuer

Die Arbeit wurde an der Fakultät Bauingenieurwesen der OTH Regensburg im Fachbereich Stahlbetonbau und Spannbetonbau bei Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Finckh angefertigt. Die Bachelorarbeit ist in Zusammenarbeit mit der Firma KLEBL GmbH unter Betreuung von Dipl.-Ing. Timo Schöpe entstanden.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

NUMERISCHE SIMULATIONEN DES PFAHLEINBRINGUNGS-PROZESSES VON OFFENEN STAHLROHRPFÄHLEN MIT DEM IN 2 und 3D

Masterarbeit

Nick Sommer

Pfropfenbildung ist ein nicht vollumfänglich erforschtes Phänomen, welches einen großen Einfluss auf die Tragfähigkeit von offenen Stahlrohrpfählen hat. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird Pfropfenbildung mittels der Durchführung einer Reihe von Pfahleinbringungsversuchen mit DEM in 2 und 3D hinsichtlich verschiedener Installationsmethoden untersucht. Anschließend wird die Pfahltragfähigkeit mithilfe von statischen Pfahlprobeversuchen ermittelt. Es wurde die Beziehung der in den Boden induzierten Spannungen zur Pfropfenbildung und letztlich der Tragfähigkeit erfolgreich aufgezeigt. Die Simulationen zeigten, dass Drücken die größten Spannungen in den Boden induziert und somit Pfropfenbildung für diesen Fall am wahrscheinlichsten ist. Allerdings scheint es als wäre die Pfropfenbildung unter speziellen Voraussetzungen für Rütteln wahrscheinlicher. Des Weiteren wurde beobachtet, dass sich ein Pfropfen während der Pfahleinbringung formieren, auflösen und wieder formieren kann.

Keywords: Pfropfenbildung, Pfahltragfähigkeit, Pfahl-Boden-Interaktion, PFC, DEM

Einführung

Offene Stahlrohrpfähle sind weit verbreitete Gründungselemente, die häufig bei maritimen Bauwerken wegen ihrer vorteilhaften Eigenschaften zum Einsatz kommen. Allerdings ist die Pfahl-Boden-Interaktion für Pfähle im Allgemeinen nicht ausreichend bekannt, um die Tragfähigkeit vorherzusagen. Darüber hinaus ist die Pfropfenbildung, die ebenfalls noch nicht

vollständig verstanden ist, ein Phänomen, das mit dem Einbau von offenen Rohrpfählen zusammenhängt. Es beschreibt die Bildung eines Bodenpfropfens, der sich aufgrund hoher horizontaler Spannungen im Pfahl bildet und das Eindringen von weiterem Bodenmaterial in das Pfahlinnere verhindert [1]. Bis jetzt ist es weder möglich, das Auftreten noch die Größe der Verpfropfung vorherzusagen. Dabei ist die Rolle der Pfahleinbringungsmethode - Drücken,

Rammen oder Rütteln - eine wichtige Frage, die es zu lösen gilt. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist aufgrund der großen Verformungen für die Simulation der Pfahleinbringung nicht ideal. Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) bietet einen anderen Ansatz, der näher an der Physik granularer Medien liegt. Sie hat daher das Potenzial, die Verpropfung und das Verhalten des Pfahls trotz der vorhandenen Mängel besser verstehen und vorhersagen zu können.

Vorbereitung für Simulationen

Die numerischen Simulationen wurden mit der DEM-Software PFC durchgeführt. Für die 2D- und die 3D-Simulation wurden ein quadratisches (sh. Abb. 1) bzw. ein zylindrisches Gefäß gewählt, das die Partikel, die die mechanischen Eigenschaften des Karlsruhe Feinsands haben, enthält. Zur Minimierung der Rechenzeit wurden die Partikel in der 2D-Simulation um den Faktor 100 hochskaliert und in der 3D-Simulation um 500 vergrößert.

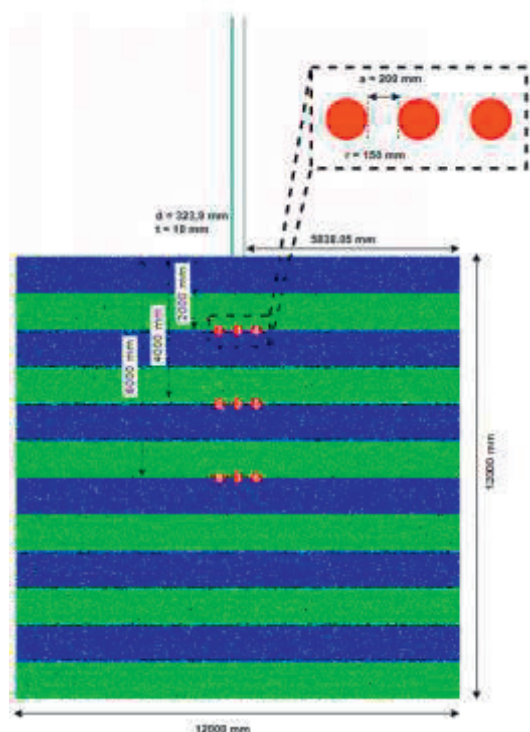


Abb. 1: Schematische Ansicht des numerischen 2D-Modells

Zur Simulation des Drückens wurde dem Pfahl eine konstante Geschwindigkeit von 1,0 m/s

zugewiesen. Für den Rammvorgang wurde das komplexe Zeit-Kraft-Signal durch Aufbringen einer Stufenlast auf den Pfahl simuliert [2]. Für das Rütteln wurde dem Pfahl eine sinusförmige Geschwindigkeitsfunktion mit einer Rüttelfrequenz von 30 Hz zugewiesen. Die Verläufe der Pfahleinbringungsmethoden sind in Abb. 2 dargestellt

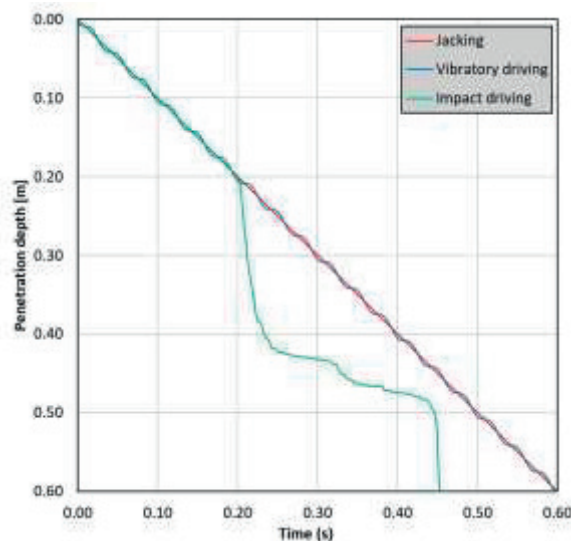


Abb. 2: Verläufe der verschiedenen Pfahleinbringungsmethoden

2D-Simulation

Die Spannungen im 2D-Modell (s. Abb. 3) sind für den gedrückten Pfahl am größten. Danach folgt der gerüttelte Pfahl, wohingegen der gerammte Pfahl die geringsten Spannungen in den Boden induziert.

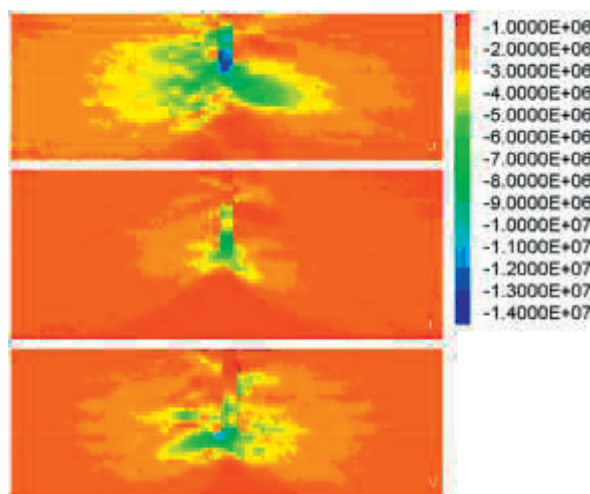


Abb. 3: Verteilung der Horizontalspannungen im 3D-Modell bei der Endeindringtiefe [N/m²]: Oben, Drücken; Mitte, Rammen; Unten, Rütteln

Die Höhe des Bodens im Inneren des Pfahls dient als erster Indikator dafür, ob eine Pfpfenbildung stattgefunden hat. Beim gerüttelten und gedrückten Pfahl ist das Bodenniveau deutlich niedriger als außerhalb des Pfahls (s. Abb. 4). Im Gegensatz ist das Bodenniveau beim gerammten Pfahl nahezu unverändert. Die Bodenschichten im Inneren des gerammten Pfahls sind gleichmäßig dick. Der Pfahl befindet sich also in einem unverpfpften Zustand. Im Gegensatz dazu werden die Bodenschichten im Inneren des gedrückten und des gerüttelten Pfahls von oben nach unten immer dünner. Es dringt weniger Bodenmaterial während der Pfahleinbringung in das Pfahlinnere ein. Der gedrückte und der gerüttelte Pfahl sind daher teilweise verpfpft.

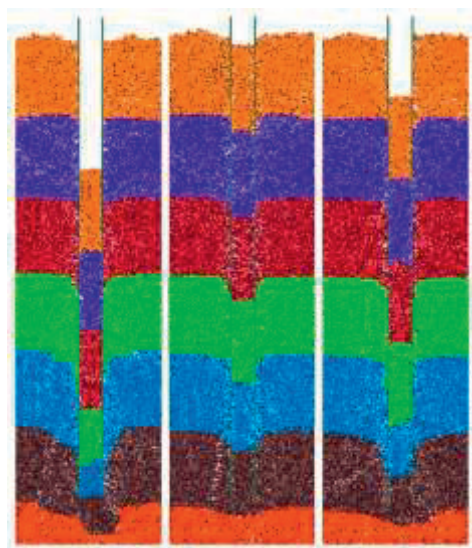


Abb. 4: Querschnitt der Bodensäule mit Einteilung des Bodens in 1m-Schichten in der 2D-Simulation: Drücken, Rammen, Rütteln (links nach rechts)

Die Lastsetzungskurve (s. Abb. 5) zeigt, dass der gedrückte Pfahl von allen Pfählen die höchste Tragfähigkeit aufweist. Der gerüttelte Pfahl hat eine deutlich geringere Tragfähigkeit als der gedrückte Pfahl, gefolgt vom gerammten Pfahl. Der Pfahl, der am meisten pfpfte, scheint die höchste Tragfähigkeit zu haben.

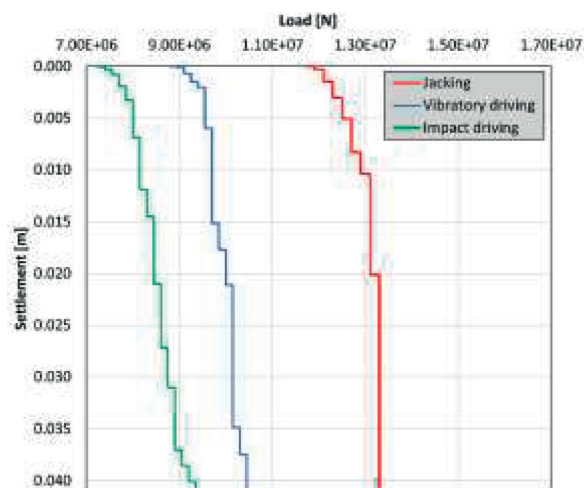


Abb. 5: Lastsetzungskurve in der 2D-Simulation

3D-Simulation

Im Gegensatz zur 2D-Simulation treten hier die größten Spannungen um den gerüttelten Pfahl auf, gefolgt von dem gedrückten Pfahl (s. Abb. 6). Die Spannungen, die vom gerammten Pfahl induziert wurden, sind erneut am geringsten.

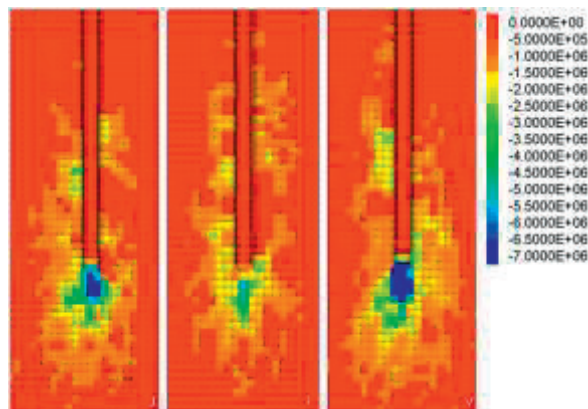


Abb. 6: Verteilung der Horizontalspannungen im 3D-Modell bei der Endeindringtiefe [N/m²]: Oben, Drücken; Mitte, Rammen; Unten, Rütteln

Der Querschnitt der Bodensäule zeigt, dass der gedrückte und der gerüttelte Pfahl verpfpfen, da nach etwa 5,0 m bzw. 3,0 m kein Boden mehr in den Pfahl eindringt (s. Abb. 7). Bemerkenswert ist, dass bei dem gerammten Pfahl, der bei der endgültigen Eindringtiefe nicht mehr verpfpft ist, nur wenig Boden der dritten Schicht im Pfahl vorhanden ist. Dies deutet darauf hin, dass der Pfahl in etwa 2,5 m Tiefe einen Pfpfen gebildet hat, der sich jedoch während der weiteren Pfahleinbringung gelöst hat.

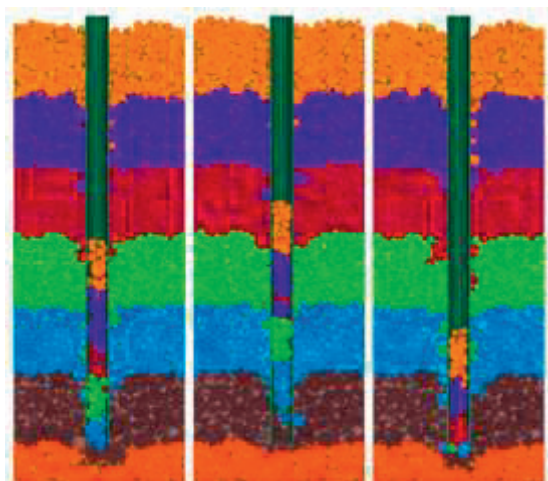


Abb. 7: Querschnitt der Bodensäule mit Einteilung des Bodens in 1m-Schichten in der 3D-Simulation: Drücken, Rammen, Rütteln (links nach rechts)

Auch der Verlauf des IFR (Incremental Filling Ratio) [3] (s. Abb. 8) unterstreicht diese Beobachtungen. Der IFR ist für den gedrückten Pfahl 0%. Für den Rüttelpfahl schwankt der IFR um 0%. Beide Pfähle sind verpfropft. Die momentane Pfpfenbildung des Rammpfahls bei 2.5 m ist ebenfalls erkennbar. Der IFR des gedrückten Pfahls ist bei einer Eindringtiefe von 4,3 m gleich 0%. Dies deutet daraufhin, dass der Pfahl zwei Mal verpfropft.

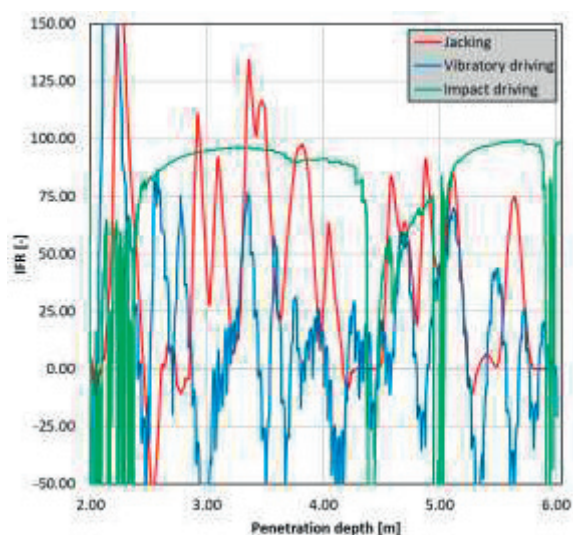


Abb. 8: IFR-Verlauf während des Pfahleinbringungsprozesses in der 3D-Simulation

Der Verlauf der Lastsetzungskurve (s. Abb. 9) zeigt deutliche Unterschiede: Zum einen setzt sich der gerammte Pfahl nach dem Aufbringen

von 4,25 MN bis 4,50 MN relativ schnell. Der gedrückte und der gerüttelte Pfahl zeigen dagegen ein eher duktils Versagen. Der gerüttelte hat dabei eine etwas höhere Tragfähigkeit als der gedrückte Pfahl. Ob es zu einer Pfpfenbildung kam, ist sehr entscheidend für das Tragverhalten des Pfahls. Pfähle, die in der endgültigen Eindringtiefe verpfropft sind, weisen eine höhere Tragfähigkeit auf als unverpfropfte Pfähle.

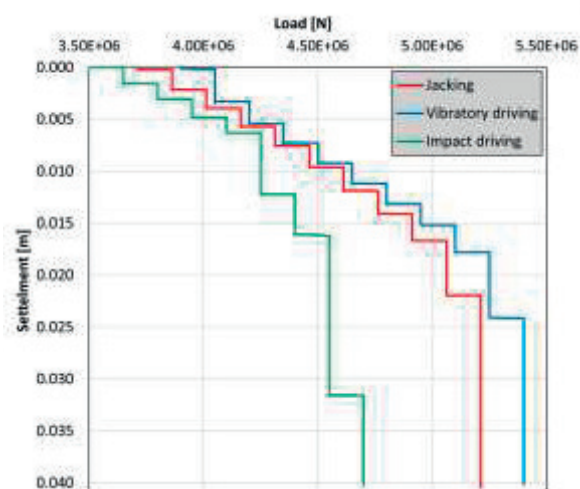


Abb. 9: Lastsetzungskurve in der 3D-Simulation

Ergebnisse und Ausblick

Die in den Boden induzierten Spannungen, die Pfpfenbildung und die Pfahltragfähigkeit wurden in dieser Arbeit für die verschiedenen Pfahleinbringungsmethoden vergleichend analysiert. Basierend auf dieser Arbeit und Folgeuntersuchungen im Feld könnte die Pfahleinbringungsmethode zukünftig anders gewählt werden. Zudem können die gewonnenen Erkenntnisse dabei helfen eine Bemessungsmethode in der Norm unter Berücksichtigung der Pfpfenbildung zu entwerfen. Feld- bzw. Laborversuche sind erforderlich, um die erarbeiteten Ergebnisse zu verifizieren.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Randolph, M. F., Leong, E. C., Houlsby, G. T. (1991) One-dimensional analysis of soil plugs in pipe piles. Journal of Geotechnical Engineering, 118 (N. 5), S. 743-759
- [2]: Zhang, N. (2019). A micromechanical study of Standard Penetration Test
- [3]: Paik, K., Salgado, R. (2003). Determination of Bearing Capacity of Open-Ended Piles in Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129 (No. 1), S. 46-57

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Li, L., Wu, W., Liu, H., Lehane, B. (2021). DEM analysis of the plugging effect of open-ended pile during the installation process
2. Zhang, N. (2019). A micromechanical study of Standard Penetration Test.
3. Islam, S. (2021). DEM Simulation of Triaxial Behaviour of Karlsruhe Fine Sand using Particle Flow Code

Autor

Nick Sommer, M.Sc. TUM

Seit 2023	Wissenschaftlicher Mitarbeiter; Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau
2020 – 2023	Masterstudium des Bauingenieurwesens; TU München
2022	Wissenschaftliche Hilfskraft; Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau
2020 – 2022	Werkstudent; SSP Sennwald + Steger Beratende Ingenieure Partnergesellschaft mbB
2019 – 2020	Werkstudent; Ingenieursozietät Prof. Dr.- Ing. Katzenbach GmbH
2017 – 2020	Bachelorstudium des Bauingenieurwesens; TU Darmstadt

Betreuer

Dr.-Ing. Andrés Alfonso Peña Olarte

Dipl.-Ing. Mussie Kidane

Die Arbeit wurde am Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München (TUM) angefertigt

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet



ISBN 978-3-89650-551-4 // € (D)



9 783896 505514

