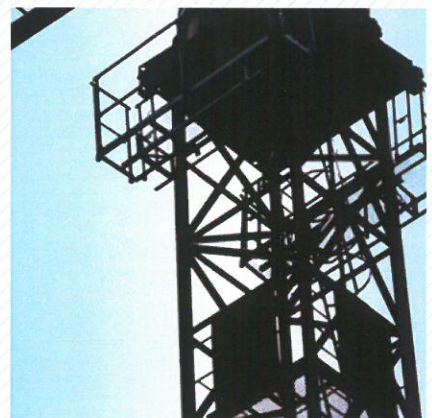


# HOCHSCHULPREIS

## des Bayerischen Baugewerbes



Wettbewerbsbeiträge **2018**

# 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](http://www.lbb-bayern.de)

## Mit Beiträgen von

Julian Danner • Dominik Eber • Simone Guist • Justus Adrian Gruber • Kai Hofmann •  
Natascha Krnic • Judith Lindermayer • Jannik Lutz • Axel Neißer-Deiters • Rudolf Röß •  
Michael Roth • Christine Sander • Daniel Wandelt • Theresa Weigl • Sarah Wörner

## 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](http://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](http://www.voegel.com)

München, April 2018

## VORWORT

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

**In der vorliegenden Veröffentlichung werden die Arbeiten, die 2018 für die Teilnahme am Hochschulpreis ausgewählt wurden, in der von den Verfassern gelieferten Zusammenfassung in alphabetischer Reihenfolge herausgegeben. Vor jeder Arbeit befinden sich ergänzende Informationen zu den Verfassern und der Auszeichnung.**

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

In diesem Jahr wurden insgesamt 15 Bachelor- und Masterarbeiten von

- der Technischen Universität München,
- der Universität der Bundeswehr München,
- der Hochschule für angewandte Wissenschaften in München,
- der Hochschule Augsburg,
- der Hochschule Coburg,
- der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg,
- der Hochschule Rosenheim und
- der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt

eingereicht. Aus den 15 Arbeiten hat der Wettbewerbsausschuss unter Vorsitz von Herrn Prof. Dr.-Ing. Niels Oberbeck entschieden, 10 Arbeiten mit einer Teilnahmeurkunde und 3 Arbeiten mit einem Geldpreis auszuzeichnen.

Mit dem 1. Preis wurde Herr Axel Neiße-Deiters für seine Bachelorarbeit „Einfluss der Calcinerungstemperatur auf physikalisch-hygroscopische Eigenschaften calcinierter Tone am Beispiel Muskovit“ ausgezeichnet.

Mit seiner Arbeit hat er einen wichtigen Beitrag geleistet, um zukünftig Schadstoffe in Beton zu verringern und um Alternativen für die rückläufigen Zementersatzstoffe wie Steinkohle, Flugasche und Hüttensand zu entwickeln. Die Arbeit wurde angefertigt bei Herrn Prof. Thienel und Herrn Scherb an der Universität der Bundeswehr München.

Den 2. Preis erhielt Frau Theresa Weigl für ihre Bachelorarbeit zum Thema „Untersuchungen zum Verbundverhalten von Frischbetonverbundfolien unter nachgestellten Baustellenbedingungen“. Sie hat sich in ihrer Arbeit mit einem Bauverfahren für wasserdichte Tiefgeschosse beschäftigt, das seit einigen Jahren in Deutschland vermehrt verwendet wird. Mit diesen sog. Frischbetonverbundfolien wird die Schalung auf der Außenseite ausgekleidet. Nach dem Betonieren geht die Folie einen festen Verbund mit dem Beton ein. Die Arbeit wurde angefertigt an der Hochschule München bei Herrn Prof. Dauberschmidt.



Der 3. Preis ging an Herrn Michael Roth für seine Bachelorarbeit „Montagehilfe im Trockenbau mit der Microsoft HoloLens am Beispiel: Baubetriebslabor Prüfening“.

Er hat sich in seiner Arbeit mit den Möglichkeiten der Microsoft HoloLens beschäftigt. Zur Erläuterung: Das ist eine Brille, mit der es möglich ist, virtuelle Informationen in das reale Bild hinein zu projizieren. Damit wird es möglich sein, z.B. Bohrpunkte für die Deckenmontage ohne zusätzliches Anzeichnen zu bestimmen. Die Arbeit wurde angefertigt an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg bei Herrn Prof. Hager.

Mehrwert durch die genauen Begründungen der einzelnen Arbeitsschritte und Entscheidungen.

#### **Auszeichnungen mit einer Teilnahmeurkunde**

Mit einer Teilnahmeurkunde und einem Gutschein über 100 Euro für einen Kurs bei der Bayerischen BauAkademie wurden ausgezeichnet:

- Herr Dominik Eber für seine Bachelorarbeit an der Hochschule Rosenheim zum Thema „Sanierung von hochwassergeschädigten Gebäuden - Vergleich der bauteilbezogenen Sanierungskosten in Abhängigkeit der Bauweise“,
- Herr Justus Adrian Gruber für seine Bachelorarbeit an der Universität der Bundeswehr München zum Thema „Evaluation der Linienzahlanalyse bei ausgewählten alpinen Flüssen in Süddeutschland“,
- Frau Simone Guist für ihre Masterarbeit an der Hochschule München zum Thema „Schubuntersuchungen an Prüfkörpern aus hochfestem Mörtel und der Kontaktzone zu Basaltstein“,
- Herr Kai Hofmann für seine Masterarbeit zum Thema „Experimentelle Versuchsdurchführung an Hochleistungsverbindungsdetails im Stahlbetonfertigteiltbau“, gefertigt an den Hochschulen Koblenz und Coburg
- Frau Natascha Krnic für ihre Masterarbeit an der Hochschule München zum Thema „Entwicklung einer automatisierten Leistungsbeschreibung durch den Einsatz von Building Information Modeling“,
- Frau Judith Lindermayer für ihre Bachelorarbeit an der Hochschule München zum Thema „Untersuchungen zur Verfestigung von Sand und Bindung von Schwermetallen in Sanden durch Mikroorganismen“,
- Herr Rudolf Röß für seine Master´s Thesis an der Technischen Universität München zum Thema „Tragverhalten von Verbundträgern mit Profilblechen unter Brandbelastung“,
- Frau Christine Sander für ihre Masterarbeit an der Hochschule München zum Thema „5D-BIM parametrisierte Brückenplanung - Variantenvergleich verschiedener Verkehrsführungen“,
- Herr Daniel Wandelt für seine Bachelorarbeit an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt zum Thema „Traggerüste im konventionellen Hochbau“ sowie
- Frau Sarah Wörner für ihre Bachelorarbeit an der Hochschule Coburg zum Thema „Entwicklung eines Ingenieurmodells für eine Stahlverzahnung“.



Die Sieger v.l.n.r.: Axel Neißer-Deiters (1. Platz), Michael Roth (3. Platz) und Theresa Weigl (2. Platz).



Axel Neißer-Deiters, Dominik Eber, Sarah Wörner, Rudolf Röß, Christine Sander, Daniel Wandelt, Simone Guist, Kai Hofmann, Theresa Weigl, Michael Roth, Judith Lindermayer, Justus Adrian Gruber, Natascha Krnic (v.l.n.r.)

**Fachkolloquium zum Thema „BETON - MEHR ALS GRAU UND SCHWER“**

Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel, Vizepräsident für Forschung am Institut für Werkstoffe des Bauwesens der Universität der Bundeswehr München

Bessere Bildqualität einfügen!!!! Fr. Gleiss fragen!!!!



Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel in Aktion.

## Inhaltsverzeichnis

|  |          |
|--|----------|
| Sanierung von hochwassergeschädigten Gebäuden - Vergleich der bauteilbezogenen Sanierungskosten in Abhängigkeit der Bauweise, Dominik Eber, Hochschule Rosenheim               | Seite 7  |
| Evaluation der Linienzahlanalyse bei ausgewählten alpinen Flüssen in Süddeutschland, Adrian Gruber, Universität der Bundeswehr München   | Seite 13 |
| Schubuntersuchungen an Prüfkörpern aus hochfestem Mörtel und der Kontaktzone zu Basaltstein, Simone Guist, Hochschule München  | Seite 19 |
| Experimentelle Versuchsdurchführung an Hochleistungsverbindungsdetails im Stahlbetonfertigteilbau, Kai Hofmann, Hochschulen Koblenz/Coburg                                     | Seite 25 |
| Entwicklung einer automatisierten Leistungsbeschreibung durch den Einsatz von Building Information Modeling, Natasche Krnic, Hochschule München                                | Seite 31 |
| Untersuchungen zur Verfestigung von Sand und Bindung von Schwermetallen in Sanden durch Mikroorganismen, Judith Lindermayer, Hochschule München                                | Seite 37 |
| Einfluss der Calciniertemperatur auf physikalisch-hygroscopische Eigenschaften calcinierter Tone am Beispiel Muskovit, Axel Neißer-Deiters, Universität der Bundeswehr München | Seite 43 |
| Tragverhalten von Verbundträgern mit Profilblechen unter Brandbelastung, Rudolf Röß, Technische Universität München  | Seite 49 |
| Montagehilfe im Trockenbau mit der Microsoft HoloLens am Beispiel: Baubetriebslabor Prüfening, Michael Roth, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg                    | Seite 55 |
| 5D-BIM parametrisierte Brückenplanung - Variantenvergleich verschiedener Verkehrsführungen, Christine Sander, Hochschule München   | Seite 61 |
| Traggerüste im konventionellen Hochbau, Daniel Wandelt, Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt  | Seite 67 |
| Untersuchungen zum Verbundverhalten von Frischbetonverbundfolien unter nachgestellten Baustellenbedingungen, Theresa Weigl, Hochschule München                                 | Seite 73 |
| Entwicklung eines Ingenieurmodells für eine Stahlverzahnung, Sarah Wörner, Hochschule Coburg   | Seite 79 |





# SANIERUNG VON HOCHWASSERGE SCHÄDIGTEN GEBÄUDEN

## Vergleich der bauteilbezogenen Sanierungskosten in Abhängigkeit der Bauweise

### Bachelorarbeit

*Dominik Eber*

**Hochwasser verursachen regelmäßig große Schäden an Gebäuden und deren Bauteilen. Diese Schäden müssen im Zuge einer Sanierung behoben werden, was hohe Kosten generiert. Durch einen Vergleich typischer Bauweisen und deren Konstruktionen sollte untersucht werden, ob bestimmte Bauteilenaufbauten wirtschaftlicher zu sanieren sind als andere.**

**Im Rahmen der Arbeit wurde ein umfangreicher Bauteilkatalog erstellt, in dem auch die typischen Anschlusssituationen an Nachbarbauteile und die integrierte Haustechnik erfasst wurde. Für ein vorab definiertes Hochwasserszenario wurden die Schäden und Sanierungsmaßnahmen bauteilspezifisch analysiert und die Sanierungskosten pro Quadratmeter kalkuliert. Die gewählte Systematik betrachtet den Rückbau inklusive Entsorgung der betroffenen Schichten bzw. deren Sanierung und Trocknung und ermöglicht einen guten Vergleich von Kosten- und Zeitaspekten. Auf Grundlage eines Mustergebäudes konnten die Sanierungskosten der verschiedenen Bauweisen direkt verglichen werden und eine Empfehlung für das Bauen von Gebäuden in hochwassergefährdeten Gebieten abgeleitet werden.**

**Keywords:** Hochwasser, Sanierung, Bauweisen, Sanierungskosten, Kostenkalkulation, Bauteilkatalog

### **Hochwasserschäden an Gebäuden**

Ein Drittel der volkswirtschaftlichen Schäden aus Naturkatastrophen in Deutschland ist auf Überschwemmungen zurückzuführen. (siehe Abbildung 1). Dabei steigt nicht nur die

Schadenshöhe seit Jahren, auch die Zahl der Hochwasserereignisse nimmt stetig zu. Um den Schaden durch Naturereignisse senken zu können, muss das Hochwasser als bedeutende Schadensursache betrachtet werden und den

Auswirkungen dieses Naturereignisses entgegengearbeitet werden.

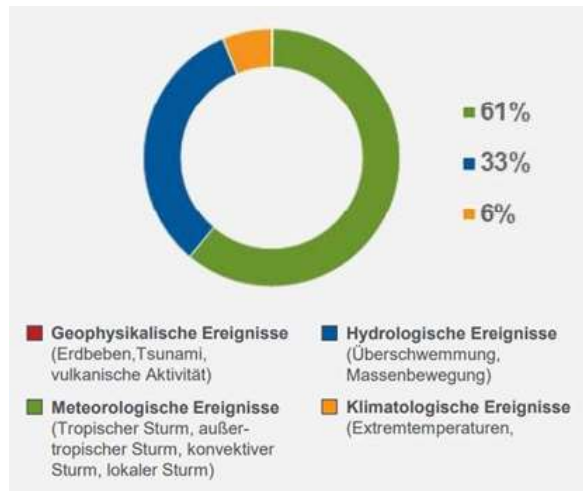


Abbildung 1: Gesamtschaden durch Naturereignisse in Deutschland 1980-2015 [1]

Wird ein Gebäude durch ein Hochwasser beschädigt, so muss es zwangsläufig saniert werden. Die Sanierung eines Gebäudes nach einem Hochwasser verursacht in der Regel hohe Kosten für die Eigentümer oder Bewohner des Gebäudes bzw. die Versicherer.

### Sind bestimmte Bauweisen günstiger zu sanieren als andere?

In der vorliegenden Arbeit werden hierfür bauübliche Standardkonstruktionen verglichen. So soll gezeigt werden, ob bei den vorherrschenden Bauweisen Unterschiede in den hochwasserbedingten Sanierungskosten existieren.

Die Untersuchungsergebnisse sind richtungsweisend für das Baugewerbe. Da Gebäude in gefährdeten Gebieten hochwasserangepasst gebaut werden sollten, bietet die vorliegende Arbeit für das Baugewerbe einer Grundlage zum Aufbau der erforderlichen Beratungskompetenz und zeigt wirtschaftliche Lösungen auf.

### Vorgehen der Untersuchung

Ziel der Untersuchung ist der Vergleich der Sanierungskosten von Bauteilen unterschiedlicher Bauweisen. Um die Vergleichbarkeit der Aussagen zu gewährleisten, wird folgende Systematik gewählt:

|  |
|--|
| <p><b>1. Definition des Hochwasserszenarios</b></p> <p>Im Hochwasserszenario werden, in Anlehnung an typische Hochwasserereignisse, Aspekte wie z.B. Einwirkdauer, Wasserhöhe und Kontamination definiert.</p>   |
| <p><b>2. Definition des Schadensakzeptors</b></p> <p>Auf Grundlage des Hochwasserszenarios kann festgelegt werden, welche Bauteile eines Gebäudes in welchem Umfang vom Hochwasser geschädigt werden. Die Spezifikationen (z.B. bauphysikalische Standards, haustechnische Ausstattung) der Gebäude werden festgelegt. Das Gebäude wird dadurch als Schadensakzeptor definiert.</p>  |
| <p><b>3. Festlegung der betrachteten Bauweisen</b></p> <p>Auf Grundlage statistischer Daten werden die zu betrachtenden Bauweisen festgelegt. Dadurch sind gleichzeitig Baustoffe und Bauteilaufbauten grob definiert. Ein Referenzgebäude wird gewählt.</p>   |
| <p><b>4. Festlegung der betrachteten Bauteile</b></p> <p>Auf Grundlage der für alle Bauteile einheitlich definierten technischen und bauphysikalischen Anforderungen können diese für jede Bauweise dimensioniert und detailliert beschrieben werden. Eine Liste von vergleichbaren Standardkonstruktionen der verschiedenen Bauweisen wird erstellt (Bauteilsystematik). In der Arbeit werden die Bauteile Außenwand, Kelleraußenwand, tragende / nichttragende Innenwand, Kellerboden und Kellerdecke mit allen üblichen Schichten betrachtet.</p> |
| <p><b>5. Analyse des Bauteilschadens</b></p> <p>Es wird beschrieben, wie sich Baustoffe, Schichtenfolgen oder ganze Bauteile im Falle der definierten Hochwassereinwirkung</p>   |

|   |
|---|
| verhalten und welche Schäden sich einstellen. |
|---|

## 6. Kostenkalkulation der Sanierung

|   |
|---|
| Die Kosten für die Sanierungsarbeiten werden über Kostenwerte des Baukosteninformationszentrums (BKI) ermittelt. Es ergeben sich sechs Kostenanteile, die in dieser Untersuchung betrachtet werden (siehe unten). |
|---|

### Analyse der Bauteile

Der Schichtaufbau des Bauteils beschreibt die Materialität und die Anordnung der Baustoffe. Anhand zuvor definierter Folgen von Überflutungen wird der Schaden an den Bauteilen beschrieben. Dabei wird geklärt, wie sich Baustoffe, Schichtenfolgen im Bauteil, oder ganze Bauteile im Falle einer Hochwassereinwirkung verhalten und mit welcher Beschädigung zu rechnen ist.

Für jedes Bauteil werden die Wasseraufnahme der Baustoffe, das Bauschuttgewicht von zu entfernenden Schichten und die verbleibende, zu trocknende Wassermenge im Bauteil bestimmt. Die Analyse der einzelnen Bauteile liefert so Daten und Kennwerte, die für die Kalkulation der Sanierungskosten benötigt werden.

Die bauteilspezifisch notwendigen Sanierungsmaßnahmen (z.B. Rückbau, Trocknung, Neuerstellung) sowie deren Dauer werden für jedes Bauteil in einem Bauteilkatalog beschrieben.

### Kalkulation der bauteilbezogenen Sanierungskosten

Die Kosten für die Sanierungsarbeiten werden über Kostenwerte des Baukosteninformationszentrums (BKI) ermittelt. Dadurch ist eine einheitliche Kalkulationsbasis gegeben.

Die Kostenanteile der Sanierungskosten sind so gewählt, dass keine der betrachteten Bauweisen

durch die Kostenrechnung benachteiligt oder bevorzugt wird.

Es ergeben sich sechs Kostenanteile, die in dieser Untersuchung verwendet werden. Dabei wird unterschieden in

- Kosten für Arbeit und Material
- Entsorgungskosten des anfallenden Bauschutts
- Kosten der Bautrocknung
- Kosten, die aufgrund von Gebäudetechnik in dem Bauteil oder durch die Bauteilanschlüsse zusätzlich entstehen
- Kosten, die durch Mietausfall oder Zusatzmiete für die Dauer der Sanierung entstehen.

Dabei werden die Kosten für Bauteilbereiche, die Gebäudetechnik oder Bauteilanschlüsse aufweisen anhand des Referenzgebäudes auf die Gesamtfläche des Bauteils gewichtet und anschließend in die Gesamtkosten miteinberechnet. So können diese Zusatzkosten korrekt in den Quadratmeterpreis des Bauteils einberechnet werden.

Der Kostenanteil für Mietausfall oder Zusatzmiete im Weiteren als „Mietminderung“ bezeichnet, berücksichtigt, dass manche Bauweisen einen zügigeren Baufortschritt bei Sanierung, Rückbau oder Wiedereinbau ermöglichen.

Anhand der Berechnung der einzelnen Kostenanteile werden für jedes Bauteil und der dazugehörigen Bauweise die Kosten pro Quadratmeter (€/m<sup>2</sup>) berechnet, diese können anschließend vergleichend betrachtet werden.

In der Arbeit erfolgt ergänzend eine kritische Auseinandersetzung mit den gewählten Eingangsgrößen, seien sie technischer Natur (z.B. Wasseraufnahmekoeffizienten), monetärer Natur (BKI Baukosten) oder hinsichtlich der angenommenen Sanierungsabläufe und Sanierungszeitfolgen. Alle Annahmen sind als

solche erkennbar und wurden auf Plausibilität geprüft. Der Einfluss auf die Ergebnisse der Arbeit, wie z.B. die Sanierungskosten, wird dort diskutiert, an dieser Stelle aber nicht vertieft dargestellt.

### Ergebnisse der Untersuchung

Mithilfe der beschriebenen Systematiken und anderen Methoden konnten für die betrachteten Bauteile die Sanierungskosten in Abhängigkeit der jeweiligen Bauweise ermittelt werden. Im Folgenden wird repräsentativ für die Ergebnisse der Untersuchung exemplarisch der Vergleich von zwei Außenwandkonstruktionen dargestellt. Interessant, aber hier nicht dargestellt, sind auch die Ergebnisse für verschiedene Bauweisen bei Kelleraußenwänden oder Estrichsystemen.

Abbildung 2 zeigt den Vergleich der günstigsten Konstruktion (Porenbeton) mit der kostenintensivsten Konstruktion (Holzrahmenbau). Dabei ist der Einfluss der Kostenanteile gut zu erkennen.

Die Wiederherstellung der Porenbetonwand dauert aber deutlich länger als die Sanierung der Holzrahmenkonstruktion (Abbildung 3). Die massive Wand nimmt bei einem Hochwasser eine erhebliche Wassermenge auf und muss über einen langen Zeitraum getrocknet werden. Außerdem erzeugen Nassbaustoffe (z.B. Putz) zusätzliche Verzögerungen im Sanierungsablauf.

Bei der Betrachtung aller Bauteile und Bauweisen kann allgemein die Aussage getroffen werden, dass massive Bauteile günstiger zu sanieren sind, die Sanierung aber auch mehr Zeit in Anspruch nimmt als bei Bauteilen in Rahmenbauweise.

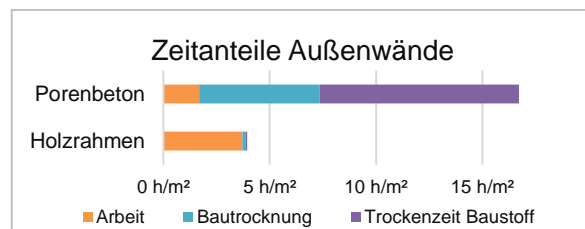


Abbildung 3: Darstellung der Zeitanteile bei Außenwände in Stunden Sanierungsdauer pro Quadratmeter Bauteil

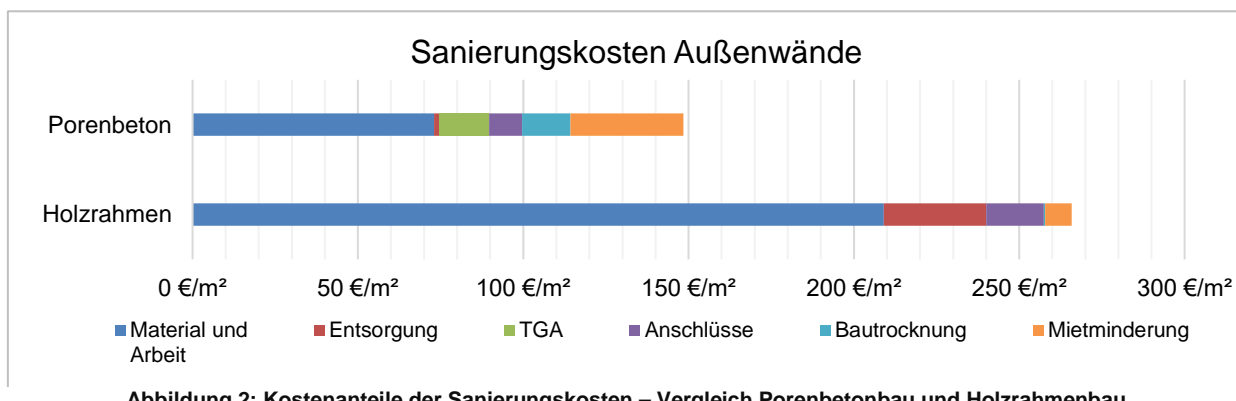


Abbildung 2: Kostenanteile der Sanierungskosten – Vergleich Porenbetonbau und Holzrahmenbau

Vor allem die Kostenunterschiede bei Arbeits- und Materialkosten sind bei den hier verglichenen Bauteilen deutlich ausgeprägt. Eine Außenwand in Holzrahmenbauweise benötigt viele Arbeitsschritte, viele Schichten müssen entfernt, entsorgt und neu eingebaut werden. Im Vergleich dazu ist die Porenbetonwand günstiger zu sanieren.

### Zusammenfassung

Die gewählte, klare Systematik ermöglicht eine nachvollziehbare Bewertung des Zeit- und Kostenaufwands für die Sanierung verschiedener Bauweisen und Bauteilaufbauten nach Hochwasserschäden. Dies kann als Grundlage für die gezielte Wahl einer Bauweise in hochwassergefährdeten Gebieten dienen.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Fachunternehmen des Baugewerbes Leistungen für hochwasserangepasstes Bauen problemlos anbieten können. Durch geeignete Systeme und eine passende Materialauswahl kann die Sanierung – je nach Prämisse – wirtschaftlicher oder schneller erfolgen, als bei

aufwändigen Sonderkonstruktionen. Das Baugewerbe kann auf Grundlage dieser Untersuchung Bauherren in hochwassergefährdeten Gebieten beraten und so dazu beitragen, deren Anforderungen sowie die der Versicherer zukünftig wirtschaftlich umzusetzen.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

1. [1]: Munich Re Group (Hrsg.) (2016). NatCatService. Schadenereignisse in Deutschland 1980-2015. Stand April 2016. München.  
<http://natcatservice.munichre.com>  
 Letzter Zugriff: 29.11.2017

### Für die Arbeit wichtige Quellen:

2. Statistische Kostenkennwerte. Baukosteninformationszentrum (BKI).
3. Hochwasserschutzfibel, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). 2017
4. Hochwasserangepasstes Planen und Bauen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).
5. Statistisches Bundesamt (Destatis).
6. Bewertung der Schadensanfälligkeit von Mauerwerkskonstruktionen gegenüber Hochwassereinwirkungen. Sebastian Golz.





## **Autor, Coautoren**

Dominik Eber

Kurzlebenslauf:

2000-2009      Gymnasium Leopoldinum Passau  
2010-2012      Ausbildung zum Schreiner, Tischlerei Schlanke in Ruderting  
2013-2018      Studium an der Hochschule Rosenheim  
                    Studiengang Innenausbau

## **Betreuer**

Die Arbeit wurde angefertigt an der Hochschule Rosenheim, Fakultät Holztechnik und Bau im Studiengang Innenausbau

Betreuer:        Prof. Dr.-Ing. Jochen Pfau  
                    Prof. Dipl.-Ing. Ulrich Grimminger  
                    Dipl.-Ing. Paul Geisenhofer (Leitung Wasserwirtschaftsamt Rosenheim)

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.**

# EVALUATION DER LINIENZAHLANALYSE BEI AUSGEWÄHLTEN ALPINEN FLÜSSEN IN SÜDDEUTSCHLAND

## Bachelorarbeit

*Justus Adrian Gruber*

Für die Untersuchung von Baugrund und Böden ist es eine Voraussetzung die Korngrößenverteilungen des zu untersuchenden Bodens zu kennen. Bei Baugrund in Flüssen ist die Kenntnisnahme der Korngrößenverteilung schwierig, da aufgrund des Wassers und Sedimenttransports erschwerte und wechselnde Bedingungen bestehen. Ein benutzerfreundliches Verfahren, welches lediglich für alpine Flüsse anwendbar ist, ist das Verfahren der Linienzahlanalyse. Die Linienzahlanalyse ist ein Verfahren, welches kostengünstig und schnell ohne viel Aufwand oder Gerät im Felde durchgeführt werden kann. Grundprinzip ist, dass 150 Steine mit einem Korndurchmesser von größer 1 cm gemessen und mit einer einfachen Umrechnung und der Ergänzung der Feinanteile die Korngrößenverteilungen der Ober- und Unterschicht eines Flusses bestimmt werden. Das Verfahren wurde in der Schweiz entwickelt und angewendet. In der Bachelorarbeit wurde dieses Verfahren aufgearbeitet und untersucht, ob es auch für die alpinen Flüsse in Süddeutschland Anwendung finden kann. Diese Arbeit vergleicht somit ein benutzerfreundliches und eher unbekanntes Verfahren mit der klassischen Siebung, was zur Vereinfachung der Bodenuntersuchung bei Flüssen führen kann.

**Keywords:** Linienzahlanalyse, Korngrößenverteilung, Fluss, Deckschicht (Oberschicht), Sohlschicht (Unterschicht)

## Vorwort

Am Anfang fast jeden Baubeginns steht die Untersuchung des Bodens. Bei den zu ermittelnden Kenngrößen steht im Zentrum meist die Korngrößenverteilung, welche Aufschluss über viele charakteristische Merkmale wie die

Tragfähigkeit oder Belastbarkeit des Bodens liefert. Die Korngrößenverteilung ist eine meist grafisch dargestellte Summenkurve, welche die Körner des Bodens oder Sediments größenverteilt angibt.

Zur Ermittlung der Korngrößenverteilung ist es gängige Praxis, dass am zu untersuchenden Baugrund eine Bodenprobe genommen wird und diese zur Untersuchung ins Labor gebracht wird. Im Labor wird das Bodenmaterial getrocknet, gewogen und anschließend gesiebt. Die Rückstände in den Sieben werden abermals gewogen. Das Gewicht der Siebrückstände dividiert durch das Gesamtgewicht der Probe liefert den prozentualen Anteil der jeweiligen Kornfraktion. Auf diese Art und Weise erhält man klassisch die Korngrößenverteilung. Dieses Verfahren ist auf der einen Seite zwar sehr zuverlässig, auf der anderen Seite mit relativ hohem Aufwand verbunden.

Bei alpinen Flüssen ist die korrekte Bestimmung der Korngrößenverteilung ebenso wichtig wie an allen anderen Baugründen. Allerdings existiert ein einfacheres Verfahren zur Bestimmung der Korngrößenverteilung für alpine Flüsse: die Linienzahlanalyse. Erstmals 1969 von dem Ingenieur T.C. Muir [4] vorgestellt, wurde sie 1987 in der Dissertation des Schweizer Ingenieurs René Fehr [2] aufgearbeitet und weiterentwickelt. Auf Fehrs Arbeit aufbauend, wurde dieses Verfahren nun auch für Flüsse in Süddeutschland angewandt und auf Vergleichbarkeit geprüft. Neben der Erläuterung der klassischen Bestimmung der Korngrößenverteilung wurde in dieser Bachelorarbeit die Linienzahlanalyse umfassend vorgestellt und an den Flüssen Isar, Loisach und Ammer an drei unterschiedlichen Messorten mit unterschiedlichen Höhenlagen mehrfach durchgeführt und mit der Korngrößenverteilung der Siebung verglichen.

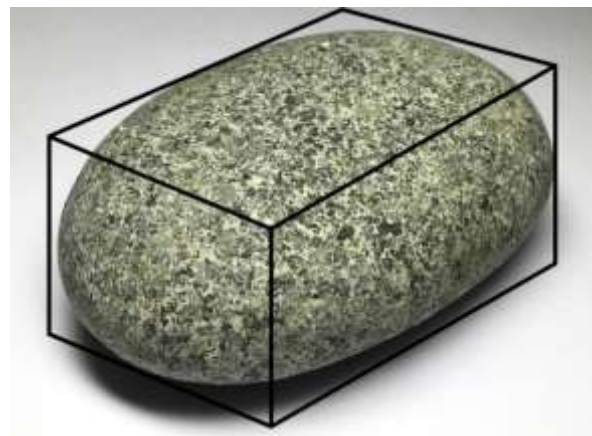
## Die Linienzahlanalyse

Ziel dieses Verfahrens ist es die Korngrößenverteilung der Ober- und Unterschicht bei alpinen Flüssen zu ermitteln. Grundprinzip dabei ist es, eine Schnur oder ein Maßband auf einem Kiesbett oder im knöcheltiefen Wasser in Fließrichtung zu spannen und 150 darunter liegende

Steine mit einem Korndurchmesser von größer 1 cm zu messen. Dabei werden nur Steine für die Messung ausgewählt, die die lotrecht auf die Oberfläche projizierte Schnur schneiden. Von den gemessenen Steinen sollten mindestens 30 in der mittleren Fraktion liegen. Es werden alle Durchmesser der Steine notiert und der Durchmesser des Größtkorns separat angegeben. Es sollte stets darauf geachtet werden, dass kein Stein doppelt gemessen wird.



**Abb. 3: Eine Schnur wird gespannt und die darunterliegenden Steine werden gemessen**  
Gemessen wird der mittlere Korndurchmesser eines Steins. In der Theorie wäre dies die mittellange Seite eines möglichst kleinen Prismas, welches den Stein umschließen würde.



**Abb. 4: Theoretisches, ideales und möglichst kleines Prisma.**

In der Praxis lässt sich die mittlere Achse mit etwas Gefühl und Übung rasch erkennen und es ist nicht notwendig eine umfassende Untersuchung für jeden Stein durchzuführen.

Alle gemessenen Korndurchmesser werden in Fraktionen eingeteilt. Die Grenzen der Fraktionen lassen sich durch folgende Zahlenreihe darstellen (dabei gilt es zu beachten, dass die Ergebnisse der Grenzen auf ganze Zahlen gerundet werden):

$$Gr(n) = \sqrt{2}^n \quad \text{mit} \quad n \in \mathbb{N} \quad (1)$$

Eine typisches Auswerteformular im Felde kann wie folgt aussehen:

Linienzahlanalyse

Gesamtanalyse 3 Datum 12.10.2012  
 Linienzahlanalyse No 3/3 Betrachter G.uber, Baruff

Standort 154r bei Lengwil, 47.657+4°N 11.5822°E

| Fraktion (cm) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | n   | Δ%   | Fraktion (cm) | ΣW    |
|---------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|------|---------------|-------|
| <1            |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0   | 0    | 0             | 0,00% |
| 1-2           |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 7   | 0,04 | 2,0           | 0,04% |
| 2-3           |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 15  | 0,10 | 3,0           | 0,10% |
| 3-4           |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 22  | 0,15 | 4,0           | 0,15% |
| 4-6           |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 47  | 0,31 | 6,0           | 0,31% |
| 6-8           |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 27  | 0,19 | 8,0           | 0,19% |
| 8-10          |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 15  | 0,1  | 10,0          | 0,10% |
| 10-12         |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 12  | 0,08 | 12,0          | 0,08% |
| 12-15         |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 3   | 0,02 | 15,0          | 0,02% |
| 15-20         |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1   | 0,00 | 20,0          | 0,00% |
| 20-25         |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0   | 0    |               |       |
| 25-30         |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0   | 0    |               |       |
| 30-35         |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0   | 0    |               |       |
| 35-40         |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0   | 0    |               |       |
| 40-50         |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0   | 0    |               |       |
| 50-60         |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0   | 0    |               |       |
| 60-80         |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0   | 0    |               |       |
| 80-100        |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0   | 0    |               |       |
| 100-120       |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0   | 0    |               |       |
| 120-150       |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0   | 0    |               |       |
| 150-200       |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0   | 0    |               |       |
| >200          |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0   | 0    |               |       |
| Σ             |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 150 | 1,0  |               |       |

$n_{sum} = \sum_{i=1}^k n_i$

Abb. 5: Auswerteformular einer Linienzahlanalyse

### Bestimmung der Oberschicht

Die einzelnen Einträge des Auswerteformulars wie in Abb. 3 dargestellt durch die Gesamtanzahl der Steine dividiert ergibt eine Korngrößenverteilung der Oberschicht. Hierbei werden allerdings alle Feinanteile vernachlässigt, da nur Steine mit den Durchmessern größer 1 cm in die Messung aufgenommen werden. Um die Korngrößenverteilung mit den Feinanteilen zu

ergänzen, werden für die Feinanteile eine Kornverteilung nach Fuller [3] angenommen:

$$p(d) = \sqrt{\frac{d}{d_{Max}}} \quad \text{mit} \quad d \in \mathbb{R}^+ \quad (2)$$

Die Verteilung nach Fuller wird bis zum ersten Wert der Linienzahlanalyse der Oberschicht hergenommen.

### Umrechnung von Ober- auf Unterschicht

Aufgrund sich verändernder Sohlverhältnisse hervorgerufen durch die Strömung des Wassers oder Sedimenttransports, ist die Bestimmung der Korngrößenverteilung der Unterschicht entscheidend, da hier von den eigentlichen charakteristischen Werten des Bodens gesprochen werden kann. Der Vorteil bei der Linienzahlanalyse ist, dass von der Oberschicht auf die Unterschicht rückgeschlossen werden kann und daher ein Freischaufeln der Unterschicht nicht nötig ist. Für die Umrechnung beschreibt Fehr folgenden Term [1]:

$$\delta p = \frac{\delta q_i \cdot d_{mi}^{0,8}}{\sum_{i=1}^k \delta q_i \cdot d_{mi}^{0,8}} \quad \text{mit} \quad n, i \in \mathbb{N}^+ \quad (3)$$

mit:

$\delta p$  – Gewichtung der Fraktion i / Gewicht der ganzen Probe (Volumengewichtsanalyse)

$\delta q_i$  – Anzahl der Steine der Fraktion i / Anzahl Steine der ganzen Probe (Linienzahlanalyse der Deckschicht)

$d_{mi}$  – mittlerer bzw. charakteristischer Korndurchmesser der Fraktion i

$k$  – Anzahl Fraktionen

0,8 – Exponent  $\alpha$  zur Umrechnung der Ober- zu der Unterschicht der Linienzahlanalyse

Weiterhin beschreibt Fehr, dass die feineren Anteile trotz Potenzgesetz unterschätzt werden und die Gleichung (3) daher einer Korrektur bedarf. Diese beschreibt Fehr durch die folgende Gleichung [1]:

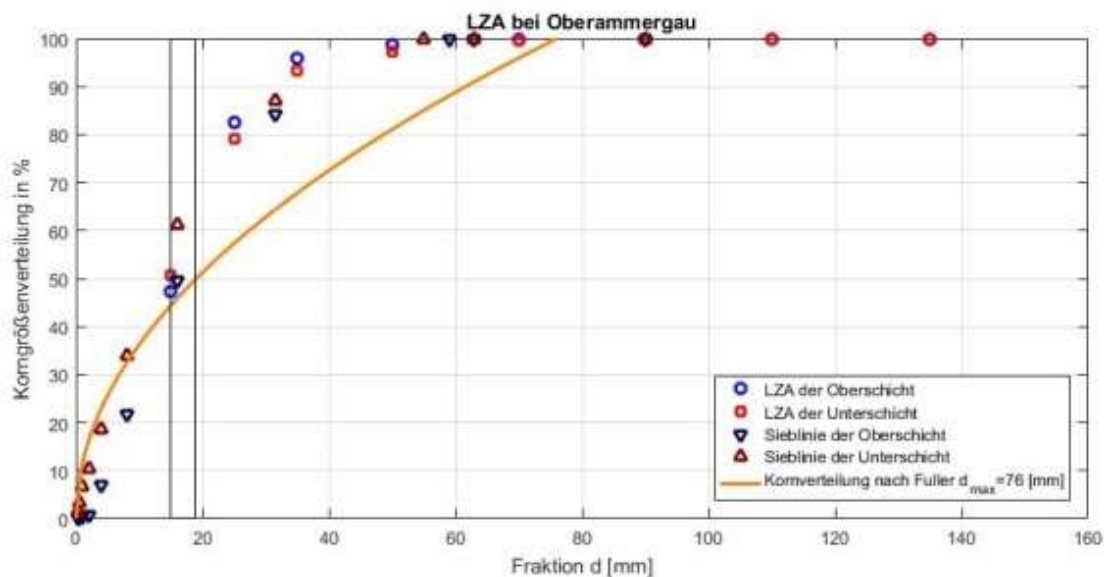


Abb. 6: Linienzahlanalysen und Sieblinie im Vergleich. Hier bei Oberammergau an der Ammer.

$$p_{ic} = 0,25 + 0,75 \cdot \sum_{i=1}^i \delta p_i \text{ mit } i \in \mathbb{N}^+ \quad (4)$$

mit:

$p_{ic}$  – korrigierte Summenhäufigkeit der Fraktion  $i$  (Unterschicht)

$\delta p$  – Gewichtung der Fraktion  $i$  / Gewicht der ganzen Probe

Dieser Verteilung fehlen nur noch die Feinanteile, also die Anteile, die kleiner als die kleinste Fraktion sind. Auch hier kann die Verteilung nach Fuller (2) angesetzt werden. Allerdings ist nun der Übergang von Fullerverteilung zur Linienzahlanalyse fließend und es muss daher ein Übergangsbereich definiert werden. Dieser Übergangsbereich wird an der Stelle angesetzt, wo bei linearer grafischer Darstellung der Abszisse der Tangenten der Fullerverteilung und der korrigierten Summenhäufigkeiten näherungsweise gleich sind.

## Ausführung und Auswertung

Um die Linienzahlanalyse mit der Sieblinie zu vergleichen, wurden an je drei Messstellen mit unterschiedlichen Höhenlagen an der Isar, der Loisach und der Ammer je drei Linienzahlanalysen durchgeführt und Bodenproben der Ober- und Unterschicht genommen.

Die drei Linienzahlanalysen an einer Messstelle wurden gemittelt, um somit insgesamt neun Auswertungen für die Bachelorarbeit zu erhalten.

In Abbildung 4 wird plakativ eine Auswertung dargestellt. Beim Vergleich mit der Fullerverteilung und der Sieblinie der Oberschicht ist eine leichte Überschätzung der feineren Anteile durch die Fullerverteilung sichtbar. Bei den Grobkomponenten (alle Komponenten, die durch die Linienzahlanalyse dargestellt werden) stimmen Linienzahlanalyse und Sieblinie weitestgehend überein. Bei der Unterschicht ist deutlich erkennbar, dass die Verteilung nach Fuller mit den Werten der Siebung sehr genau übereinstimmt. Die zwei schwarzen Balken symbolisieren den Übergangsbereich. Auch bei den Grobkomponenten sind weite Übereinstimmungen erkennbar.

## Beurteilung der Ergebnisse

Im Anschluss der Auswertung wurden die Ergebnisse beurteilt. Das heißt, es wurde geprüft, ob zwischen Linienzahlanalyse und Sieblinie vergleichbare Werte herauskamen. Die Ergebnisse in der Bachelorarbeit fielen unterschiedlich aus, allerdings zeichnete sich deutlich ab, dass die Vergleichbarkeit bei dem Unter-



schichtenvergleich oft sehr gut gegeben war. Bei der Oberschicht streuten die Ergebnisse sehr, doch war die Vergleichbarkeit bei hohen Höhenlagen gut gegeben.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Linienzahlanalyse zur Ermittlung der Korngrößenverteilung bei alpinen Flüssen auch in süddeutschen Flüssen gut anwendbar ist. Besonders bei der entscheidenderen Korngrößenverteilung der Unterschicht kamen auch bei relativ niedrigen Höhenlagen vergleichbare Ergebnisse heraus. Bei den Korngrößenverteilungen der Oberschicht kamen in der Summe sehr schlechte bis sehr gute

Übereinstimmungen zusammen, allerdings waren die Ergebnisse in hohen Höhenlagen stets vergleichbar.

Da die Baugrunduntersuchung in alpinen Flüssen mit deutlich mehr Aufwand verbunden ist als die Untersuchung eines Bodens im leicht begehbaren Gelände, vereinfacht die Linienzahlanalyse deutlich die Untersuchung des Baugrunds, da sie – wie diese Arbeit zeigt – auch im alpinen Bereich in Deutschland anwendbar ist. Die Kosten- und Zeitfrage ist stets von Interesse für Bauunternehmer und somit stellt die Linienzahlanalyse eine nutzerfreundliche Alternative für jeden Bodengutachter dar.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Fehr, R.: „Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse“. Schweizer Ingenieur und Architekt, Band (Jahr) 105 (1987), Heft 38.
- [2]: Fehr, R.: „Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen – Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren“. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr.92, 1987.
- [3]: Meyer-Peter, E., Müller, R.: „Eine Formel zur Berechnung des Geschiebebetriebs“. Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH Zürich, Nr.16, 1949.
- [4]: Muir, T.C.: „Sampling and Analysis of Coarse Riverbed Sediments“. Proceedings, Mississippi Water Resources Conference, Water Research Institute, Mississippi State University, State College, Miss., 1969.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Bollhöfer, M., Mehrmann, V.: „Numerische Mathematik – Eine projektorientierte Einführung für Ingenieure, Mathematiker und Naturwissenschaftler“, herausgegeben von Vieweg+Teubner Verlag 1. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, November 2004.
2. DIN 66165-1, *Partikelgrößenanalyse – Siebanalyse – Teil 1: Grundlagen*, Stand August 2016
3. Fehr, R.: „Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse“. Schweizer Ingenieur und Architekt, Band (Jahr) 105 (1987), Heft 38.
4. Fehr, R.: „Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen – Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren“. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr.92, 1987.
5. Meyer-Peter, E., Müller, R.: „Eine Formel zur Berechnung des Geschiebebetriebs“. Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH Zürich, Nr.16, 1949.
6. Muir, T.C.: „Sampling and Analysis of Coarse Riverbed Sediments“. Proceedings, Mississippi Water Resources Conference, Water Research Institute, Mississippi State University, State College, Miss., 1969.



### **Autor**

Justus Adrian Gruber wurde 1992 in Mainz geboren. Er absolvierte 2012 sein Abitur an der Integrierten Gesamtschule Mainz-Bretzenheim und bemühte sich zunächst um ein Studium des Toningenieurs und kurz darauf für Mathematik. Nach einigen Erfahrungen und Versuchen entschied er sich 2014 für die Offizierslaufbahn im deutschen Heer. Im Rahmen der Offiziersausbildung trat er 2015 das Studium für Bauingenieur und Umweltwissenschaft an und vertieft nun in Richtung Wasserbau.

### **Betreuer**

Betreuender Professor dieser Bachelorarbeit war Herr Prof. Dr.-Ing Andreas Malcherek vom Institut für Hydromechanik und Wasserbau der Universität der Bundeswehr München. Betreut wurde die Arbeit von Herrn Dr.-Ing Ivo Baselt, Laborleiter des Labors für Hydromechanik und Wasserbau der Universität der Bundeswehr München.

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.**

# SCHUBUNTERSUCHUNGEN AN PRÜFKÖRPERN AUS HOCHFESTEM MÖRTEL UND DER KONTAKTZONE ZU BASALTSTEIN

## Masterarbeit

*M.Eng. Simone Guist*

Eine Agglomeration von Mikrorissen im Beton kann nach fortschreitendem Festigkeitsverlust zu einer Zerstörung des Baustoffs führen. Es wird davon ausgegangen, dass sich unter Belastung entstehende Mikrorisse zunächst in der Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Zementstein ausbilden. Im Zuge dieser Arbeit wurden Prüfkörper auf unterschiedliche Weise mit einer Schubspannung beansprucht und die Auswirkung der Belastung auf die Mikrorissbildung in der Kontaktzone, welche im Betongefüge das schwächste Glied darstellt, untersucht. Hierfür wurden Prüfkörper in unterschiedlichen Prüfkörperformaten aus reinem Zementstein und aus einem Basaltstein mit anbetonierten Zementstein, welche die Kontaktzone nachbildeten, hergestellt. Die Prüfkörper wurden in einer von der Hochschule München entwickelten Prüfvorrichtung mit Schubspannungen belastet und anschließend auf Mikrorisse untersucht. Die Auswertung der Ergebnisse der Schubspannungen hat ergeben, dass nach monotoner Belastung die Kontaktzone im Beton im Vergleich zu reinem Zementstein nur einen Bruchteil der Schubspannungen aufnehmen kann. Ebenso ließ sich durch die Mikrorissanalyse nachweisen, dass die Mikrorisse, vor allem unter stärkerer Belastung, vermehrt in der Kontaktzone auftreten.

**Keywords:** Hochfester Beton, Kontaktzone, Schubspannungen, Mikrorissbildung

## Einleitung

Hochfester Beton ist ein heterogener Baustoff, der aus den drei Grundkomponenten, dem Gesteinskorn, der Bindemittelmatrix und der Kontaktzone besteht. Es wird davon ausgegangen, dass Mikrorisse zuerst in der Kontaktzone auftreten (1) und dass aus diesen Mikrorissen viele Makrorisse hervorgehen. (2)

Aus diesem Grund soll der Einfluss einer Schädigung auf die Entstehung und Ausbildung der Kontaktzonen-Mikrorisse gezielt untersucht werden. Es werden Prüfkörper einer detaillierten Mikrorissanalyse unterzogen, die mit Schubbelastungen monoton und zyklisch belastet und be- und entlastet wurden. Hierbei soll untersucht werden, wie unterschiedlich aufgebrachte Schubspannungen die Entstehung

und Ausbildung der Mikrorisse in der Kontaktzone von Hochfestem Beton beeinflussen.

## Hochfester Beton

Beton ist heutzutage einer der bedeutendsten Baustoffe. 50 % aller Bauwerke bestehen aus dem künstlich verkitteten Konglomerat aus Gesteinskörnung und Bindemittel. (3)

Charakteristisch für einen Hochfesten Beton ist seine hohe Druckfestigkeit, ein sehr geringer Wasserzementwert ( $< 0,4$ ) und die Verwendung von hochreaktiven Zusatzstoffen und Fließmitteln. Durch seine Eigenschaften wird nicht nur die Tragfähigkeit, sondern auch die Dauerhaftigkeit durch eine höhere Verschleißfestigkeit der Oberflächen von Hochfestem Beton und dem Schutz der Bewehrung vor Korrosion erhöht, wodurch er damals zum ersten Mal in sehr großen Mengen bei der Herstellung von Ölplattformen in Schweden zum Einsatz kam. Durch die höhere Undurchlässigkeit und die höhere Verschleißfestigkeit der Oberfläche im Vergleich zu üblichen Betonen werden häufig Brücken aus Hochfestem Beton hergestellt, um auf eine notwendige Abdichtung zum Schutz der Bewehrung verzichten zu können. Auch bei Kläranlagen und Abwasseranlagen kommt Hochfester Beton, durch den eine höherer Eindringwiderstand von chemischen Substanzen gewährleistet wird, zum Einsatz. Neben genannten Bauteilen wird Hochfester Beton vor allem im Fertigteilbau und im Hochbau beispielsweise zur Konstruktion von schlanken Stützen eingesetzt. (3)

## Kontaktzone

Die Kontaktzone bildet im Betongefüge das schwächste Glied und weist gerade im Vergleich zu ungestörtem Zementstein eine hohe Porosität auf. Die Kontaktzone, die auch als Interfacial Transition Zone bekannt ist, befindet sich

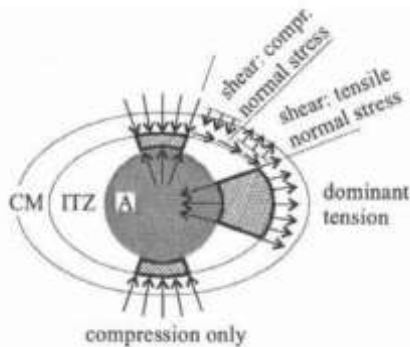
zwischen Zementstein und Gesteinskorn und spielt für den Zusammenhang des Gefüges die entscheidende Rolle. Die Eigenschaften der Kontaktzone sind vom Wasserzementwert, der Art des Bindemittels, der Leimmenge und der Art und den Eigenschaften der Gesteinskörnung abhängig. Bei Beton wird davon ausgegangen, dass der Zusammenhalt der Gesteinskörnung und des Zementsteins in der Kontaktzone durch mechanische Verbindungen, also eine Verzahnung der beiden Komponenten, gegeben ist. Diese Verzahnung beeinflusst also neben chemisch-physikalischen Eigenschaften in der Kontaktzone das Verbundverhalten. (4)

## Mikrorisse im Beton

Die Entstehung und das Verhalten von Rissen im Beton wird nach (1) zum einen von den Eigenschaften der Komponenten Gesteinskörnung und Zementstein, aber auch durch das Verbundverhalten in der Kontaktzone beeinflusst. Beton ist ein inhomogener Baustoff, dessen Einzelkomponenten unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, wodurch Gefügespannungen entstehen. Die Überschreitung der Zugfestigkeit in der Kontaktzone durch Gefügespannungen führt zu Mikrorissen, ohne dass eine äußere Einwirkung auf den Baustoff einwirkt. Diese Mikrorisse sind mit einer Spannungsumlagerung verbunden, durch die sich das nichtlineare Verformungsverhalten des Betons unter Laststeigerung bis zum Bruch nachvollziehen lässt. Sind eine niedrige Festigkeit und ein schlechter Verbund in der Kontaktzone vorhanden, ist dieses Verformungsverhalten sehr stark ausgeprägt. Folglich ist also das Verformungsverhalten umso geringer, je höher die Festigkeit und je besser der Verbund zwischen Gesteinskorn und Zementstein ist. (5)

Wie in Abbildung 1 dargestellt, ist bei der Betrachtung der Spannungsverteilung in der Kontaktzone zu beobachten, dass neben den auftretenden Zugspannungen hier auch

Schubspannungen auftreten. In Abbildung 1 ist mittig das Gesteinskorn („A“) abgebildet, das von der Kontaktzone („ITZ“) und Zementstein („CM“) umgeben ist. Die unter unterschiedlich aufgebrachter Druckbelastung in Form von monotonen, zyklischen und Be- und Entlastungen, auftretenden Schubspannungen werden im Zuge dieser Arbeit näher betrachtet.



**Abbildung 7, Spannungsverteilung unter Druckbeanspruchung in der Kontaktzone (ITZ) zwischen Gesteinskorn (A) und Zementstein (CM) (6) nach (5)**  
 Werden die Festigkeiten in der Kontaktzone durch die auftretenden Spannungen überschritten, entstehen nach (2) Mikrorisse, die sich dann zu Makrorissen ausbilden. Der unter Drucklast auftretende Bruchvorgang von Beton lässt sich demnach in mehrere Phasen einteilen. Zunächst werden durch die Stauchung die Poren im Gefüge zerdrückt und geschlossen. In einer weiteren Phase entstehen durch die Lastübertragung von Gesteinskorn zu Gesteinskorn Mikrorisse in der Kontaktzone und dem Zementstein. Bereits vorhandene Mikrorisse werden größer. Die in der Kontaktzone

Gefüge ein und es bilden sich Gefügerisse, die sich schließlich zu Makrorissen vereinigen. Es entstehen Bruchflächen, die eine Zerstörung des Betongefüges nach sich ziehen. (1) nach (2)

### Fragestellung und Vorgehensweise

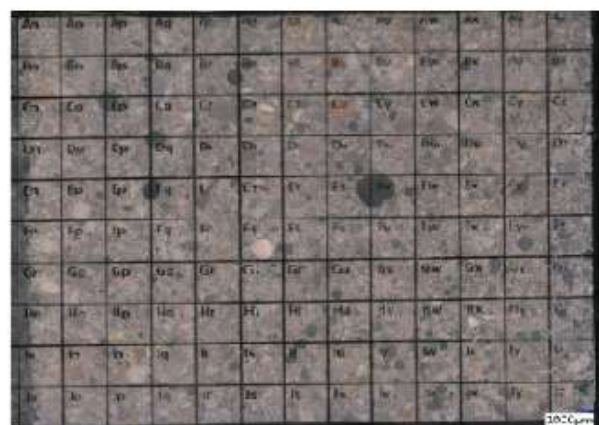
Es soll herausgefunden werden, wie sich die Schubbeanspruchung durch monotone und zyklische Belastung und durch Be- und Entlastung auf die Entwicklung von Mikrorissen in der Kontaktzone und der Bindemittelmatrix auswirkt, wozu zunächst unterschiedliche Prüfkörper hergestellt wurden.

Aus den Prüfkörpern aus reinem Zementstein sollen durch die Schubbeanspruchung Kennwerte des Zementsteins gewonnen werden. Mit den Prüfkörpern Kontaktzone aus Zementstein mit einbetoniertem Basaltstein, die die Kontaktzone im Beton nachbilden, können Schubspannungen in der Kontaktzone gemessen werden. Die Prüfkörper werden jeweils in prismatischer und in zylindrischer Form angefertigt. Die während der Schubbelastung auftretenden Auswirkungen auf die Mikrorissbildung werden mit einer Mikrorissanalyse ausgewertet.

Hierfür werden die geprüften Prüfkörper zersägt, zur Präparation an die Universität der Bundeswehr München übergeben und unter dem

↓ Druckkraft

|             |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Kontaktzone | An | Ao | Ap | Aq | Ar | As | At | Au | Av | Aw | Ax | Ay | Az |
|             | Bn | Bo | Bp | Bq | Br | Bs | Bt | Bu | Bv | Bw | Bx | By | Bz |
|             | Cn | Co | Cp | Cq | Cr | Cs | Ct | Cu | Cv | Cw | Cx | Cy | Cz |
|             | Dn | Do | Dp | Dq | Dr | Ds | Dt | Du | Dv | Dw | Dx | Dy | Dz |
|             | En | EO | Ep | Eq | Er | Es | Et | Eu | Ev | Ew | Ex | Ey | Ez |
|             | Fn | FO | Fp | Fq | Fr | Fs | Ft | Fu | Fv | Fw | Fx | Fy | Fz |
|             | Gn | Go | Gp | Gq | Gr | Gs | Gt | Gu | Gv | Gw | Gx | Gy | Gz |
|             | Hn | Ho | Hp | Hq | Hr | Hs | Ht | Hu | Hv | Hw | Hx | Hy | Hz |
|             | In | Io | Ip | Iq | Ir | Is | It | Iu | Iv | Iw | Ix | Iy | Iz |
|             | Jn | Jo | Jp | Jq | Jr | Js | Jt | Ju | Jv | Jw | Jx | Jy | Jz |



entstandenen Mikrorisse wandern in das weitere

Lichtmikroskop der Hochschule München (siehe



Abbildung 2 rechts) betrachtet. Anschließend werden die Ergebnisse der Mikrorissuntersuchungen analysiert und mit den Schubspannungen aus unterschiedlichen Beanspruchungen verglichen.

Abbildung 2 zeigt rechts eine Aufnahme eines präparierten Prüfkörpers unter dem Lichtmikroskop der Hochschule München und links die zugehörige Auswertung der Anzahl der Mikrorisse, die in unterschiedlichen Farben in einem definierten Raster dargestellt ist.

## Ergebnisdarstellung

Über das Ziel der Arbeit, die Untersuchung von Scherkräften und deren Auswirkung auf die Mikrorissbildung in der Zementsteinmatrix und in der Kontaktzone, können keine vollumfänglichen Ergebnisse dokumentiert werden, da die Mikrorissanalyse nur an einer beschränkten Auswahl an Prüfkörpern durchgeführt werden konnte.

Allerdings konnten Schubspannungen im Zementstein und der Kontaktzone dokumentiert und auf unterschiedliche Arten der Belastung bezogen und miteinander verglichen werden. Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst:

Bei monotoner Belastung bis zum Bruch sind alle Prüfkörper Prisma in gleichmäßigen Scherflächen gebrochen, was auf deren gute Einspannung in die Prüfvorrichtung zurückzuführen ist. Die Prüfkörper aus reinem Zementstein weisen nach monotoner Belastung bis zum Bruch sowohl in prismatischer, als auch in zylindrischer Form gut 80 % höhere Schubspannungen auf, als die Prüfkörper Kontaktzone, was die Aussage bestätigt, dass die Kontaktzone im Betongefüge das schwächste Glied darstellt. Zudem konnten die Prüfkörper in prismatischer Form mehr Schubspannungen aufnehmen, als die in

zylindrischer Form, wie aus Abbildung 3 hervorgeht.



**Abbildung 9, Vergleich der mittleren Schubspannung der Prismen und Zylinder Zement und der Prismen und Zylinder Kontaktzone**

Nach Be- und Entlastung bis zum Bruch konnte festgestellt werden, dass die Prüfkörper Zementstein nur noch 10 % der Schubspannungen aus monotoner Belastung aufweisen, was sich durch eine kontinuierliche vorangegangene Belastung und somit einer Schwächung des Zementgefüges erklären lassen könnte. Dahingegen wiesen die Prüfkörper Kontaktzone nach Be- und Entlastung bis zum Bruch höhere Schubspannungen auf, als nach monotoner Belastung. Hier wird davon ausgegangen, dass möglicherweise während den Be- und Entlastungen bereits Risse entstanden sind, die sich dann im Laufe der Belastungsschleifen gegenseitig behinderten und eine Rissverzahnung hervorgerufen wurde.

Bei der Mikrorissanalyse wurde deutlich, dass die stärker belasteten Prüfkörper mehr Mikrorisse aufwiesen, als die schwächer belasteten. Es zeichnete sich bei allen untersuchten Prüfkörpern ein ähnliches Rissbild ab. Die Risse verliefen alle in einem Bereich von bis zu 12  $\mu\text{m}$  entlang der Kontaktzone. Weiter konnte beobachtet werden, dass die Prüfkörper Kontaktzone bis zu 88 % mehr Mikrorisse aufwiesen, als die aus reinem Zementstein.

Die hier gewonnenen Ergebnisse können für weitere Arbeiten zur Weiterentwicklung der Versuchsmethode für diese interessante Fragestellung verwendet werden.

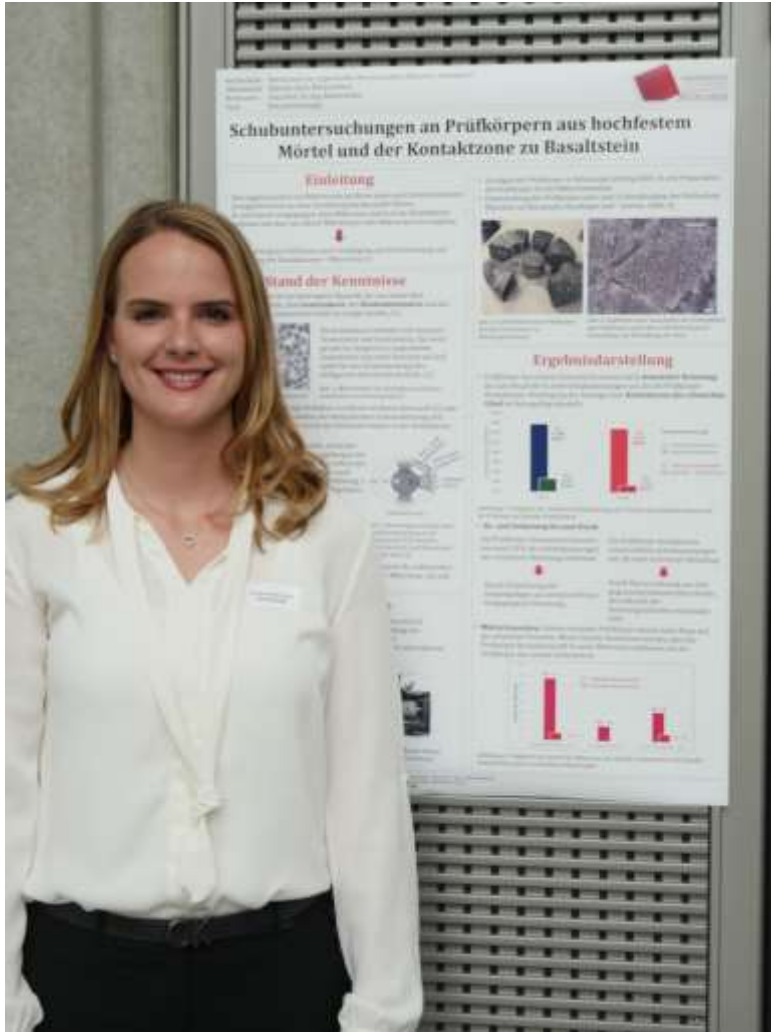
## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Schwabach, Enrico. Verformungs- und Degradationsverhalten von niederzyklisch uniaxial druckbeanspruchtem Beton. Weimar : IKI, 2005. ISBN 3860682687.
- [2]: Siebel, E. Verformungsverhalten, Energieaufnahme und Tragfähigkeit von Normal- und Leichtbeton im Kurzzeitdruckversuch. 1989. Bd. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 50.
- [3]: Richter, Thomas. Hochfester Beton - Hochleistungsbeton. s.l. : Verlag Bau und Technik, 1999. ISBN 3764003871.
- [4]: Verein Deutscher Zementwerke. Zement-Taschenbuch. s.l. : Verlag Bau und Technik, 2002. ISBN 3764004274.
- [5]: Zimmermann, Steffen. Nonlinear Homogenization of Concrete-Like Material Structures. Eindhoven : s.n., 2005.
- [6]: Meyer, Lars. Zum Einfluss der Kontaktzone bei der Modellierung des Elastizitätsmoduls von Beton. Nordhorn : s.n., 2007.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Schwabach, Enrico. Verformungs- und Degradationsverhalten von niederzyklisch uniaxial druckbeanspruchtem Beton. Weimar : IKI, 2005. ISBN 3860682687.
2. Siebel, E. Verformungsverhalten, Energieaufnahme und Tragfähigkeit von Normal- und Leichtbeton im Kurzzeitdruckversuch. 1989. Bd. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 50.
3. Richter, Thomas. Hochfester Beton - Hochleistungsbeton. s.l. : Verlag Bau und Technik, 1999. ISBN 3764003871.
4. Wilhelm, Tina. Ein experimentell begründetes mikromechanisches Modell zur Beschreibung von Bruchvorgängen in Beton bei äußerer Krafteinwirkung. Darmstadt : s.n., 2006.
5. Meyer, Lars. Zum Einfluss der Kontaktzone bei der Modellierung des Elastizitätsmoduls von Beton. Nordhorn : s.n., 2007.
6. Verein Deutscher Zementwerke. Zement-Taschenbuch. s.l. : Verlag Bau und Technik, 2002. ISBN 3764004274.
7. De Reese, Johanna. Wechselwirkung von Bionanokompositen und Fließmitteln mit zementären Systemen. München : s.n., 2015.



### **Autorin**

Frau Simone Guist geboren am 18.05.1992 in München

Seit 2017 Berufstätigkeit als Bauleiterin im Bereich Hochbau und Bauen im Bestand in München

2017 Master of Engineering im Bereich Allgemeiner Ingenieurbau (Hochschule München, Fakultät 02)

2016 Bachelor of Engineering im Bereich Bauingenieurwesen (Hochschule München, Fakultät 02)

2011 Allgemeine Hochschulreife

### **Betreuer**

Die Arbeit wurde angefertigt im Fach Betontechnologie der Hochschule für angewandte Wissenschaften München

Betreuer: Prpf. Dr.-Ing. Kustermann

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.**

# EXPERIMENTELLE VERSUCHSDURCHFÜHRUNG AN HOCHLEISTUNGSVERBINDUNGSDetails IM STAHLBETONFERTIGTEILBAU

## Masterarbeit

*Kai Hofmann M.Eng.*

Zur Verbindung von Fertigteilen aus Stahlbeton auf der Baustelle, wird meist auf eine Vergussfuge oder ein kostenintensives Einbauteil zurückgegriffen. Eine Alternative hierfür ist der Einsatz von Zahnleistenpaaren aus Stahl. Diese sind in den zu verbindenden Bauteilen eingebettet und werden über eine Vorspannung zusammengebracht. Die Schubkräfte längs zur Fuge werden über die Stahlverzahnung übertragen. In Abhängigkeit des resultierenden Winkels können große Kräfte übertragen werden. In Detail- und praxisnahen Großversuchen wurde die Kraftübertragung untersucht und Kriterien für einen wirtschaftlichen Einsatz ermittelt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass der optimale Winkel bei etwa  $45^\circ$  liegt und ein modularer Fachwerkträger aus einzelnen Fertigteilen oder eine angehängte Konsole über Zahnleistenpaare verbunden werden können.

**Keywords:** Fertigteilbau, modulares Bauen, Zahnleiste, Schubkraft, hochfester Beton, Versuche

## Aufgaben- und Zielstellung

In der Arbeit wurden Versuche durchgeführt, um die Kraftübertragung mittels Zahnleisten zwischen Fertigteilen aus Stahlbeton möglichst praxisnah zu untersuchen. In der vorausgegangenen Arbeit wurde als Grundlage die Verbindung theoretisch betrachtet, so dass bereits erste Rechenansätze zur Vordimensionierung der Bauteile vorliegen.

Das Zahnleistenpaar besteht aus zwei gegenläufigen Stahlelementen, die beidseitig mit

Zähnen versehen sind. Die 15,0 mm großen Zähne werden im Frischbeton eingebunden und dienen der Fixierung des Stahlelements. Die 2,5 mm kleinen Zähne stehen aus den Fertigteilen heraus und dienen im Endzustand der Kraftübertragung zwischen den Bauteilen längs zur Fuge zwischen den Zahnleisten.



Abb. 1: Zahnleistenpaar aus Stahl S235 JR

Die Verbindung ist nur kraftschlüssig, so dass nach der Nutzung des Bauwerks ein zerstörungsfreier Rückbau möglich ist. Allerdings wird eine Kraft senkrecht zur Fuge, beispielsweise aus einer Vorspannung, erforderlich, um die Elemente in der Lage zu sichern und ein abgleiten übereinander zu verhindern.

Die Versuche in den verschiedenen Maßstäben sollen die theoretischen Ergebnisse der vorausgegangenen Untersuchungen verifizieren und einen allgemeingültigen Ansatz zur Ermittlung der maximal übertragbaren Kraft liefern. Aus allen Versuchen wurde eine übertragbare Kraft  $q_{sz}$  in Abhängigkeit des einwirkenden Winkels je 1,0 cm Breite bezogen auf einen einzelnen Stahlzahn mit einer Höhe von 2,5 mm ermittelt.

Zudem wird die Praxistauglichkeit der Verbindung untersucht und mögliche Ansatzpunkte zur Optimierung der Verbindung erarbeitet.

## Detailversuche

Im ersten Schritt wurden Detailversuche an Betonprismen mit Zahnleistenpaaren durchgeführt, um die Kraftübertragung vom Beton in das Stahlelement und über die kleine Verzahnung zwischen den Elementen zu untersuchen.



Abb. 2: Zahnleistenpaar im Betonprisma eingebettet

Die Kraftübertragung zwischen dem Beton und den 15,0 mm hohen einbetonierten Stahlzähnen wurde bereits weitestgehend erforscht und ist nur für die Vollständigkeit des Versuchs dargestellt. Sie ist so ausgeführt, dass sie nicht bemessungsmaßgebend und daher nicht weitergehend erläutert wird. Das Hauptaugenmerk bei den Detailversuchen liegt auf der Verbindung zwischen den einzelnen Stahlhälften. Diese sind mit 2,5 mm hohen Zähnen versehen, die ineinandergreifen und über eine Vorspannung senkrecht zur Fuge in der Lage gesichert werden.

Um verschiedene Druckstrebenneigungswinkel  $\alpha$  im Bauteil zu simulieren, werden die Zahnleistenpaare in unterschiedlichen Winkeln in Betonprismen eingebracht und belastet. Hierbei wird erkennbar, dass bei steilen Winkeln  $\alpha$  von  $70^\circ$  die Stahlzähne unter Druck bei einer großen Verformung versagen. Die übertragbare Kraft  $q_{sz}$  liegt bei etwa 17,0 kN/cm je Stahlzahn, wobei der umgebende Beton das bemessungsmaßgebende Element wird.

Abb. 3: Verformte Stahlzähne unter  $\alpha = 70^\circ$

Wenn der Winkel der angreifenden Kraft flacher gewählt wird, werden die Zähne auf Biegung und Abscheren beansprucht. Die übertragbare Kraft  $q_{sz}$  bei einem Winkel  $\alpha$  von  $30^\circ$  reduziert sich dann auf etwa 6,0 kN/cm je Stahlzahn.



Abb. 4: Abgescherte Stahlzähne unter  $\alpha = 30^\circ$

Flachere Winkel sind im gewählten Versuchsaufbau kaum möglich, da die Vorspannung senkrecht zur Fuge, den minimal resultierenden Winkel vorgibt.

## Großversuche

Aufbauend auf die Detailversuche, wurden Großversuche im Maßstab 1:1 durchgeführt, um die Versuche möglichst nah an der realen Einbausituation zu simulieren.

Das Einsatzgebiet der Zahnleiste zur Kraftübertragung liegt im Bauwesen in der Fügung von Fertigteilen aus Stahlbeton. Der Vorteil liegt hierbei in der einfacheren Montage auf der Baustelle mit einer trockenen Fuge ohne Vergussmörtel.

In den vorliegenden Versuchen, wurde an den Zahnleisten ein gebogener Bewehrungsstahl angeschweißt, so dass die Lage im Beton gesichert ist. In den zu verbindenden Elementen wurden jeweils zwei zueinander parallel liegende Zahnleisten eingebracht. Die Lagesicherung stellt eine Vorspannung mit Gewindestangen senkrecht zur Fuge dar.

Für eine Anwendung im modernen Hallenbau wird eine angehängte Stahlbetonkonsole untersucht, die an einer Stütze angebracht wird. Der Schalungsaufwand der Stütze wird somit

erheblich reduziert. Im Versuch wird die Konsole senkrecht durch die Prüfmaschine belastet.



Abb. 5: Konsolversuche im Maßstab 1:1

Die zu untersuchende Verzahnung wird hierbei nur punktuell am Stahlelement ausgeführt, so dass das Versagen der einzelnen Stahlzähne in der Fuge untersucht werden kann.

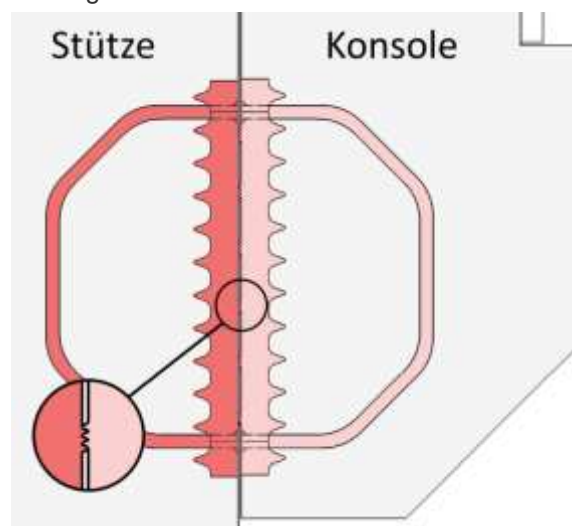


Abb. 6: Zahnleistenpaar im Probekörper (schematisch)

Durch die relativ weiche Verbindung über die Gewindestangen senkrecht zu den Zahnleisten sind große Verdrehungen und somit auch Verformungen der Konsole möglich. Nur durch



eine exakt definierte Vorspannung auf die Gewindestangen kann der Winkel der wirkenden Kraft im Bauteil definiert und für die Kraftübertragung optimiert werden. Bei einem resultierenden Winkel  $\alpha$  der Versuchskörper von  $20^\circ - 25^\circ$  liegt die übertragbare Kraft  $q_{sz}$  bei etwa  $4,0 \text{ kN/cm}$  je Stahlzahn.

Ein weiteres Anwendungsgebiet der Verbindung ist die Fügung von großen Fachwerkträgern aus Stahlbeton, die als gesamtes Fertigteil nicht mehr auf den Straßen transportiert werden können. Der Träger wird in einzelne Elemente aufgelöst und über die Zahnleistenpaare auf der Baustelle zusammengebaut.

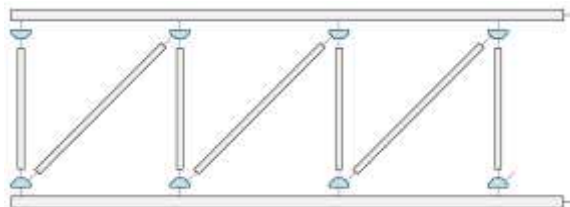


Abb. 7: Aufgelöster modularer Fachwerkträger

Die Diagonalen erfahren im gewählten Tragwerk Druck, so dass die vertikalen Pfosten vorgespannt werden müssen, um keine Zugkraft zu erfahren. Am Ober-/Untergurt des Trägers resultieren horizontale Kräfte, die über Zahnleistenpaare in den Knotenpunkten übertragen werden. Die Zahnleisten werden ebenfalls so ausgebildet, dass die Stahlverzahnung als erstes versagt.

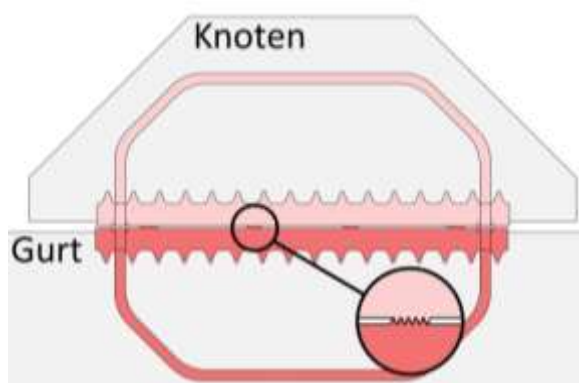


Abb. 8: Zahnleistenpaar im Probekörper (schematisch)

Im Versuch ist der Probekörper um  $45^\circ$  gedreht, um die Belastung aus der Prüfmaschine senkrecht aufbringen zu können. Bei einem

resultierendem Winkel  $\alpha$  von  $50^\circ$  kann eine Last  $q_{sz}$  von etwa  $10,0 \text{ kN/cm}$  je Stahlzahn übertragen werden.



Abb. 9: Fachwerkknott im Maßstab 1:1

## Zusammenfassung

Die Detailversuche zeigen gut den Einfluss des resultierenden Winkels im Bauteil. Je steiler der Winkel auf die Zähne ist, desto größer wird die übertragbare Kraft. Die Großversuche am Fachwerkknott und an der Konsole bestätigen diesen Zusammenhang. Zudem zeigen sie gut die Möglichkeiten und zugleich die Schwierigkeiten der Verbindung auf.

Aufgrund der unterschiedlichen Größenverhältnisse ist auf eine genaue Ausrichtung beim Einbau zu achten. Sofern der Kraftfluss auf das Verbindungselement abgestimmt ist und der resultierende Winkel  $\alpha$  im optimalen Bereich liegt, können sehr große Kräfte auf entsprechend kleinen Flächen übertragen werden.

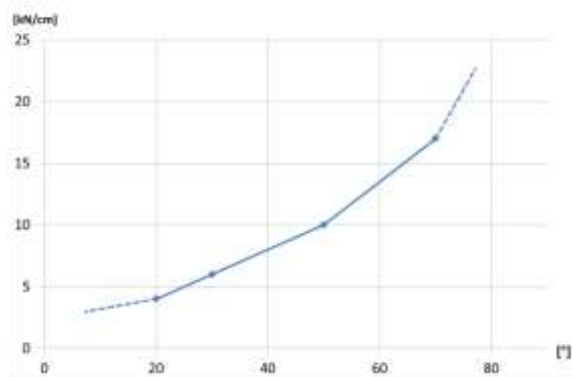


Abb. 10: Maximal übertragbare Kraft  $q_{s,z}$  in Abhängigkeit des Winkels  $\alpha$

Durch den einfachen Zusammenbau der Fertigteile auf der Baustelle sowie dem reduzierten Schalungsaufwand der Einzelteile bzw. den reduzierten Transportkosten bei einer Segmentierung von Bauteilen weist die Verbindung viele Vorteile beim Einsatz auf. Dazu kommen die geringen Herstellungskosten gegenüber bewährten Systemen durch die einfache Geometrie des Einbauteils und dem allgemeingültigen Ansatz zur Bemessung. Das besondere Potenzial liegt jedoch in der Übertragung extrem großer Kräfte, bei denen hochfeste und ultra-hochfeste Betone eingesetzt werden und herkömmliche Verbindungen im Fertigteilbau an ihre Grenzen stoßen.

## Literaturverzeichnis

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Forschungsbericht HS Coburg (noch nicht veröffentlicht), Entwicklung eines modularen Fachwerkträgers aus HPC-Fertigteilen und gezahnten Hochleistungs-Verbindungsdetails
2. Schmid, V.: Hochbelastete Verbindungen mit Zahnleisten in Hybridtragwerken aus Konstruktionsbeton und Stahl, Dissertation, Universität Stuttgart, 2000



## Autor

Herr Kai Hofmann, geboren am 25.03.1992 in Fürth  
 seit 04/2017 Tragwerksplaner im Ingenieurbüro IDK Kleinjohann GmbH & Co. KG Köln  
 02/2017 Master of Engineering an der Hochschule Koblenz  
 03/2015 Bachelor of Engineering an der Hochschule Coburg  
 05/2011 Allgemeine Hochschulreife

## Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Fachbereich Bauingenieurwesen der Hochschule Koblenz unter Betreuung durch Prof. Dr. Ing. R. Zeitler sowie seitens der Hochschule Coburg durch Prof. Dr. Ing. H. Falter und J. Schmidt M. Sc.

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.**

# ENTWICKLUNG EINER AUTOMATISIERTEN LEISTUNGS- BESCHREIBUNG DURCH DEN EINSATZ VON BUILDING INFORMATION MODELING

## Masterarbeit

*M.Eng. Natascha Krnic*

Die wegweisendste Entwicklung der Baubranche in Richtung Digitalisierung ist das Building Information Modeling (kurz »BIM«). Mit dieser Arbeit wurde die BIM-Methode einem Praxistest unterzogen und gezeigt, wie sie über den Systembruch zwischen Planung und Ausführung für eine kontinuierliche Kostenplanung und einen optimierten Ausschreibungsprozess Anwendung finden kann. Dazu wurde zunächst ein Modellierungskonzept entwickelt, das in interdisziplinärer Zusammenarbeit bei der Modellierung eines Doppelhauses in einem Zentralmodell mit der Modellierungssoftware Revit von Autodesk umgesetzt wurde. Um zu untersuchen, wie der Ausschreibungsprozess optimiert werden kann, wurden zusätzliche Informationen bzgl. der Kostengruppe nach DIN 276 sowie des Leistungsbereichs nach STLB in das Modell integriert und den einzelnen Bauteilen als Eigenschaft hinzugefügt. Anschließend wurden mit der 5D-Planungssoftware iTWO von RIB in einem mehrstufigen Prozess konventionelle LV-Stammdaten um modellbasierte Komponenten erweitert und die einzelnen Teilleistungen mit den CAD-Daten verknüpft. Auf Basis des Modells wurde ein bepreistes Leistungsverzeichnis generiert, das als Werkzeug für eine modellbasierte Kostenkontrolle geeignet ist und für den weiteren AVA-Prozess verwendet werden kann. Darüber hinaus konnte aufgezeigt werden, wie der Ausschreibungsprozess mit einfachen, technologisch bereits vorhandenen Mitteln durch die Erstellung von universell verwendbaren, modellbasierten Stammdaten weitestgehend automatisiert und optimiert werden kann.

**Keywords:** Digitalisierung, BIM, 5D, interdisziplinäre Zusammenarbeit, Kostenplanung, Ausschreibung, Prozessautomatisierung

### Motivation und Ziel

»BIM steht für die Idee der durchgängigen Nutzung digitaler Bauwerksmodelle für alle

Bereiche des Bauwesens – angefangen bei der Planung über die Ausführung und den Betrieb bis hin zum Abriss« [1]. Diese moderne, softwaregestützte Arbeitsweise hat das Potenzial die Durchführung von Bauprojekten zu revolutionieren. Zum einen soll BIM einen hochwertigen und transparenten Informations- und Datenaustausch gewährleisten und zum anderen eine Weiterverwendung einmal erfasster digitaler Informationen über die gesamte Wertschöpfungskette »Bau« ermöglichen. Prozesse können so verbessert und die Planungs-, Termin- und Kostensicherheit erhöht werden [2]. Allerdings nur unter der Voraussetzung, dass auch die Prozesse der Bauausführung sowie der Bewirtschaftung miteinbezogen werden.

Während sich eine Vielzahl von Veröffentlichungen auf die abstrakte Theorie beschränken und rein theoretische Ansätze für die Implementierung von BIM diskutieren, ist die im Folgenden vorgestellte Masterarbeit bewusst anwendungsorientiert ausgerichtet und beschäftigt sich mit der praktischen Umsetzung der BIM-Methode am Beispiel eines fiktiven Projektes. Gewählt wurde ein relativ schlichtes Doppelhaus, um die Komplexität der Thematik an ausgewählten Punkten zu durchleuchten und die einzelnen Arbeitsprozesse nachvollziehbar zu veranschaulichen. Ziel der Abschlussarbeit ist es, Möglichkeiten einer interdisziplinären BIM-basierten Zusammenarbeit zu untersuchen und als Ergebnis ein modellbasiertes LV zu generieren, das als Werkzeug für eine durchgängige Kostenkontrolle geeignet ist und für den weiteren AVA-Prozess verwendet werden kann. Darüber hinaus soll aufgezeigt werden, wie einzelne Planungsprozesse automatisiert werden können.

### **Das intelligente Gebäudedatenmodell**

Eine durchgängige, modellbasierte Arbeitsweise benötigt in erster Linie ein in sich konsistentes, intelligentes Gebäudedatenmodell als Informations- und Kommunikationsgrundlage für

alle weiteren Betrachtungen. Dazu wurde zunächst ein Modellierungskonzept entwickelt, das eine interdisziplinäre Zusammenarbeit unterstützt und die effiziente Weiterverwendung des Modells für mehrdimensionale Planungsprozesse (4D Termine/5D Kosten) vor allem in Hinblick auf eine modellbasierte Ausschreibung ermöglichen soll.

Für eine strukturierte Modellkonzeptionierung ist es notwendig, die Funktionsweise und das Klassifizierungsschema der einzelnen Elemente in Revit zu kennen. Die Integration der für die BIM-Methode essentiellen Informationen in das Modell erfolgt über die Eigenschaften der einzelnen Elemente, die mithilfe von bereits vorhandenen oder individuell erzeugbaren Parametern definiert und gesteuert werden können. Aufbauend auf dieser Element- und Informationsstruktur wurde für das Doppelhaus eine Bauteilbibliothek mit den im Modell vorkommenden Bauteiltypen konzipiert. Um zu untersuchen wie wenige, bereits im Modell enthaltene Informationen zu einer Prozessoptimierung bei der Erstellung eines modellbasierten LV's beitragen können, wurden die benutzerdefinierten Parameter »KG nach DIN 276« und »LB nach STLB« als Zusatzinformationen in die Bauteile integriert und mit den entsprechenden Werten belegt.

Des Weiteren wurden Regeln aufgestellt, die beim Modellieren prinzipiell einzuhalten sind [3]. Für eine durchgängige Modellbearbeitung ist es unter anderem unabdingbar, dass jedes Bauteil mit dem für seine jeweilige Bauteilkategorie vorgesehenem Modellierungswerkzeug erstellt wird: eine Stütze darf nicht als kurze Wand, sondern muss als Stütze modelliert sein. So ist gewährleistet, dass sie in einer Bauteilliste auch als solche aufgelistet wird, korrekt in einer Mengenermittlung erfasst wird oder beim Export in eine FEM-Software auch als Stab erkannt wird.

## Interdisziplinäre Zusammenarbeit am Zentralmodell

Um die Zusammenarbeit verschiedener Fachplaner an einem Modell zu untersuchen, wurde das Architekturmodell (nichttragende Bauteile des Roh- bzw. Ausbaus) und das Tragwerksmodell (tragende Bauteile sowie integriertes analytisches Modell) in einem Gesamtmodell erstellt. Hierzu wurde die Funktion *Collaboration for Revit* genutzt, die es ermöglicht die beiden Fachmodelle zeitgleich in einem Zentralmodell zu erzeugen. Damit ist das Gebäudedatenmodell immer auf dem aktuellsten Stand und steht jedem Bearbeiter jederzeit zur Verfügung.

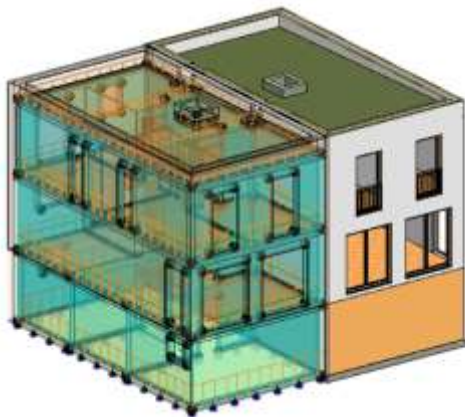


Abb. 1: Doppelhausmodell in Revit: rechts = geometrisches Modell, links = analytisches Modell

Das Arbeiten mit einem Zentralmodell erfordert allerdings eine kontinuierliche und teils aufwändige Kommunikation und Koordination, um unbeabsichtigte Änderungen oder andere Fehlerquellen und vor allem eine gegenseitige Behinderung während des Modellierungs- sowie Planungsprozesses zu vermeiden. Für einen reibungslosen Planungsablauf sollten bereits zu Projektbeginn Regelungen sowie allgemeine BIM-Ziele in einem BIM-Abwicklungsplan vertraglich festgehalten werden.

## Datenschnittstelle Revit – iTWO

Um die Bauteilinformationen für die weitere Projektbearbeitung nutzen zu können, müssen die CAD-Daten in iTWO lesbar, auswertbar und

qualitativ vollständig sein. Neben der Möglichkeit, das Modell über das offene Austauschformat IFC auszutauschen, stellt RIB ein 3D-CAD-iTWO-Plugin zur Verfügung, mit dem das Gebäudedatenmodell aus Revit qualitätsgesichert [4] in das iTWO-eigene CPI-Format exportiert wird.

## Das modellbasierte LV

Die Grundlage für eine modellbasierte LV-Erstellung, Kalkulation oder Bauablaufsimulation ist die modellbasierte Mengenermittlung. Diese erfolgt in iTWO in dem Modul *Ausstattung* in einem mehrstufigen, interaktiven Prozess. Dabei werden konventionelle Stammdaten um Komponenten erweitert, die gezielte Verknüpfungen zu den Modelldaten erzeugen: Mit der *QTO-Mengenabfrage* (QTO, engl.: Quantity Takeoff, dt. Aufmaß) wurden Formeln unter Verwendung von Abfrage-Parametern und weiteren Zusatzbedingungen definiert, die die geometrischen oder alphanummerischen Mengen für die jeweilige Teilleistung aus den Modelldaten ermittelt. Durch die Angabe einer Norm (z.B. »VOB\012«) wurde außerdem festgelegt, dass die Mengen entsprechend den Messregeln nach VOB berechnet werden sollen. Des Weiteren wurden neben 3D-Mengen auch freie Mengenansätze erstellt, um auch Leistungen zu berücksichtigen, die aufgrund eines unverhältnismäßig großen Modellierungsaufwandes nicht im Modell enthalten sind (z.B. Anputzschienen oder Leistungen für die Baustelleneinrichtung etc.). Um eine Verknüpfung der Teilleistungen und der QTO-Mengenabfragen mit den zugehörigen CAD-Objekten herzustellen, wurden mithilfe von Filterbedingungen *dynamische Auswahlgruppen* erstellt und den jeweiligen Teilleistungen zugewiesen. Durch die in Revit zusätzlich erstellten Parameter »KG nach DIN 276« und »LB nach STLB« konnte die Objektfilterung effektiv und zielgerichtet gestaltet werden.

Die anschließende Mengenberechnung lieferte exakte Mengen nach Norm und konnte an den



aufgelösten Mengenansätzen je Bauelement und Teilleistung interaktiv am visualisierten Modell einfach überprüft werden. Aus der Ausstattung heraus wurde anschließend ein LV erzeugt. Dabei wurden sämtliche generierte Daten je Teilleistung in der jeweils zugehörigen LV-

Position gebündelt. Damit ist ein modellbasiertes, bepreistes LV entstanden, das flexibel sowohl nach element- als auch nach ausführungsorientierten Kriterien und unterstützt durch eine interaktive visuelle Darstellung bearbeitet und ausgewertet werden kann.

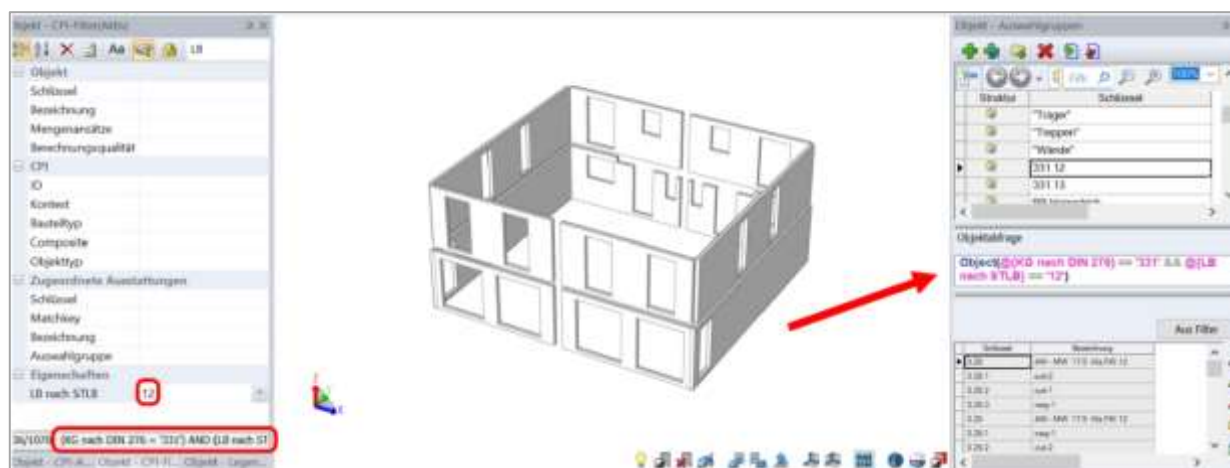


Abb. 2: Erstellung der dynamischen Auswahlgruppe »331.12« für tragende Mauerwerksaußenwände in iTWO

## Mehrwert der 5D-BIM-Arbeitsweise

Das intelligente Gebäudedatenmodell in Verbindung mit einem 5D-Planungstool erlaubt eine präzise Mengenermittlung nach Norm, was die Basis für eine zuverlässige Ausschreibung ist. Darüber hinaus kann der Ausschreibungsprozess mit universell verwendbaren, modellbasierten Stammdaten in Kombination mit einem darauf abgestimmten Modellierungskonzept weitestgehend automatisiert und optimiert werden. Aufgrund der kontinuierlichen Nutzung einmal erfasster Informationen und der Verknüpfung mit den Modelldaten wirkt sich jede Änderung, die im Laufe der Planung auftritt, direkt auf die Kostenplanung und die spätere Ausschreibung aus. In Verbindung mit der Möglichkeit, die kostenverursachenden Bauleistungen direkt am Modell visuell nachzuvollziehen, können nicht budgetierte Planungsänderungen reduziert und die Kosten- sowie Planungssicherheit insgesamt gesteigert werden.

## Fazit und Ausblick

Für die Umsetzung der BIM-Methode steht bereits eine Vielzahl an verschiedenen technologischen Werkzeugen zur Verfügung. Die Herausforderung ist also nicht das fehlende Angebot an funktionierender Software, sondern das unzureichende BIM Know-how bei allen Beteiligten – vom Planer über die Baustoffhersteller und Bauunternehmen bis hin zum Bauherrn und der öffentlichen Hand. Vor diesem Hintergrund muss ein bedarfsgerechtes Weiterbildungs- sowie Ausbildungsangebot geschaffen werden. Der Fokus sollte dabei nicht allein auf der Softwareschulung liegen, sondern die zusammenhängenden Prozesse in den Vordergrund stellen. Des Weiteren müssen allgemeingültige Standards eingeführt werden. Um beispielsweise einen qualitativ hochwertigen Informationsaustausch zwischen allen Fachdisziplinen während des Projektablaufes zu ermöglichen, sind effektive und qualitativ verlässliche Datenschnittstellen notwendig. In Deutschland empfiehlt sich für die praktische Umsetzung im AVA-Prozess die Verbindung des internationalen Standards IFC mit dem

nationalen Standard für Ausschreibungen GAEB [5]. Gerade auch vor dem Hintergrund der Prozessoptimierung in anderen Bereichen der Planung und Ausführung bietet das Vorhandensein von festgelegten, allgemein-gültigen Standards das Potenzial, den Planungsprozess zukünftig zeitgemäßer und effektiver zu gestalten. Nicht zuletzt müssen aber auch rechtliche Rahmenbedingungen für eine

erfolgreiche Zusammenarbeit mit BIM geschaffen werden.

BIM ist eine Chance für eine erfolgreiche Umsetzung der digitalen Revolution in der Bauindustrie, gleichzeitig aber auch eine Herausforderung, der sich alle am Bau Beteiligten ohne Vorurteile stellen müssen.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1] Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (2015). *Building Information Modeling*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. V
- [2] Egger, M., Hausknecht, K., Liebich, T., & Przybylo, J. (2013). *BIM-Leitfaden für Deutschland*. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) , Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (BBR), Forschungsprogramm ZukunftBAU des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), S. 25
- [3] Hausknecht, K., & Liebich, T. (2016). *BIM-Kompendium, Building Information Modeling als neue Planungsmethode*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 117 ff.
- [4] RIB online. (2017b). *3D-Modellintegration / 3D-CAD-Plugins*. zuletzt abgerufen am 11. Februar 2018 von [<https://www.rib-software.com/de/loesungen/architektur-und-bauplanung/itwo-fuer-bim-5d/3d-modellintegration-3d-cad-plugins.html>]
- [5] Egger, M., Hausknecht, K., Liebich, T., & Przybylo, J. (2013). *BIM-Leitfaden für Deutschland*. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) , Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (BBR), Forschungsprogramm ZukunftBAU des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), S. 85

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Autodesk Knowledge Network – Revit Hilfe online (2018). zuletzt abgerufen am 11. Februar 2018 von [<https://knowledge.autodesk.com/de/>]
2. buildingSMART. (2017a). *International Home of open BIM*. zuletzt abgerufen am 11. Februar 2018 von [<http://www.buildingsmart.org/>]
2. RIB iTWO - Benutzerhandbuch (2016). RIB Software AG.
4. Scherer, R., & Schapke, S.-E. (2014). *Informationssysteme im Bauwesen 1 – Modelle, Methoden und Prozesse*. Berlin: Springer Vieweg.



### **Autorin**

Natascha Kronic, geboren am 27.03.1987 in Friedrichshafen  
2017 Master of Engineering, Allgemeiner Ingenieurbau, Hochschule München  
2014 Bachelor of Engineering, Bauingenieurwesen, Hochschule München  
2007 Allgemeine Hochschulreife, Dante Gymnasium München

### **Betreuer**

Die Arbeit wurde angefertigt am Fachbereich Baubetriebsplanung und Projektentwicklung der Hochschule München bei Herrn Prof. Dipl.-Ing. Thomas Clausen.  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Jörg Jungwirth und Prof. Dipl.-Ing. Rasso Steinmann

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.**

# UNTERSUCHUNGEN ZUR VERFESTIGUNG VON SAND UND BINDUNG VON SCHWERMETALLEN IN SANDEN DURCH MIKROORGANISMEN

## Bachelorarbeit

Judith Lindermayer

Die bakteriell induzierte Ausfällung von Calciumcarbonat (MICP) ist eine neue Methode, die mit natürlichen Mitteln die Verfestigung von schwachen Böden, z.B. von Sand, bewirkt. Dabei werden die im Boden heimischen Bakterien *Sporosarcina pasteurii* zusammen mit einer Urea-CaCl<sub>2</sub>-Lösung in den Sand eingebracht. Durch einen biochemischen Prozess wird mit Hilfe der Bakterien Calciumcarbonat ausgefällt, welches die Sandkörner aneinanderbindet.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sollte die Anwendbarkeit des MICP-Verfahrens nachgewiesen werden. Um die Einflussmöglichkeiten auf die Biozementierung genauer kennenzulernen, wurden verschiedene Parameter, wie beispielsweise die Menge und Konzentration der Zementierungslösung, die Umgebungstemperatur sowie die Anzahl der Injektionszyklen der Bakterien, variiert. Hierbei erwies sich die mehrfache Bakterieninjektion sowie die Absenkung der Temperatur auf 10 °C als positiv für die Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchung.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde die Bindungsmöglichkeit von Kupfer-Ionen als Schwermetall im Sand untersucht. Dabei konnte ein sehr hohes Bindungsvermögen des Kalksandess sowohl mit als auch ohne Bakterienbehandlung verzeichnet werden.

**Keywords:** MICP, Biozementierung, mikrobielle Bodenverfestigung, mikrobielle Calcit-Ausfällung, Schwermetallbindung, Biosanierung, *Sporosarcina pasteurii*

## Einleitung

Das kontinuierliche Wachstum der Bevölkerung führt zu einem stetig ansteigenden Platzbedarf für Wohnraum, Arbeitsplätze sowie Lebensraum und Infrastruktur. Da jedoch ein guter Baugrund nicht überall zu finden ist, ist das Bauen auf schwachen Böden unerlässlich. Um auf solchen Böden ein Bauwerk erstellen zu können, werden Bodenverbesserungsmaßnahmen erforderlich.

Derzeit werden hierfür auf dem Markt hauptsächlich chemische Bindemittel wie Zement, Kalk-Zement-Gemische und Kalk eingesetzt. Hierbei sind teilweise starke Eingriffe in den Boden notwendig, wie z.B. das Einbringen von Ankern, Bohrpfählen oder Schlitzwänden. Die dabei eingesetzten chemischen Materialien sind jedoch zum Teil umweltschädlich. [01, 02, 03]

Zur Entwicklung einer natürlichen, umweltfreundlichen und praxistauglichen Methode der Bodenverfestigung wurde in den letzten Jahren die mikrobiell induzierte Calciumcarbonat-Ausfällung (MICP), auch Biozementierung genannt, erforscht.

Ein weiteres Problem sind Böden, die mit Schwermetallen oder anderen schädlichen Stoffen verunreinigt sind. In großen Mengen führen diese Schwermetalle zu Gesundheits- und Umweltproblemen. [04, 05] Problematisch werden die Kontaminationen unter anderem bei Eingriffen in die belasteten Böden, beispielsweise bei Baumaßnahmen. Bauunternehmen stellen bei einigen Bauvorhaben, die mehrstöckig in den Baugrund reichten, fest, dass die im Boden enthaltenen Schwermetalle während der Bauphase mobilisiert werden. Daher wird derzeit nach einer Möglichkeit gesucht, die Schwermetalle temporär oder auch dauerhaft binden zu können. Eine Option hierfür wäre die MICP-Methode. Denn neben vielen weiteren Anwendungsgebieten kann dieses Verfahren auch zur Bindung von Schwermetallen eingesetzt werden.

### Mikrobiell induzierte Calciumcarbonat-Ausfällung

Das MICP-Verfahren ist eine neue Methode, die auf der bakteriellen Ausfällung von Calciumcarbonat basiert. Mit dieser Technik ist es möglich, eine Bodenverfestigung auf einem natürlichen Weg zu erreichen. Hierbei werden die Bakterien *Sporosarcina pasteurii* zusammen mit einer Zementierungslösung, bestehend aus einer Urea- und  $\text{CaCl}_2$ -Lösung, in den Boden bzw. Sand eingebracht. Das in den Bakterien vorhandene Urease-Enzym wird für die biologische Hydrolyse von Urea in Ammonium und Carbonat genutzt (Abb.1 (A)). Für die anschließende Ausfällung von Calciumcarbonat werden die freien Calcium-Ionen aus der  $\text{CaCl}_2$ -Lösung benötigt (Abb.1 (B)). Das hierbei entstehende Calcit fällt an den Zellwänden der

Bakterien aus und bildet zwischen den einzelnen Sandkörnern brückenartige Verbindungen, wodurch der Sand verfestigt wird (Abb.1 (C)).

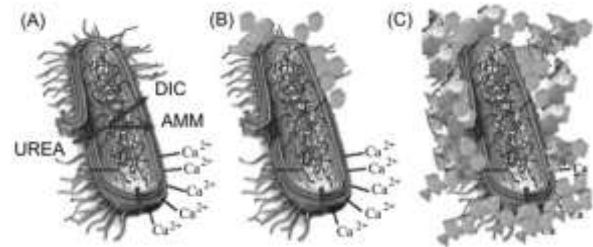


Abb. 1: Mechanismus der bakteriellen  $\text{CaCO}_3$ -Ausfällung [06]

Bei der Bindung von Schwermetallen durch MICP wird ebenfalls  $\text{CaCO}_3$  ausgefällt. Dieses besitzt ein großes Bindungsvermögen für Schwermetalle. Es adsorbiert das Schwermetall an seiner Oberfläche und gliedert die Schwermetall-Ionen in seine Kristallstruktur ein.

Das MICP-Verfahren ist neben der Verfestigung von Sand in vielen weiteren Anwendungsbereichen, wie beispielsweise zur Sanierung von Rissen in Beton, zur Entfernung von Calcium-Ionen aus industriellen Abwässern sowie zum Schutz und zur Restaurierung von Monumenten und Statuen aus Kalkstein, einsetzbar.

### Fragestellung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit war, die durch Bakterien induzierte Calciumcarbonat-Ausfällung (Biozementierung) zu untersuchen. Hierbei sollte die Anwendbarkeit dieser natürlichen Methode Sand zu verfestigen in orientierenden Versuchen nachgewiesen werden. Die bisher erforschten Grundlagen wurden in Versuchen im Labormaßstab überprüft.

Im ersten Schritt wurde ein eigener Standardversuchsaufbau entwickelt, der es ermöglichte die in der Literatur beschriebenen Effekte zu reproduzieren und weitergehende Aussagen zu treffen.

Die Versuche zur Biozementierung wurden in würfelförmigen Kunststoffdosen aus Polyethylen mit einem Fassungsvermögen von 100 ml durchgeführt. Der Dosenboden wurde im Voraus

mit zwei Löchern (Durchmesser 2,0 mm) versehen. Durch die Löcher konnte später die Zementierungslösung abfließen. Es wurden Filtergewebe aus sehr feinem Stoff in die Böden der Formen gelegt, damit keine Feinanteile des Sandes ausgespült werden konnten und um zusätzlich das Ausspülen der Bakterien zu reduzieren. Der Sand wurde zusammen mit den Bakterien und der Zementierungslösung in die Formen gefüllt. Nach der Zugabe der Bakteriensuspension wurde wiederum ein Filtertuch sowie ein Lochblech aus Edelstahl auf die Sandmischung gelegt. Dadurch sollte eine Aufwirbelung des Sandes während der Zugabe der Zementierungslösung vermieden und die Dichte des Sandes beibehalten werden. Die Zementierungslösung wurde in einem Becherglas unterhalb der Formen aufgefangen. Durch die Variation einiger Parameter, wie beispielsweise Menge und Konzentration sowie Zeitpunkt der Zugabe der Zementierungslösung, Umgebungstemperatur und Anzahl der Injektionszyklen der Bakterien sollte die Leistungsfähigkeit dieser Versuchsanordnung näher untersucht und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nachgewiesen werden. Darauf aufbauend wurden die Abhängigkeiten der Biozementierung von diesen Parametern analysiert.

Die Probekörper wurden anschließend einer Druckfestigkeitsprüfung sowie einer mikroskopischen Untersuchung (Auflichtmikroskop und Rasterelektronenmikroskop) unterzogen.

Ein weiteres Thema dieser Arbeit war die Bindung von Schwermetallen in Sanden. Hierbei sollte die Methode der natürlichen Bindung von Schwermetallen durch die MICP-Reaktion als Alternative zur bisherigen Praxis mit chemischen Stoffen getestet werden. Diese Methode könnte beispielsweise bei der zuvor beschriebenen Problematik der Immobilisierung von Schwermetallen bei Eingriffen im Baugrund angewendet werden.

Eine Versuchsreihe sollte Aufschluss über die Durchführbarkeit und die zu beachtenden Punkte

geben. Dabei wurde der Sand mit unterschiedlichen Konzentrationen an Kupfer-Ionen, in Anlehnung an derzeit geltende Grenzwerte, beaufschlagt. Der Versuchsaufbau der Biosanierung glich dem der Versuche zur Biozementierung. Nach Abschluss der Reaktionszeit wurden Eluate aus den Probekörpern gewonnen. Die Konzentration der nicht gebundenen Schwermetall-Ionen wurde mit Hilfe einer AES-ICP-Analyse ermittelt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollten als Grundlage für eine weitergehende Betrachtung des Phänomens der bakteriell induzierten  $\text{CaCO}_3$ -Ausfällung dienen.

## Ergebnisse

Die Variation verschiedener Parametern ermöglichte eine Anpassung der Versuchsreihen, um damit die Leistungsfähigkeit des MICP-Prozesses in den Versuchen steigern und die Druckfestigkeit der Probekörper erhöhen zu können.

Die Variation der Menge der Zementierungslösung zeigte, dass die Druckfestigkeiten bei einer Menge zwischen dem 0,5- und 1,0-fachen Porenvolumen des Sandes höher liegen als bei Werten unterhalb oder oberhalb dieser Mengen. Eine äquimolare Konzentration von Urea und Calciumchlorid als Bestandteile der Zementierungslösung erbrachte ebenfalls positive Ergebnisse, indem die Festigkeitswerte innerhalb der Versuchsgruppen einheitlicher ausfielen.

Ein weiterer Parameter, der untersucht wurde, war die Anzahl der Bakterieninjektionen. Es stellte sich heraus, dass mit einer mehrfachen Injektion (täglich über vier Tage hinweg) die Druckfestigkeit um ca. 64 % gegenüber einer einfachen Injektion gesteigert werden kann. Hier wurde eine durchschnittliche Festigkeit von 0,41 N/mm<sup>2</sup> erzielt.

Die Durchführung einer Versuchsgruppe bei einer Umgebungstemperatur von 10 °C sollte die natürliche Bodentemperatur simulieren, die in



der praktischen Anwendung im Boden vorherrschen kann [07]. Die Auswertung der Druckfestigkeitsuntersuchung zeigte, anders als in der Literatur angegeben, dass bei diesen Temperaturen durchaus auch höhere Werte mit bis zu  $0,72 \text{ N/mm}^2$  in der Festigkeit erreicht werden können als bei Temperaturen von ca.  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Die verzögerte Zugabe der Zementierungslösung, 48 Stunden nach der Einbringung der Bakterien, stellte sich ebenfalls als positiv für die Ausbildung der Festigkeit heraus. Der höchste Wert der Festigkeitsuntersuchung lag in dieser Versuchsgruppe bei  $0,68 \text{ N/mm}^2$ .

Die in den Versuchen erreichten Druckfestigkeiten sind vergleichbar mit den Festigkeitswerten aus der Literatur. In einzelnen Forschungsarbeiten finden sich jedoch Druckfestigkeiten von bis zu  $35 \text{ N/mm}^2$ . Zum Vergleich kann bei einer Bodenverfestigung von Sand mittels Zementinjektion eine Druckfestigkeit von bis zu  $10 \text{ N/mm}^2$  erreicht werden [08].

Der Erfolg der Biozementierung wurde durch mikroskopische Untersuchungen bestätigt. Die ausgefällten  $\text{CaCO}_3$ -Strukturen waren mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops klar ersichtlich (siehe Abb.2). Die zuvor beschriebenen brückenartigen Verbindungen zwischen den Sandkörnern konnten durch diese Aufnahmen nachgewiesen werden.

Neben der oben genannten bakteriellen Verfestigung von Sand wurde in einer weiteren Versuchsreihe die natürliche Bindung von Schwermetallen im Sand getestet. Die Auswertung der AES-ICP-Analyse zeigte ein großes Bindungsvermögen des mit Bakterien behandelten Sandes. Es stellte sich jedoch heraus, dass der Kalksand selbst bereits aufgrund seiner hohen Basizität eine sehr hohe Bindungskapazität aufweist. [10]

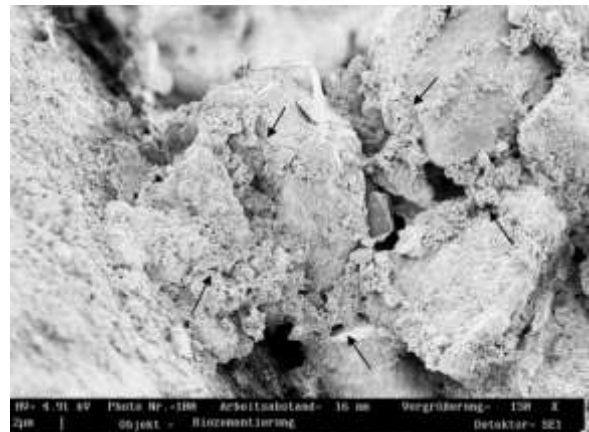


Abb. 2: Mehrere durch das ausgefällte  $\text{CaCO}_3$  miteinander verbundene und verfestigte Sandkörner, brückenartige Verbindungen in den Zwischenräumen der Sandkörner (150-fache Vergrößerung, am Rasterelektronenmikroskop)

Ein signifikanter Unterschied zwischen den Bindungsraten von Kupfer der Proben mit einer Bakterienbehandlung und der Proben ohne Bakterienbehandlung konnte daher nicht festgestellt werden. Es wurden durchschnittlich lediglich 2 % lösliche Kupfer-Ionen aus dem Sand als Eluate ausgewaschen, die restliche Menge des zu Beginn eingetragenen Kupfers wurde im Sand gebunden. Für eine genaue Aussage zum Wirkungsanteil der Bakterien sollten daher die Versuche mit verschiedenen Sandarten wiederholt werden.

## Fazit

Diese Arbeit zeigt, dass die bakterielle Calciumcarbonat-Ausfällung durch verschiedene Parameter beeinflusst und gesteuert werden kann. Sie stellt für die Zukunft eine gute Alternative zu den herkömmlichen chemischen Verfahren dar.

Die Untersuchungsergebnisse der durch die Biozementierung verfestigten Sandproben zeigten, dass die bakteriell induzierte Calciumcarbonat-Ausfällung durchaus für eine Bodenverfestigung geeignet ist.

Die Vorteile dieser Methode liegen in dem natürlichen Verfahren und in den um durchschnittlich 85 % geringeren Kosten im Vergleich zu herkömmlichen Methoden. Bei den herkömmlichen Verfahren liegen die Kosten der Rohmaterialien zwischen 2 bis  $72 \text{ } \$/\text{m}^3$  Boden,

wohingegen die Kosten der bakteriellen Bodenverfestigung lediglich 2 bis 9 \$/m<sup>3</sup> Boden betragen [09].

Jedoch sind für eine effektive Anwendung des MICP-Verfahrens in der Praxis noch weiterführende Versuche vorzunehmen. Dies ist wichtig, um Umweltproblemen vorzubeugen und eine Langzeitstabilität der Festigkeit garantieren zu können.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [01] van Paassen, Leon (2009): Biogrout – Ground Improvement by Microbially Induced Carbonate Precipitation, Delft (Dissertation, Technische Universiteit Delft).
- [02] Ng, Wei-Soon et al. (2012): An Overview of the Factors Affecting Microbial-Induced Calcite Precipitation and its Potential Application in Soil Improvement, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering Band 6 Nr. 2, S. 188-194.
- [03] Witt, Karl Josef (2009): Grundbau-Taschenbuch – Teil 2: Geotechnische Verfahren, 7. Auflage, Berlin (Ernst & Sohn).
- [04] Kang, Chang-Ho und So, Jae-Seong (2016): Heavy Metal and antibiotic resistance of ureolytic bacteria and their immobilization of heavy metals, Ecological Engineering Nr. 97, S. 304-312.
- [05] Diels, Ludo et al. (2010): Heavy Metal Immobilization In Groundwater By In Situ Bioprecipitation: Comments And Questions About Efficiency And Sustainability Of The Process, Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy Band 11 Artikel 7, S. 99-112.
- [06] Hammes, Frederik und Verstraete, Willy (2002): Key role of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation, Environmental Science and Biotechnology Band 1, Ausg. 1, S. 3-7.
- [07] Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung: Bodentemperatur – Jahresmittelwerte, [https://www.pik-potsdam.de/services/klima-wetter-potsdam/klimazeitreihen/bodentemperatur/index\\_html](https://www.pik-potsdam.de/services/klima-wetter-potsdam/klimazeitreihen/bodentemperatur/index_html), Aufruf am 03. April 2017.
- [08] Möller, Gerd (2013): Geotechnik – Grundbau, 2. vollst. überar. Auflage, Berlin, (Ernst & Sohn).
- [09] Ivanov, Volodymyr und Chu, Jian (2008): Application of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology Band 7, Auflage 2, S. 139-153.
- [10] Hahn, M. et al (2000): Literaturstudie zum Thema: Darstellung und Bewertung des Wissensstandes zum Schadstoffabbau und -transport in natürlichen Böden, Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft und Umwelt Heft 4.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Al-Tawadi, Salwa (2008): High Strength In-Situ Biocementation of Soil by Calcite Precipitating Locally Isolated Ureolytic Bacteria, Perth (Dissertation, Murdoch University).
2. Whiffin, Victoria (2004): Microbial CaCO<sub>3</sub> Precipitation for the production of Biocement, Perth (Dissertation, Murdoch University).
3. van Paassen, Leon (2009): Biogrout – Ground Improvement by Microbially Induced Carbonate Precipitation, Delft (Dissertation, Technische Universiteit Delft).



### **Autorin**

Judith Lindermayer, geboren am 04.09.1993 in Starnberg, studierte *Bauingenieurwesen* an der Hochschule München und erhielt 2017 ihren Abschluss zum Bachelor of Engineering. Derzeit absolviert sie ihr Masterstudium *Allgemeiner Ingenieurbau* mit Schwerpunkt *Stahlbau und Gestaltungstechnik* an der Hochschule München.

### **Betreuer**

Diese Arbeit wurde an der Hochschule München, Fachbereich 02 Bauingenieurwesen angefertigt und von Frau Prof. Dr.-Ing. Andrea Kustermann betreut.

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.**

# EINFLUSS DER CALCINIERUNGSTEMPERATUR AUF PHYSIKALISCH-HYGROSKOPISCHE EIGENSCHAFTEN CALCINIERTER TONE AM BEISPIEL MUSKOVIT

## Bachelorarbeit

*Axel Neißer-Deiters*

Calcinierte Tone haben das Potenzial als zukünftiger Zementersatzstoff die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Zement zu optimieren und den rückläufigen Trend von beispielsweise Hüttensand und Flugasche zu kompensieren. Calcinierte Tone wirken puzzolan, weisen gegenüber etablierten Zementersatzstoffen jedoch deutlich veränderte physikalische Eigenschaften auf, die erhebliche Auswirkungen auf den Beton haben können. Als besonders kritisch werden bislang Roh-Tone aus der Glimmergruppe für den Einsatz im Beton, bspw. als Nebenbestandteil der Gesteinskörnung betrachtet. An einem hochreinen Ton (Mineralname: Muskovit) wurden, im Roh- sowie im calcinierten Zustand, physikalisch-hygroskopische Eigenschaften mit Hilfe von verschiedenen mineralogischen und physikalischen Untersuchungsmethoden charakterisiert. Es zeigt sich, dass mit höherer Calciniertemperatur die spezifische Partikeloberfläche sinkt und wider Erwarten die Wasseraufnahmefähigkeit steigt. Die Erkenntnisse resultieren in neuen Fragestellungen, inwiefern man diese Eigenschaften für die innere Nachbehandlung von Beton nutzen kann und wie die Dauerhaftigkeit von Betonen bei Verwendung von calcinierten Tonen als Zementersatzstoff vor allem hinsichtlich Frost-Widerstand beeinflusst wird. Die Arbeit legt somit einen Grundstein zur Beurteilung der Eignung calcinierter Tone, die als ökologisch und ökonomisch attraktiver Baustoff für die Bauindustrie von außerordentlichem Interesse sind.

**Keywords:** Beton, Calcinierte Tone, Zementersatzstoffe, Glimmer, Muskovit, Wasseraufnahmefähigkeit, BET Oberfläche, innere Nachbehandlung

### Forschungsmotivation

Die Zementindustrie ist weltweit verantwortlich für 5 % der anthropogenen, durch den Menschen verursachten, CO<sub>2</sub> Belastung und ist somit ein erheblicher Faktor im Klimawandel [1]. Die Zementwerke in Deutschland sind heutzutage bereits energetisch optimiert, daher steckt das größte Einsparpotenzial im Ersatz von Zementklinker durch Zementersatzstoffe. Durch die Reduktion der Stahlproduktion und die Schließung von Steinkohlekraftwerken wird in Deutschland jedoch ein **Rückgang** der etablierten Zementersatzstoffe **Hüttensand** und **Flugasche** prognostiziert [2]. Daher wird es zukünftig notwendig sein, alternative Ersatzstoffe wie calcinierte Tone, vermehrt einzusetzen.

Besonders Tongemische bieten sich hier aus ökonomischer Sicht und aufgrund ihrer weltweiten, lokalen Verfügbarkeit als Roh-Material zur Calciniierung an.

(Calcinierte) Tone, insbesondere Glimmer, haben im Vergleich zu Zement eine hohe Wasseraufnahmefähigkeit. Die Wasseraufnahmefähigkeit der Ausgangsstoffe hat einen wesentlichen Einfluss auf den **gesamten Wasserbedarf** sowie auf die Eigenschaften von Frisch- und Festbeton. Je höher der Wasseranspruch der einzelnen Bestandteile ist, desto schlechter wird die **Verarbeitbarkeit**. Die Wassersättigung des Betons ist desweiteren ein elementarer Einflussfaktor hinsichtlich der **Frostbeanspruchung**. Durch den hohen Wasseranspruch weisen calcinierte Tone bei

diesen Eigenschaften entweder ein negatives oder ein noch nicht geklärtes, aber kritisch anzusehendes Verhalten auf. Im Beton sind uncalcinierte Glimmer als Nebenbestandteil der Gesteinskörnung aufgrund ihrer negativen Auswirkungen auf die Frost-Tausalz-Widerstandsfähigkeit von Betonen normativ limitiert. Die erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit wird in direkten Zusammenhang zur Frostempfindlichkeit gebracht.

Die Bachelorarbeit beleuchtet den Einfluss verschiedener Calciniertemperaturen auf die physikalischen und insbesondere hygroskopischen Eigenschaften calcinierter Tone am Beispiel des Muskovit.

### Wirkungsweise calcinierter Tone

Unter Calciniertung wird die Wärmebehandlung von Materialien bei Temperaturen von 400 °C bis zu ihrer Sinterungstemperatur verstanden. Durch die Calciniertung werden OH Gruppen aus der Kristallstruktur der Tone abgespalten und die **puzzolane Reaktivität** der Tone aktiviert [3–6]. Die Anzahl der **abgespaltenen OH Gruppen**, die Mindesttemperatur und die Geschwindigkeit der sogenannten **Dehydroxylierung** hängen von mehreren Faktoren, wie der Calciniertemperatur und der Art des Tones ab.

Calcinierte Tone nehmen großen Einfluss auf die **Frischbetoneigenschaften**. Tone haben im Vergleich zu Zement einen wesentlich höheren Wasseranspruch. Dadurch wird die **Verarbeitbarkeit** bei einer Substitution von Zement durch calcinierte Tone wesentlich verschlechtert [7–9]. Beim Verwenden von bestimmten Tönen wurde eine bessere Verarbeitbarkeit von calcinierten Tönen gegenüber dem Einsatz im uncalcinierten Zustand festgestellt [10]. Aufgrund des hohen Wasseranspruchs kann das **Bluten** und das **Schwindmaß** von Beton in den ersten zehn Stunden verringert werden [7; 8].

Die **Festbetoneigenschaften** werden durch calcinierte Tone – insbesondere durch ihre puzzolane Wirkungsweise sowie eine optimierte Packungsdichte – beeinflusst. Klassischerweise wird unter der **puzzolanen Reaktion** für Zementersatzstoffe wie Flugasche und Silicastaub die Bildung von festigkeitsbildenden Calciumsilikathydrat-Phasen (CSH) verstanden [11]. Diese entstehen aus dem Calciumhydroxid der Zementhydratation und aus reaktivem Silicium [12; 13]. Calcinierte Tone stellen neben Silicium auch Aluminium für die Hydratationsreaktion zur Verfügung [14]. Dabei wird das Aluminium in die CSH-Phasen

eingebaut und es kommt zur Bildung von Calciumsilikataluminathydrat-Phasen (CASH). Bei aluminiumreichen Tönen entstehen zusätzlich Aluminatferrit-Monophasen (AFm) [15]. Die **Packungsdichte** wird physikalisch und chemisch durch calcinierte Tone optimiert. Calcinierte Tone erhöhen neben Zement den Mehlkornanteil im Beton. Sie füllen die Lücken zwischen größeren Partikeln aus und erhöhen die Packungsdichte in der Betonmatrix. Calcinierte Tone sind teilweise deutlich feiner als Zement. Dadurch können sie in kleinere Lücken, die für die Zementklinkerpartikel zu groß sind, als Füller fungieren und durch das Ausbilden voluminöser AFm-Phasen vorhandene Hohlräume weiter minimieren und somit die Gefügedichtheit und Endfestigkeit erhöhen. [7; 12; 14]

### Material und Untersuchungsmethoden

Der Muskovit gehört mineralogisch der **Glimmer-Gruppe** an. Er besteht aus dreier Schichtpaketen und einer Zwischenschicht, wodurch er sich als ein sogenanntes **Dreischichtsilikat** kategorisieren lässt [16]. In der Arbeit wurde ein hochreiner pulverförmiger Muskovit verwendet. Dieser wurde mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops (REM) in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.



Abbildung 10: Muskovit im Rohzustand unter dem REM bei 10.000-facher Vergrößerung

Der Muskovit wurde im Rohzustand und bei unterschiedlichen Calciniertemperaturen (500, 650, 800, 950 °C) untersucht. Im weiteren Text wird die Nomenklatur Muskovit\_Calciniertemperatur bzw. in Grafiken M\_Calciniertemperatur verwendet.

Zur Festlegung der Calciniertemperatur wurde zunächst die Thermogravimetrie herangezogen, die die Dehydroxylierung in Abhängigkeit der Temperatur aufzeichnet. Es wurden die in Tabelle 1 dargestellten physikalisch-hygroskopischen Eigenschaften

untersucht. Die spezifische Oberfläche nach BET wird im Folgenden als BET Oberfläche bezeichnet.

Tabelle 1: Verfahren für physikalische und hygroskopische Parameteruntersuchungen

| Parameter                           | Verfahren                       |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| Wasseraufnahmefähigkeit             | Enslin-Neff [17]<br>Puntke [18] |
| Spezifische Oberfläche              | BET [19]<br>Blaine [20]         |
| Reindichte                          | Heliumpyknometer [21]           |
| Kristallographische Gitterparameter | Röntgendiffraktometrie          |
| Partikeloberfläche                  | REM                             |

### Ergebnisse und Ausblick

Die Ergebnisse der Bachelorarbeit liefern einen ersten Beitrag zur Bewertung natürlich anstehender Tone und ihre Eignung als Zementersatzstoff nach entsprechender Calciniierung. Die Bewertung und Kategorisierung von Tonen wird zukünftig eine große Herausforderung für die Bauindustrie darstellen und erfordert auch zukünftig noch weitere Grundlagenforschungen an anderen Tonen sowie Tongemischen, wie am Beispiel Muskovit.

Zu diesen Grundlagen zählen unter anderem **mineralogische** Forschungsergebnisse bezüglich der Reindichte und kristallographischer Gitterparameter.

Für das untersuchte Dreischichtsilikat Muskovit nimmt die **Reindichte** bis zum Ende der Dehydroxilierung deutlich ab und verändert sich danach nur noch geringfügig. Während der Dehydroxilierung konnte eine **Veränderung** der **Kristallstruktur** des Muskovits nachgewiesen werden. In Summe haben sich die **Gitterparameter** über den Calciniierungsprozess konstant **erhöht**, welches eine Volumenzunahme des Muskovits zur Folge hat.

Die Ergebnisse zu den **hygroskopischen** Eigenschaften stellen den bisher angenommenen Korrelationsgrundsatz bezüglich **Calciniierungstemperatur – BET Oberfläche – Wasseraufnahmefähigkeit** in Frage. Es ist allgemein bekannt, dass zum einem mit dem Calciniierungsprozess und insbesondere mit Einsetzen von Sintereffekten die **BET Oberfläche reduziert** wird [9; 14]. Zum anderen erwartet man mit sinkender BET Oberfläche eine sinkende Wasseraufnahmefähigkeit [22].

Bei den Versuchen zur Wasseraufnahmefähigkeit nach Enslin-Neff, dargestellt in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, und nach Puntke steigt die Wasseraufnahmefähigkeit mit der Calciniierungstemperatur wesentlich an. Dieser Effekt bestätigt sich auch bei laufenden Folgeuntersuchungen an anderen Tonen (Kaolin, Illit).

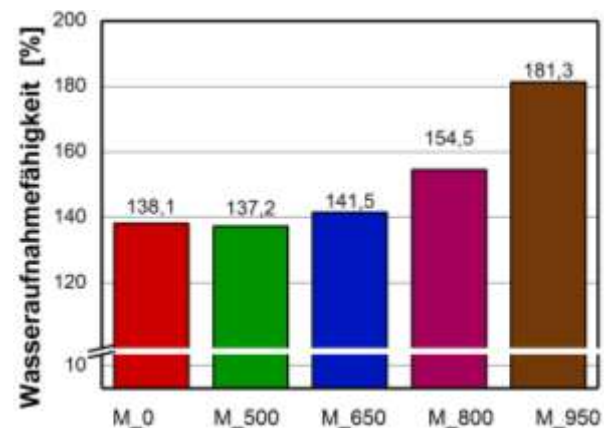


Abbildung 11: Wasseraufnahmefähigkeiten nach dem Enslin-Neff-Verfahren bei unterschiedlichen Calciniierungs-temperaturen

Korreliert man die Wasseraufnahmefähigkeit nach Enslin-Neff und Puntke mit der BET Oberfläche (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), stellt sich ein gegenläufiges Verhalten ein: **Die Wasseraufnahmefähigkeit steigt mit sinkender BET Oberfläche.** Die Regressionsgerade weist eine sehr hohe Korrelation zwischen der nach Enslin-Neff gemessenen Wasseraufnahmefähigkeit und der BET Oberfläche und eine hohe Korrelation zwischen der Wasseraufnahmefähigkeit nach Puntke und der BET Oberfläche auf.

Der in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** starke Abfall der BET Oberfläche zwischen Muskovit\_800 und Muskovit\_950 lässt auf erste **Sinterungseffekte** schließen. Die **Dehydroxilierung** erfolgt auf einem wesentlich **niedrigeren Temperaturniveau**. Allerdings erreichen calcinierte Tone bereits mit abgeschlossener Dehydroxilierung ihr gewünschtes puzzolanes Reaktionsvermögen, weshalb die thermische Behandlung im Dehydroxilierungsbereich ausreichend ist. Daher ist die große Steigerung der Wasseraufnahmefähigkeit von Muskovit\_800 zu Muskovit\_950 nur von bedingter Relevanz für den Einsatz calcinierter Tone.



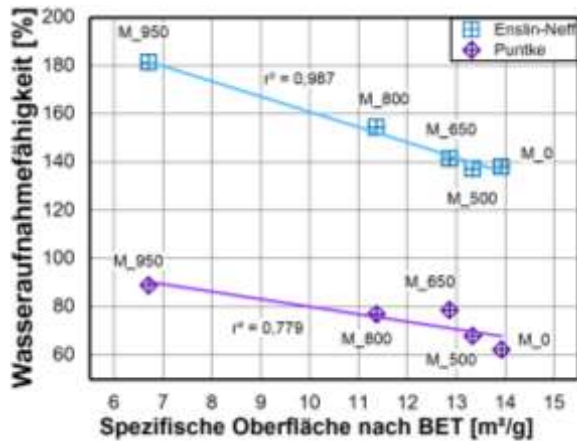


Abbildung 12: Wasseraufnahmefähigkeit nach Puntke und Enslin-Neff in Abhängigkeit der BET Oberfläche

Untersuchungen von He [10] haben ergeben, dass die Verarbeitbarkeit unter Verwendung von bestimmten calcinierten Tonen gegenüber ihrem Rohzustand besser ist. Dies kollidiert mit der erhöhten Wasseraufnahmefähigkeit.

## Literaturverzeichnis

- [1] *OECD/IEA and the World Business Council for Sustainable Development: Cement Technology Roadmap 2009 - Carbon emissions reductions up to 2050.* Genf, Paris, 2009, S.2
- [2] *Stoll, Schwarzkopp, F., Drescher, J., Gornig, M., Blazejzak, J.: Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland.* Berlin, 2016, S. 39-41
- [3] *Brindley, G. W., Nakahira, N.: The Kaolinite - Mullite reaction series. I A survey of outstanding Problems II The high-temperature phases.* Journal of the American Ceramic Society , 07.1959, S. 314–318
- [4] *Freund, F.: Die Deutung der exothermen Reaktion des Kaolinit als "Reaktion des aktiven Zustands".* Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft , 1960, S. 209–219
- [5] *Gridi-Bennadji, F., Beneu, B., Laval, J. P., Blanchart, P.: Structural transformations of Muscovite at high temperature by X-ray and neutron diffraction.* Applied Clay Science , 2008, S. 259–267
- [6] *Mackenzie, K.J.D., Brown, I.W.M., Cardile, C. M., Meinhold, R. H.: The thermal reaction of muscovite studied by high resolution solid state 29-Si and 27-Al NMR*Journal of Materials Science 22, 1987, S. 2645–2654
- [7] *Thienel, K.-C., Beuntner, N.: Performance and Properties of Concrete made with Calcined Clays*
- [8] *Thienel, K.-C., Beuntner, N. (Hg.): Effects of Calcined Clay as Low Carbon Cementing Materials on the Properties of Concrete,* 2012, S. 504-517
- [9] *He, C., Øsbæck, Makovicky, E.: Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects.* Cement and Concrete Research , 1995, S. 1691–1702

Es liegt also nahe, dass calcinierte Tone das aufgenommene Wasser nicht vollständig dem Zement zur Hydratation zur Verfügung stellen. Es könnte eine Art innere Nachbehandlung stattfinden, ähnlich wie sie bei saugfähiger Gesteinskörnung beim Leichtbeton zu finden ist.

Im Hinblick auf die erforderliche Frostwiderstandsfähigkeit von Baustoffen ist eine hohe Wasseraufnahmefähigkeit calcinierter Tone eher kritisch zu sehen und es gilt die Verträglichkeit weiter zu überprüfen und zukünftig systematisch zu untersuchen.

Weitere Forschungsarbeiten sollten sich intensiv mit Betonen unter Einsatz unterschiedlicher Tone oder Tongemische befassen, somit den Weg für die industrielle Verwendung calcinierter Tone ebnen und der Bauindustrie einen innovativen und effektiven Ersatzstoff bieten.

- [10] He, C., Makovicky, E., Osbæck, B.: Thermal treatment and pozzolanic activity of sepiolite. *Applied Clay Science*, 1196, S. 337–349
- [11] Massazza, F.: Pozzolanic Cemets. *Cement & Concrete Composites* 15. Bergamo, 1993, S. 185-214
- [12] Wesche, K., Schubert, P.: Beton, Mauerwerk (Nichtmetallisch-anorganische Stoffe). Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit. Wiesbaden Bauverl., 1993, S.108,118,119, 144, 375
- [13] Grübl, P., Weigler, H., Karl, S.: Beton. Arten, Herstellung und Eigenschaften. Berlin Ernst, 2001, S. 62, 73, 120, 459-464
- [14] Beuntner, N.: Zur Eignung und Wirkungsweise Calcinierte Tone als reaktive Bindemittelkomponente im Zement. Neubiberg, 2017, S.8, 12, 13, 20
- [15] Beuntner, N., Thienel, K.-C.: Solubility and kinetics of calcined clay: study of interaction by pore solution. Neubiberg, 2016
- [16] Salmang, H., Scholze, H., Telle, R.: Keramik. Dordrecht Springer, 2007, S. 62, 73, 791
- [17] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 18132: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte – Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens. Berlin (2012)
- [18] Puntke, W.: Forschen, Messen, Optimieren: Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken. Beton, S. 242–248, Frankfurt
- [19] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN ISO 9277: Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Festkörpern mittels Gasadsorption – BET-Verfahren. Berlin (2010)
- [20] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 196-6: Prüfverfahren für Zement – Teil 6: Bestimmung der Mahlfineinheit. Berlin (2010)
- [21] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN ISO 17892-3: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben Teil 3: Bestimmung der Korndichte. Berlin (2015)
- [22] Madsen, F. T., Nüesch, R.: Langzeitquellverhalten von Tongesteinen und tonigen Sulfatgesteinen. Zürich, 1990, S. 2-4

#### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Beuntner, N., Thienel, K.-C.: Solubility and kinetics of calcined clay: study of interaction by pore solution. Neubiberg, 2016
2. He, C., Makovicky, E., Osbæck, B.: Thermal treatment and pozzolanic activity of sepiolite. *Applied Clay Science* 1196
3. Salmang, H., Scholze, H., Telle, R.: Keramik. DordrechtSpringer, 2007
4. Jasmund, K., Lagaly, G.: Tonminerale und Tone. Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt. HeidelbergSteinkopff, 1993
5. Jessberger, H. L.: Flüssigkeitsaufnahme, Bildsamkeit und Sedimentationsstabilität von Ton. Ein Beitrag zur Erforschung der Flüssigkeitsaufnahme von Tonen und der Bildsamkeit und Sedimentationsstabilität von Ton-Wasser-Gemischen im Zusammenhang mit der Beeinflussung dieser Eigenschaften durch Zusätze. München, 1961



## Autor

Axel Neißer-Deiters wurde 1994 in Troisdorf geboren. Sein Abitur erhielt er am Konrad-Adenauer-Gymnasium in Meckenheim im Jahr 2013. Das Schuljahr 2010/11 verbrachte er im Ausland an der Sauk Rapids-Rice High School in Minnesota, USA. Nach der Schule arbeitete er als Dachdeckerhelfer bei der Firma Caspary Bedachungen GmbH, bis er 2014 die Offizierslaufbahn bei der Bundeswehr einschlug. Er studiert seit 2015 im Rahmen der Offizierausbildung Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften an der Universität der Bundeswehr München und vertieft dort den Konstruktiven Ingenieurbau.

## Betreuer

Die Bachelorarbeit wurde am Institut für Werkstoffe des Bauwesens an der Universität der Bundeswehr München bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel angefertigt. Die Betreuung erfolgte durch Dipl. Min. Sebastian Scherb.

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.**

# TRAGVERHALTEN VON VERBUNDTRÄGERN MIT PROFILBLECHEN UNTER BRANDBELASTUNG

## Master's Thesis

Rudolf, Röß M.Sc.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird das Tragverhalten von Verbundträgern mit hochstegigen Blechen im Brandfall untersucht. Auf Basis des Traglastberechnungsmodells bei Normaltemperatur von S. Nellinger [1. Nellinger] und mit der 500°C-Isothermen-Methode aus dem Anhang B des Eurocodes 2-1.2 [2. EC2], wird ein eigenes Bemessungskonzept für Kopfbolzendübel im Brand entworfen. Die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens werden genutzt, um mit Hilfe einer FE-Simulation und einer Parameterstudie den Einfluss verschiedener Verdübelungsgrade und Querschnittsgeometrien auf die Tragfähigkeit eines Verbundträgers im Brand zu untersuchen.

**Keywords:** Hochbau, Verbundbau, Brandschutz, Verbundmittel, Kopfbolzendübel, Brandbelastung, hochstegige Bleche, Verbunddecke, Systembau

### Tragverhalten von Verbundträgern mit Profilblechen und Kopfbolzendübeln

Verbundträger mit Profilblechen senkrecht zur Trägerachse (Abb.1) sind eine beliebte und wirtschaftliche Konstruktion, die im Hochbau häufig eingesetzt wird. Hierbei werden Stahlprofilbleche als mittragende, verlorene Schalung verwendet. Die damit entstehenden Verbunddeckensysteme ermöglichen eine schnelle und filigrane Bauweise. Durch die Verwendung immer größerer Profilblechhöhen verändert sich das Tragverhalten des Verbundsystems. Da die aktuellen Bemessungskonzepte nicht für große Profilblechhöhen ausgelegt sind, sind die Vorteile moderner Profilbleche nur schwer wirtschaftlich anwendbar. Dies betrifft insbesondere den Brandfall. Diese Arbeit soll zur

praktischen Anwendbarkeit größerer Profilblechhöhen beitragen. Damit kann eine neue, effizientere Bauweise flächendeckend, Ressourcen schonend und zukunftsorientiert angewendet werden.



Abb. 1: Verbundträger mit Kopfbolzendübel senkrecht zur Trägerachse [1]

Das aktuelle Bemessungsverfahren des Eurocode 4 [3. EC4] basiert auf zwei Traglastanteilen, der Beanspruchung des Dübels auf Biegung und der horizontalen Komponente in Form einer Dübelzugkraft. Bei höheren Blechen verschiebt sich jedoch der Ort des Versagens von dem unteren Bereich des Dübels in Richtung der Verbunddecke und die Betontragfähigkeit wird relevanter. Bei hochstegigen Blechen ist damit zusätzlich zu den beiden anderen Traglastanteilen die maximale Betonzugspannung der Betonrippe relevant.

### Bemessungsvorschlag für den Brandfall: NL500

Ein neuer Entwurf für ein Bemessungsverfahren (NL500) soll genauere und damit wirtschaftlichere Werte für die Traglast im Brandfall liefern. Hierbei werden das Traglastberechnungsmodell bei Normaltemperatur von Nellinger [1. Nellinger] und die 500°C-Isothermen-Methode aus dem Anhang B des Eurocodes 2-1.2 [2. EC2] miteinander kombiniert.

Nellinger [1. Nellinger] beschreibt in seiner Arbeit das Tragverhalten von hochstegigen Blechen bei Normaltemperatur. Darin teilt sich die Berechnung wie im aktuellen Eurocode [3. EC4] in die Traglast des Dübels und in die Betontragfähigkeit auf. Der jeweils kleinere Wert ist maßgebend, jedoch existiert kein geometrieabhängiger Abminderungsfaktor mehr. Das Stahlversagen unterscheidet sich von der aktuellen Berechnung nur durch die Veränderung des Vorfaktors. Das Tragverhalten des Betons unterteilt sich in den Anteil bei umgerissenem Beton und den Anteil bei gerissenem Beton. Bei umgerissenem Beton wird davon ausgegangen, dass eine definierte Fläche (Abb.2) die Kräfte abträgt.

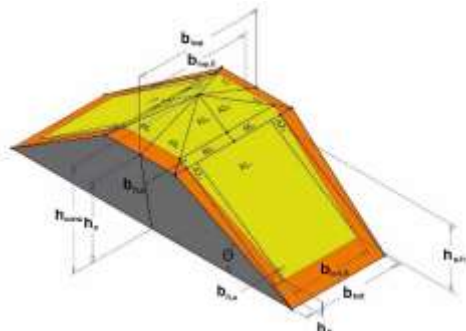


Abb. 2: Reduzierte Ausbruchfläche der Betonrippe

Dieser Bereich hängt vom Betondruckstrebenwinkel, der Blechgeometrie, sowie der Dübelhöhe ab. Bei Überschreitung der Betonzugfestigkeit am Rande der Ausbruchfläche gilt der Beton als gerissen. Der Traganteil bei gerissenem Beton ist von der Einbindetiefe des Dübels im Beton oberhalb der Betonsicke abhängig. So versagt der Dübel entweder mit einem Fließgelenk bei geringer Einbindetiefe, oder mit zwei Fließgelenken bei größerer Einbindetiefe. Das Berechnungsverfahren basiert auf einem mechanischen Modell und wurde mit über 180 Versuchen verglichen.

In der aktuellen Fassung der EN 1994-1-2 [3. EC4] wird im Brandfall bei Profilblechen mit einer Sickenhöhe von maximal 85 mm mit einem temperaturabhängigen Parameter die Materialfestigkeit abgemindert. Jedoch gilt, dass die Betontemperatur mit 40 % und die Kopfbolzentemperatur mit 80 % der Stahltemperatur des oberen Flansches angenommen werden darf. Diese Temperatureinschätzung ist für hochstegige Bleche äußerst ungenau, da zum Beispiel nur wenige Millimeter Höhenunterschied des Messpunkts der Kopfbolzendübeltemperatur bereits einen Unterschied von 50 °C betragen kann. Auch findet durch sehr schmale Stege ein nicht unerheblicher Wärmeeintrag von den Seiten statt. Somit ist es nicht sinnvoll die gleichen Werte für Massivdecken und Decken mit hochstegigen Blechen zu verwenden.

Mit dem neuen Entwurf eines Bemessungskonzepts für den Brandfall NL500 behält der Beton mit einer Temperatur von unter 500°C seine volle Tragfähigkeit, während die Tragfähigkeit des Betons über 500°C zu Null angenommen wird. Die Betonfestigkeit wird somit nicht abgemindert, sondern die von Nellinger [1. Nellinger] beschriebene Ausbruchfläche (Abb.2). Mithilfe von drei Abminderungswerten wird die Fläche im Brandfall genau festgelegt (Abb.3). Die Abminderungswerte definieren sich dabei durch die Höhe der Betonsicke, die Breite der Sicke oben und die Breite der Sicke unten.







## Parameterstudie

Für eine umfangreiche Parameterstudie zur Untersuchung des Versagensmodus von Verbundträgern wurden mehrere Modelle mit Abaqus erstellt. So wurde unter anderem der Einfluss des Verdübelungsgrades auf die Tragfähigkeit, sowie der Versagensmodus bestimmt. Zuerst wurde die Temperaturverteilung unter ETK-Belastung eines Detailmodells des Kopfbolzendübels mit der entsprechenden Betonsicke und einem Stahlträger untersucht (Abb.4). Mit den daraus gewonnenen Daten und dem NL500-Verfahren wurden die maximalen Traglasten im Brandfall berechnet. Die ermittelten Traglasten wurden mit Hilfe eines von Versuchen abgeleiteten, temperaturabhängigen Federkennlinienmodells in eine größere Simulation übernommen. In der Traglast-simulation wurde ein IPE 300 Träger mit verschiedenen Betongeometrien belastet und anschließend mit einer Temperaturlast aus der ETK beaufschlagt. Die Kopfbolzendübel wurden dabei, aus Gründen der Rechenkapazität, als Federelemente mit den oben erwähnten Federkennlinien modelliert. Die Modelle wurden mit Hilfe von verschiedenen Versuchen und Vergleichsrechnungen validiert. Als Versagenskriterium wurde ein praxisnaher Wert von 300 mm maximaler Durchbiegung angenommen.

In der Parameterstudie wurden insgesamt drei Blechgeometrien untersucht. Hierbei wurden Geometrien nah an den gegebenen Anwendungsgrenzen der Berechnungsmethoden gewählt. Der Verdübelungsgrad der einzelnen Geometrien wurde mittels Federkennlinien verändert, um so die Auswirkung zu untersuchen. Insgesamt wurden so 20 statische Berechnungen und 6 Temperaturanalysen durchgeführt. Unter anderem wurden die Temperaturen, die relativen Verschiebungen der Kopfbolzendübel und die Durchbiegung des Stahlträgers in Abhängigkeit der Zeit unter ETK-Belastung ausgelesen.

## Ergebnisse der Parameterstudie

Der Verdübelungsgrad von hochstegigen Blechen im Brandfall ist bisher nur unzureichend und unwirtschaftlich geregelt. Bisher gilt bei Normaltemperatur ein minimaler Verdübelungsgrad von  $\eta \geq 0,4$  [3. EC4]. Im Brandfall muss nach Eurocode 4 Teil 1-2 [3. EC4] für eine

Teilverdübelung von Verbundquerschnitten entweder der Nachweis über Versuche, oder durch Berücksichtigung der Veränderung der Längsschubkraft infolge Erwärmung erbracht werden. Prinzipiell lässt sich aus den Versuchen ableiten, dass die Versagenszeit im Bereich von  $1,0 \geq 0,4$  Verdübelungsgrad in etwa gleich bleibt, darunter fällt sie ab. Die Veränderung des Endschlupfes lässt sich durch drei Effekte beschreiben: Erstens negativer Schlupf infolge der thermischen Dehnung des Stahlträgers, zweitens positiver Schlupf resultierend aus der Biegung des Trägers durch die Temperaturlast und drittens positiver Schlupf durch, aus der Last resultierende Biegung [4]. Als positiver Schlupf gilt hierbei, wenn der Beton sich stärker als der Stahlträger ausdehnt. Der Stahlträger versagte immer vor den Verbindungsmitteln. Durch den ersten Effekt waren die Kopfbolzendübel zum Versagenszeitpunkt jedoch fast vollständig entlastet.

## Fazit

Das aktuelle Bemessungsverfahren für Verbundträger mit Profilblechen im Brandfall ist nicht für die Anwendung mit hochstegigen Blechen ausgelegt. In dem hier betrachteten Fall liegen die Ergebnisse des Bemessungsverfahrens nach EN 1994-1-2 [3. EC4] möglicherweise auf der unsicheren Seite. Es wurde daher ein neuer Entwurf für ein Bemessungsverfahren vorgeschlagen. Hierbei wird eine bestehende Bemessungsmethode für Kopfbolzendübel in hochstegigen Blechen mit einer Abminderung des Betons im Brandfall kombiniert. Erste Vergleiche mit durchgeführten Versuchen zeigen eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Das bisher nur auf theoretischer Basis entwickelte Bemessungsverfahren NL500 muss noch mit Versuchen aus der Literatur verifiziert und kalibriert, eventuell verbessert und erweitert werden. Für die Praxis sollte ein vereinfachtes Verfahren abgeleitet werden.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Tata Steel, Europe-Limited (Hrsg.): Verbunddeckensystem mit Profilblech ComFlor R 80 Tata Steel. [https://www.tatasteelconstruction.com/static\\_files/Tata%20Steel/content/products/Building%20Systems/Comflor/Comflor%2080/Images/comflor-composition-cf80.jpg](https://www.tatasteelconstruction.com/static_files/Tata%20Steel/content/products/Building%20Systems/Comflor/Comflor%2080/Images/comflor-composition-cf80.jpg) . Version: 2017
- [2]: CHEN L., et a., "Behaviour and design of shear connectors in composite slabs at elevated temperatures", Journal of Constructional Steel Research, No. 115, 2015, pp 387–397.
- [3]: DIN EN 1991-1-2:2010-12, "Eurocode 1: Einwirkung auf Tragwerke Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen; Brandeinwirkungen auf Tragwerke", 2010.
- [4]: Pfenning, S.; Brunkhorst, S.; M., Mensinger; Zehfuß, J.: Investigation of the effects on the shear connection of composite beams under various fire exposure. In: 2nd International Fire Safety Symposium. Neapel, Italien, 06. – 09. Juni 2017, 2017

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Nellinger, Sebastian: On the behaviour of shear stud connections in composite beams with deep decking; Université du Luxembourg, The Faculty of Sciences, Technology and Communication, Dissertation, 2015
2. EC2-1.2: DIN EN 1992-1-2:2010-12 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1992-1-2:2004 + AC:2008; Deutsches Institut für Normung e.V. 2010
3. EC4: DIN EN 1994 Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton; Deutsche Fassung EN 1994; Deutsches Institut für Normung e.V. 2010



### **Autor, Coautoren**

Rudolf Röß M.Sc.

Lebenslauf:

2012 – 2015 Studium Bauingenieurwesen B.Sc. TU München

2014 – 2017 Werkstudent bei SSF Ingenieure AG, München

2015 – 2017 Studium Bauingenieurwesen M.Sc. TU München

### **Betreuer**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger

Samuel Pfenning M.Sc.

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Metallbau, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger.

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.**

# MONTAGEHILFE IM TROCKENBAU MIT DER MICROSOFT HOLOLENS AM BEISPIEL: BAUBETRIEBSLABOR PRÜFENING

## Bachelorarbeit

Michael, Roth

Die von Microsoft entwickelte Augmented Reality Brille „HoloLens“ eröffnet für die Industrie eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten zur Prozessoptimierung in Unternehmen. Im Maschinenbau und in der Automobilbranche wird dieses neue Medium seit geraumer Zeit für Schulungszwecke und als Unterstützung bei der Montage verwendet. Die Abschlussarbeit untersucht die Umsetzbarkeit im Bausektor, speziell den Nutzen im Baubetrieb auf der Baustelle. Im Vordergrund des Projekts steht die repräsentative Planung einer abgehängten Decke der Firma Lindner in Hinblick auf Maßgenauigkeit und Montagehilfe. Hierfür wird mit den Programmen Revit, Unity und Microsoft Visual Studio ein virtuelles Hologramm erstellt, welches im Anschluss mit der HoloLens im Raum betrachtet werden kann. Abschließend werden Anwendungsmöglichkeiten und der Aufwand einer solchen Planung bewertet.

### Hintergrund und Motivation der Arbeit

In der Bauindustrie werden 3D-Planungen aufgrund ihrer zahlreichen Vorteile immer häufiger eingesetzt. Die Modelle werden hierbei nicht mehr in zweidimensionalen Ansichten gezeichnet, sondern in Form von intelligenten Objekten zu einem vollständigen dreidimensionalen Gebäudemodell zusammengefügt. Dem Prinzip des Building Information Modeling (BIM) zufolge hat das Modell nicht nur geometrische Abmessungen, sondern beinhaltet auch Informationen über Kosten, Zeit und Eigenschaften des Materials.

Durch die Neuorientierung hin zur 3D-Zeichnung ändert sich nicht nur der gesamte Planungsprozess, sondern auch der Einsatz von Plänen und Zeichnungen auf der Baustelle. So ist der Wandel von den herkömmlichen, großen Papierplänen zu moderneren Lösungen, die neben einer klassischen 2D-Ansicht auch 3D-Perspektiven mit einschließen, unumgänglich.

Zu diesen gehören neben klassischen Tablets auch leistungsfähigere Mittel wie große Touchbildschirme, die Pläne je nach Bedarf an Wänden oder anderen Arbeitsflächen anzeigen können. Zu den diesbezüglich innovativsten Instrumenten gehören die sogenannten

„Augmented Reality“ (dt.: Erweiterte Realität, kurz: AR) Systeme.

Im Januar 2015 hat die Firma Microsoft ihre AR-Brille „Microsoft HoloLens“ als die erste Brille mit der für die freie Platzierung von Hologrammen im Raum benötigten Sensortechnik vorgestellt. Diese Brille ermöglicht es erstmals, Darstellungen aus jeder potenziellen Perspektive betrachten zu können. Die Intention der Abschlussarbeit besteht darin, die Einsetzbarkeit der Microsoft HoloLens für die Anwendung auf Baustellen zu untersuchen.

## Szenario und Problemstellung

Um die Vorteile der BIM-Planung auf der Baustelle nutzen zu können, stellt sich die Frage, wie man von klassischen Papierplänen auf eine modernere, zukunftssträchtigere Technologie wechseln könnte. Bisher besteht auf der Baustelle nur die Möglichkeit, 3D-Modelle auf herkömmlichen PCs und Tablets zu betrachten. Ein interaktiver Umgang mit Bauteilen ist nur bedingt möglich und auch die Handhabung eines 2D- bzw. 3D- Planes ist für Laien oft mit Schwierigkeiten verbunden. Hier kommt die Microsoft HoloLens ins Spiel. Ziel ist es, Objekte, die als 3D-Modell bereits fertig geplant sind, als Hologramm direkt in das Sichtfeld des Nutzers einzublenden. Dies ermöglicht nicht nur die vorzeitige Erkennung möglicher Bauteilkollisionen, sondern kann auch als Montagehilfe fungieren. Im Fall der abgehängten Decke sollen dementsprechend neben der fertig ausgeführten Decke auch der Unterbau und die jeweiligen Bohrlöcher erkennbar sein. Je nach Genauigkeit kann der Monteur ohne Plan oder Maßband die Bohrlöcher mithilfe des Hologramms an die Rohdecke übertragen. Der Plan in Papierform soll also möglichst ganzheitlich verdrängt werden.

## Microsoft HoloLens

Die Microsoft HoloLens wurde erstmals Anfang 2015 vorgestellt. Die ersten Development Editionen wurden im März 2016 in den USA auf den Markt gebracht. In Deutschland ist die Brille seit Oktober 2016 vorbestellbar. Bei der HoloLens handelt es sich um ein sogenanntes Head-Mounted-Display, welches man durch einen Drehverschluss am Kopf anbringt. Die Brille besitzt eine durchsichtige holographische Linse zum Einblenden der Hologramme, für die Erfassung der Umgebung hat sie diverse Sensoren verbaut.



Abbildung 13: Microsoft HoloLens (1)  
**Das Testprojekt**

Als Deckenelement wird ein Deckensystem der Lindner Group gewählt. Speziell wird mit der Metalllamellendecke LMD\_L601 gearbeitet. Bei dieser Deckenform hat man wegen der hängenden Lamellen im Gegensatz zu flachen Decken einen besseren 3D-Effekt durch die HoloLens. Das 3D-Modell ist als Revit-Familie im Downloadbereich für BIM-Objekte auf der Homepage der Lindner Group frei verfügbar. (2)



Abbildung 14 Metalllamellendecke LMD\_L601 (3)  
**Die Planung wird für das Baubetriebslabor an der OTH-Regensburg erstellt.**

## Der Modellaufbau

Das Deckenmodell wird mithilfe des CAD-Programms „Revit“ und der Vorlage der Lindner Group generiert und als \*.fbx Datei exportiert, woraufhin diese nun in „Unity“ importiert werden kann. Unity ist die gängige Software für AR-Anwendungen und dient dazu, Kameraeinstellungen und Skripte so einzusetzen, dass zusätzlich zur Sichtbarkeit der Hologramme eine Interaktion mit denselben möglich ist. Sobald die Szene alle notwendigen Bestandteile enthält, wird diese mit „Microsoft Visual Studio“ geöffnet. „Microsoft Visual Studio“ ist eine Entwicklungssoftware für Programmiersprachen und dient als Schnittstelle zwischen Unity und der HoloLens.

## Maßgenauigkeit

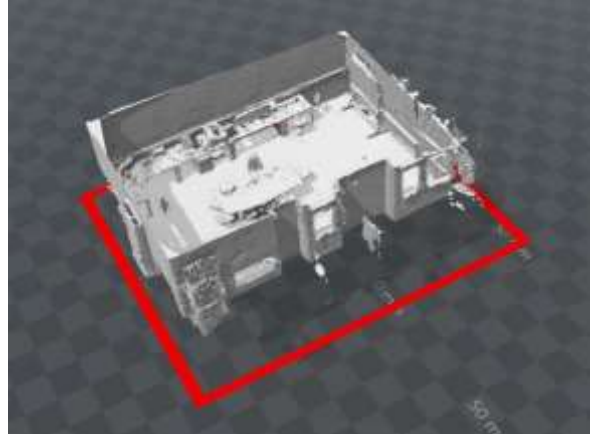
Um die Maßhaltigkeit zu überprüfen, wird an einer Ecke des Modells eine Positionierungsplatte erstellt. Diese wird so passgenau wie möglich in eine Ecke des Raumes gelegt. Um nun zu überprüfen, ob die Maßgenauigkeit gegeben ist, wird auf der diagonal gegenüberliegenden Seite eine Kontrollplatte erstellt, welche sich dort im Idealfall genau in der Raumecke befinden soll. Ist dies nicht der Fall, kann die Abweichung anhand des Abstands zwischen Kontrollplatte und Ecke ermittelt werden.

Die Microsoft HoloLens vermisst den Raum und stellt diesen in Form des sogenannten „Spatial Mapping“ durch ein virtuelles Netz aus Dreiecken dar.



**Abbildung 15: Screenshot HoloLens: Das freischwebende Modell der Decke mit sichtbarem "Spatial Mapping" (4)**

**Dieses Modell kann von der Brille heruntergeladen werden und direkt in Unity eingelesen werden.**



**Abbildung 16: Screenshot: Von der Brille generiertes Modell des Baubetriebslabors ohne Decke**

Sobald das erstellte Deckenmodell genau auf das von der HoloLens generierte Modell platziert wird, werden bereits leichte Abweichungen in der Maßhaltigkeit erkennbar.

Eine weitere Fehlerquelle entsteht bei der Platzierung des Hologramms im realen Raum. Durch die Gestensteuerung ist eine exakte Positionierung der dreidimensionalen Darstellung nur bedingt möglich. Parallaxenfehler, schlechte Kontrollmöglichkeit der Winkel und die unpräzise Darstellung durch das Spatial Mapping steigern die Ungenauigkeit.



**Abbildung 17: Screenshot HoloLens: Kontrollplatte sollte sich exakt in der Ecke befinden**

Es entstehen Abweichungen von bis zu 6,5 cm, was für Montagezwecke nicht tolerierbar ist.



## Neues Konzept

Die aktuelle Soft- und Hardware gestattet es momentan noch nicht, der erforderlichen Maßhaltigkeit zu entsprechen. Aus dieser Erkenntnis folgt die Entwicklung weiterer Anwendungsmöglichkeiten, hierbei scheint die Verwendung der Brille als eine Alternative zu Montageplänen besonders naheliegend.

Anders als die zuvor verwendete Metallamellendecke LMD\_L601 haben nicht alle abgehängten Decken ausschließlich einheitliche Bauteile, bei der wellenförmigen „LMD-L-Laola“ der Firma Lindner zum Beispiel hat jede einzelne Lamelle eine individuelle Form. Um der hierdurch entstehenden Gefahr der Bauteilverwechslung bei der Montage vorzubeugen, wird ein Montageplan verwendet. Dieser kann in Zukunft durch die Microsoft HoloLens ersetzt werden.

Bei der Übertragung des wellenförmigen Deckenmodells auf die HoloLens wird nach dem bereits beschriebenen Prinzip vorgegangen. Der Monteur hat beim Installieren der Decke nun mithilfe des Hologramms die Möglichkeit, einen direkten Ist- und Sollvergleich anzustellen. Er kann anhand der Brille abgleichen, ob sich die montierten Lamellen in korrekter Position befinden.

Aufgrund der Ähnlichkeit einzelner Lamellen ist die Bauteilerkennung allein über die Form nicht möglich, was allerdings eine Voraussetzung für den Ersatz des klassischen Plans mit Bauteilnummern darstellt. Ein Lösungsweg wäre das Einblenden von Bauteilinformationen bei der gestischen Auswahl der jeweiligen Lamelle. Dies sollte technisch durchaus im Bereich des Möglichen liegen, überschreitet jedoch die Intention der Bachelorarbeit. Auch Funktionen wie das Aus- und Einblenden der bereits montierten Lamellen ist vorstellbar, übersteigt aber ebenfalls die programmiertechnischen Ansprüche der

Abschlussarbeit.



Abbildung 18: Screenshot HoloLens, bearbeitet: Beispiel für eingeblendete Informationen mit der HoloLens (5)

## Ergebnis

Microsoft bietet mit dem ersten Modell der HoloLens bereits eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten für die Baubranche. Die Anordnung von verschiedenen Bauteilen im Raum ist derzeit bereits sehr gut umsetzbar. So ist neben dem Einsatz als Montageplan auch das Einblenden von einfachen Maßen und im BIM-Modell hinterlegten Daten sehr gut denkbar. Des Weiteren ist die Darstellung von Kabel- und Rohrverläufen, Verlegemustern oder gesamten Baustelleneinrichtungen möglich. Zudem kann der Planer per Videoanruf mit dem Monteur kommunizieren und Anweisungen mithilfe von Hologrammen geben. Da Microsoft bereits an der nächsten Generation der AR-Brille arbeitet, ist es gut vorstellbar auch präzisere Arbeiten wie das bereits untersuchte Darstellen von Bohrlöchern oder das exakte Setzen von Bauteilen durchzuführen.

## Literaturverzeichnis

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- (1) [online] [Zitat vom 10.01.2018]: [https://compass-ssl.surface.com/assets/b9/79/b9796eb8-09d1-4cf2-a116-6e7e1538996e.jpg?n=Hololens\\_Hardware\\_HumanFactor-Xray\\_1083\\_OCT12.jpg](https://compass-ssl.surface.com/assets/b9/79/b9796eb8-09d1-4cf2-a116-6e7e1538996e.jpg?n=Hololens_Hardware_HumanFactor-Xray_1083_OCT12.jpg)
- (2) Firma Lindner. Metall Lamellendecken. [Online] 16. April 2015. [Zitat vom: 5. Oktober 2017.] [http://bimobject.com/de/embed/lindner-group/product/lmd\\_l601/products](http://bimobject.com/de/embed/lindner-group/product/lmd_l601/products)
- (3) [online] [Zitat vom 10.01.2018] [https://www.lindner-group.com/fileadmin/lindner-group/ausbauprodukte/decke/lamellendecken/produktdetails/decke\\_lamellendecken\\_lmd\\_l\\_601\\_01.jpg](https://www.lindner-group.com/fileadmin/lindner-group/ausbauprodukte/decke/lamellendecken/produktdetails/decke_lamellendecken_lmd_l_601_01.jpg)
- (4) Herkunft Modell: [Online] Lindner Group. 2017. [Zitat vom: 27. Dezember 2017.] [http://bimobject.com/de/embed/lindner-group/product/lmd\\_l601/products](http://bimobject.com/de/embed/lindner-group/product/lmd_l601/products)
- (5) Herkunft Modell: [Online] Lindner Group. 2017. [Zitat vom: 27. Dezember 2017.] <http://bimobject.com/de/embed/lindner-group/product/lmd-l-laola/products>



### **Autor**

Herr Michael Roth, geboren am 20.04.1991 in Schrobenhausen  
seit 2018 Bauleiter bei der Strabag AG  
2018 Bachelor of Engineering im Bereich Bauingenieurwesen  
2012 Fachabitur, BOS  
2011 Metallbauer Konstruktionstechnik  
2007 Ausbildung Metallbauer Konstruktionstechnik

### **Betreuer**

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät Bauingenieurwesen der OTH Regensburg im Fachbereich Baubetrieb bei Prof. Dipl.-Ing. Klaus Hager.

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.**

# 5D-BIM PARAMETRISIERTE BRÜCKENPLANUNG VARIANTENVERGLEICH VERSCHIEDENER VERKEHRSFÜHRUNGEN

## Masterarbeit

*Christine Sander*

Die Planung und Realisierung von Bauwerken im Hoch- und Straßenbau erfolgt heutzutage trotz modernster Software immer noch mit 2D-Zeichnungen. Dabei ist es nicht möglich die Zeichnungselemente und Geometrien mit Merkmalen zu verknüpfen. Hierbei rückt das Thema BIM immer mehr in den Vordergrund. BIM beruht auf einem mit semantischen Informationen gefülltes, digitales Bauwerksmodell und einer durchgängigen Nutzung über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks. Aktuell wird die BIM-Methode maßgeblich im Hochbau angewendet. Die Umsetzung von Infrastrukturbauwerken mit der BIM-Methode gestaltet sich aufgrund mangelnder Erfahrung schwieriger. Mit Veröffentlichung des Stufenplans Digitales Planen und Bauen und aufgrund der aktuellen Entwicklungen der Digitalisierung, speziell im Ingenieurbau, wurde die Durchführbarkeit einer 5D-BIM Planung anhand eines parametrisierten Brückenmodells und einem Variantenvergleich verschiedener Verkehrsführungen betrachtet. Dabei erwies sich der Datenaustausch von Informationen, aufgrund der aktuell für den Hochbau ausgelegten Softwareprogramme, als besonders fehleranfällig. Durch Weiterentwicklungen der Softwareprogramme und Standardisierungen lassen sich dennoch Brückenbauwerke in naher Zukunft mit der BIM-Methode realisieren.

**Keywords:** BIM, Bauwerksmodell, Siemens NX, Parametrische Modellierung, Verkehrsführungen, Bauzeiten, Baukosten, Schnittstellen

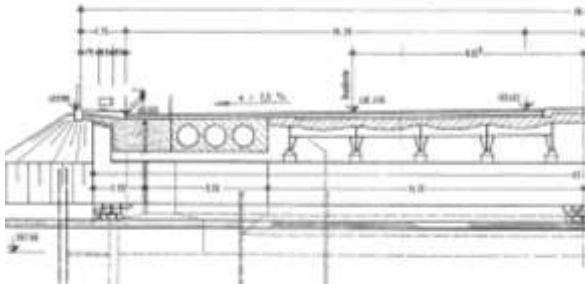
## Theoretische Grundlagen BIM

Der Begriff BIM steht zum einen für das Building Information Model, ein mit semantischen Informationen hinterlegtes dreidimensionales Bauwerksmodell, zum anderen für Building Information Modeling, eine Methode die eine durchgängige Nutzung eines dreidimensionalen

Bauwerksmodells über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks beschreibt.

Das Ziel von BIM ist es, alle Prozesse die während des Lebenszyklus eines Bauwerks erforderlich sind, unter Zuhilfenahme eines digitalen Bauwerksmodells abzuwickeln sowie das gemeinsame, integrale Arbeiten am digitalen Bauwerksmodell aller am Projekt Beteiligten [1].

Heutzutage werden Bauwerke wie Ingenieur- oder Hochbauten größtenteils anhand von 2D-Zeichnungen geplant. Die Abbildung von Bauwerken und Anlagen im Hoch- und Straßenbau erfolgt mit Grundrissen, Schnitten und Ansichten mittels CAD-Darstellung oder Papierzeichnungen.



**Abb. 1: 2D-Längsschnitt Bauwerk 55**

Dabei ist es nicht möglich die Zeichnungselemente und Geometrien mit Merkmalen zu verknüpfen. Für eine ganzheitliche Betrachtung des Bauvorhabens ist somit meist eine Zusammenführung von mehreren Plänen und Unterlagen mit Teilinformationen notwendig. Hierbei rückt das Thema BIM nun immer mehr in den Vordergrund. Die Veröffentlichung des Stufenplans „Digitales Planen und Bauen“ vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur im Jahr 2015 bestärkt die Notwendigkeit von BIM im digitalen Zeitalter. Durch aktuelle Pilotvorhaben wird die Einführung der BIM Methode unterstützt. Denn Ziel ist es, dass alle neuen Projekte ab dem Jahr 2020 mit der BIM Methode geplant und realisiert werden [2].

Dabei unterscheidet sich die BIM-Methode im Ingenieurbau hinsichtlich der Anforderungen grundlegend vom Hochbau. Die Geometrie und deren Anforderungen sind im Ingenieurbau um einiges höher als im Hochbau. Dafür steht im Hochbau die Kommunikation, aufgrund der hohen Anzahl an Projektbeteiligten, im Vordergrund. Im Ingenieurbau spielt diese wiederum eine eher untergeordnete Rolle [3]. Aktuell wird die BIM-Methode maßgeblich im Hochbau angewendet. Die Anwendung der BIM Methode im Ingenieurbau und speziell im

Brückenbau steckt bis dato noch in der Anfangsphase.

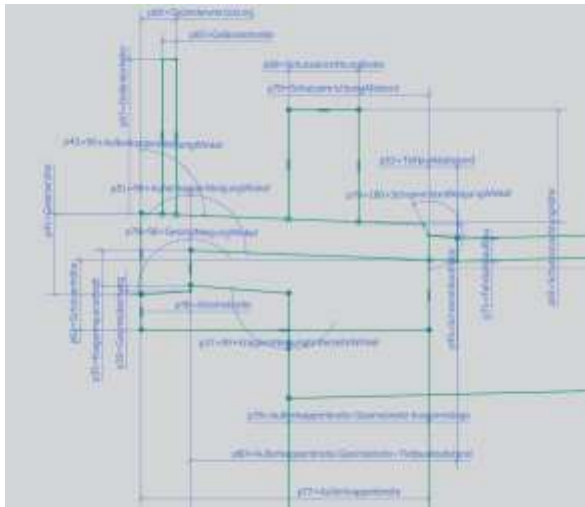
## Erhaltungsabschnitt 5 & Bauwerk 55

Die Bundesautobahn (BAB) 9 Nürnberg – München bildet für den regionalen wie auch den nicht regionalen Straßenverkehr die wichtigste Nord-Süd-Achse in Bayern. Mit einem durchschnittlichen täglichen Verkehr von bis zu rd. 146.000 Kfz/24 h (DTV 2016) zählt sie zu einer der am stärksten belasteten Autobahnen in Deutschland. Aufgrund des schlechten Erhaltungszustandes soll die BAB 9 zwischen Stammham und dem Autobahndreieck Holledau im Rahmen von fünf Erhaltungsabschnitten grundhaft saniert werden. Erhaltungsabschnitte sind primär Streckenerneuerungen im Zuge derer die Bauwerke der Strecke erneuert werden. Hier kann es vorkommen, dass Änderungen an der Trassierung o.ä. durchgeführt werden. Im Zuge des Erhaltungsabschnitts 5 zwischen der Anschlussstelle Langenbruck und dem Autobahndreieck Holledau soll ein Ersatzneubau für das Bauwerk 55 entstehen. Die im Jahr 1939 erbaute Brücke Bauwerk 55 überführt die BAB 9 über die Ilm. Dabei handelt es sich um ein einfeldriges Bauwerk mit insgesamt fünf Teilbauwerken. Für das Bauwerk 55 wurde im Zuge des Erhaltungsabschnitts 5 eine Nachrechnung gemäß der „Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand“ (Ausgabe 05/2011) erstellt. Bei der Nachrechnung ergab sich ein Ausnutzungsgrad von 100% bis 250%.

## Parametrische Modellierung mit Siemens NX

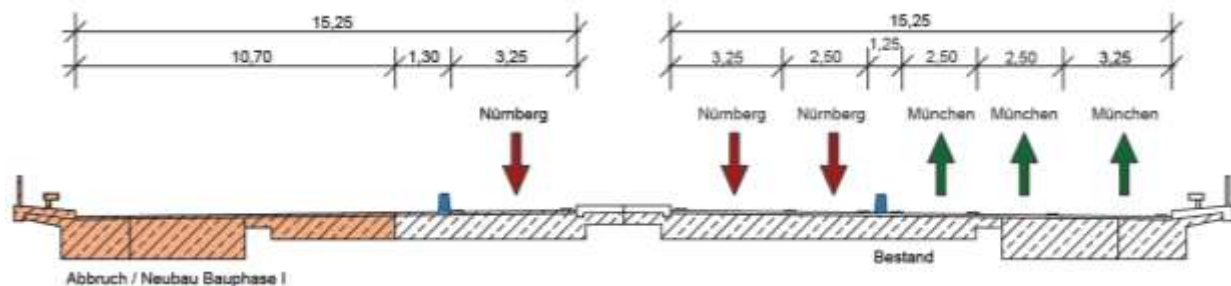
Das Programm Siemens NX ist vor allem im Bereich des Maschinenbaus weit verbreitet, wo schon in den 1990er Jahren das Konzept parametrischer CAD-Systeme eingeführt wurde. Die Herangehensweisen dieser Systeme

beruhen auf dem Einsatz von parametrischen Skizzen, die vorab vom Anwender als 2D-Skizzen angelegt werden (Abb. 1).



**Abb. 2: Skizze des Überbaus mit Bemaßung in Siemens NX**

Die Skizzen werden zunächst grob mit allen geometrischen Elementen und Abmessung erstellt und mit Zwangsbedingungen versehen.



**Abb. 3: Bauphase I, Verkehrsführung 5s+1 am Referenzquerschnitt**

## Variantenvergleich verschiedener Verkehrsführungen

Im Abschnitt des Ersatzneubaus im Zuge der BAB 9 treten zu bestimmten Tageszeiten stark unterschiedliche Richtungsverkehre auf. Die Durchführung der Maßnahme erfolgt unter Aufrechterhaltung des Verkehrs auf der BAB 9 und soll nur in den Monaten März bis Oktober erfolgen, also etwa acht Monate je Bauzeit. Im Bestand weist das Bauwerk drei Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn auf. Während der Baumaßnahme soll die Anzahl der Fahrstreifen möglichst beibehalten werden, um unnötige Engpässe und Staus so gering wie möglich zu halten.

Speziell in Siemens NX beruht die Bauwerksmodellierung auf dem Anlegen einer Baugruppenstruktur, welche aus Baugruppen und Komponenten besteht.

Eine Baugruppe enthält generell keine Konstruktion, sondern verbindet die konstruierten Bauteile untereinander. Die untergeordneten Komponenten referenzieren immer auf die übergeordnete Baugruppe. In den Komponenten sind Skizzen, Parameter und Befehle enthalten. Zusammenfassend gesagt liegt der Kern der parametrischen 3D-Modellierung in der Verknüpfung von Bauteilen untereinander, basierend auf einer Steuerdatei und einer Trassierung. Dadurch ist eine kontinuierliche Modellanpassung zu jeder Zeit in den relevanten Baugruppenkomponenten gegeben [4].

Aufgrund der Bestandsfahrbahnbreite je Richtungsfahrbahn von 15,25 m ist eine 6+0 Verkehrsführung nicht durchführbar, da die vorhandenen Fahrbahnbreiten hierfür zu schmal sind. Eine 6+0 Verkehrsführung setzt eine Mindestfahrbahnbreite von 16,00 m voraus.

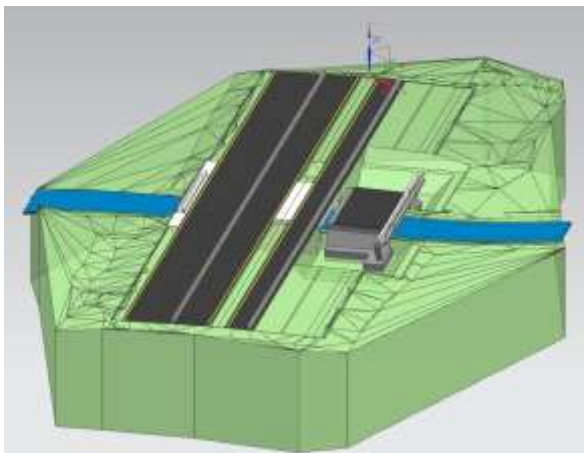
Um während der Baumaßnahme sechs Fahrstreifen aufrecht zu erhalten, werden drei unterschiedliche Verkehrsführungen betrachtet. Dafür kommen die beiden Verkehrsführungen 5s+1 und 4+2 mit Behelfsbrücke gemäß RSA – Richtlinie für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen in Frage.

Bei diesen beiden Verkehrsführungen können unter Ausnutzung beider Teilbauwerke die sechs Fahrstreifen aufrechterhalten werden. Zusätzlich zu den beiden Behelfsverkehrsführungen der RSA wird die Behelfsverkehrsführung 5w+0 mit



variabler Fahrstreifenzuteilung in Form eines Richtungswechselbetriebs (RWB) und einem QMB-System (Quick Moveable Barriers) betrachtet.

Bei der Modellierung der verschiedenen Verkehrsführungen muss vor Beginn der Modellierung, wie in Siemens NX üblich, eine geeignete Baugruppenstruktur angelegt werden. Dabei hat sich die Aufteilung der Baugruppenstruktur getrennt nach Bauphasen als sinnvollster Aufbau der Baugruppenstruktur ergeben. Es ergab sich somit bei der Verkehrsführung 5s+1 eine Baugruppenstruktur mit vier Baugruppen. Bei den Verkehrsführungen 5w+0 und 4+2 eine Baugruppenstruktur von zwei Baugruppen. Je Bauphase wird eine Baugruppe angelegt. Betrachtet man nur die rein visuelle Darstellung der Verkehrsführung mit ihren Fahrstreifen und Schutzeinrichtungen, wird der Detaillierungsgrad des Modells nebensächlich.



**Abb. 4: Modellierter Verkehrsführung 5s+1 in Siemens NX, links: fünf Fahrspuren auf Bestandsbauwerk, rechts: eine Fahrspur auf Bestandsbauwerk mit Teilstück Neubau**

Hier ist eine grobe Darstellung des Bauwerksmodells ausreichend, da die Darstellung der Verkehrsführung im Vordergrund steht. Berücksichtigt man allerdings die weitere Nutzung des Modells innerhalb eines BIM-Prozesses, ist es sinnvoll, das Modell in einem Detaillierungsgrad zu erstellen, welcher mindestens der Phase der Vorplanung entspricht. Dabei sollten die Bauwerksteile so detailliert modelliert werden, dass sie für die Erstellung eines Bauzeitenplans und für eine

Massenermittlung zur Erstellung eines Leistungsverzeichnisses verwendet werden können. Insbesondere bei der Ermittlung der Aufschüttmassen für die Behelfsbrücke ist ein höherer Detaillierungsgrad zu verwenden.

## Bauzeitenplan

Beim Erstellen der Bauzeitenpläne wird mit dem Programm Asta Powerproject gearbeitet. Zur Erstellung einer Kostenberechnung wird mit dem Programm ORCA AVA gearbeitet. Hier gibt es die Möglichkeit das 3D-Modell als IFC-Datei zu importieren.

Beim Erstellen des Bauzeitenplan ist die Möglichkeit der Nutzung des 3D-Modells begrenzt. Alle Volumenkörper sind einzeln anwählbar und mit Eigenschaften wie Bezeichnung, Gewicht und Layer hinterlegt. Allerdings sind keine weiteren intelligenten Daten aus dem IFC-Modell herauszulesen, wie beispielsweise Aufwandswerte für Betonarbeiten o.a. Mit den Angaben zu Gewicht und Bezeichnung kann manuell ein Bauzeitenplan erstellt werden sowie ein visualisierter Bauablauf in Form eines Videos.

## Baukosten

Bei der Kostenermittlung mit der Software ORCA AVA soll durch den Import des 3D-Modells als ifc-Datei eine schnelle Kostenermittlung anhand der Massen aus dem 3D-Modell aufgestellt werden. Allerdings erkennt die Software die Massen aus der ifc-Datei nicht. So führt der Import der ifc-datei nicht zu dem gewünschten Ergebnis einer schnellen Kostenermittlung. Die Kostenermittlung wird somit mit einer üblichen Excel-Tabelle aufgestellt.

Zu jeder Verkehrsführung wird jeweils eine Kostenermittlung aufgestellt. Zum Vergleich der Verkehrsführungen werden zusätzlich die externen Kosten infolge von Stau, der sich durch die baustellenbedingten Verkehrsführungen ergibt, berechnet. Die Summen aus den Baukosten und den externen Kosten infolge von

Stau der verschiedenen Verkehrsführungen wird gegenübergestellt und verglichen, um die wirtschaftlichste Verkehrsführung zu ermitteln.

## Fazit & Ergebnisse

Brückenbauwerke folgen in der Regel einer vorgegebenen Trassierung. Kommt es in der fortgeschrittenen Planung zu einer Änderung der Trassierung, ist dies in der 2D-Planung mit einem hohen Aufwand verbunden. Häufig müssen hier die bereits erstellten 2D-Zeichnungen aufwendig geändert werden. Hier bietet das Arbeiten innerhalb einer Baugruppenstruktur und das parametrische Modellieren einen großen Vorteil. Durch die Verknüpfung der Konstruktionen untereinander ist eine Trassenänderung mit ein paar Klicks durchgeführt. Der Zeitaufwand ist dadurch im Gegensatz zur 2D-Planung gering. Betrachtet man den Variantenvergleich verschiedener Verkehrsführungen ergibt sich ein hoher Modellierungsaufwand. Wo bei einer nachträglichen Trassenänderung die Parametrisierung noch vorteilhaft ist, bereitet diese beim Variantenvergleich durch die vielen Verknüpfungen Schwierigkeiten und erhöht den Zeitaufwand enorm. Die Bauteile können z.B. nicht „zerschnitten“ werden.

Zudem gibt es Schwierigkeiten bei den Schnittstellen der einzelnen Software-

Programme. Durch viele Zwischenschritte beim Import und Export gehen teilweise Informationen verloren bzw. werden nicht gewünscht übertragen. Dies ist bei der Übergabe von Attributen und Massen einzelner Bauteile ein großer Nachteil.

Ein BIM-Prozess, in dem es um die gemeinsame Nutzung eines Bauwerksmodells durch alle Projektbeteiligten geht, kann somit also nicht stattfinden. Das dreidimensionale Modell und dessen Visualisierung machen das Projekt anschaulich, doch können die semantischen Informationen innerhalb des Modells nicht weiter genutzt werden. Hierhingehend wird deutlich, dass sich die Durchführung der BIM-Methode für den Brückenbau noch in der Anfangsphase befindet. Im Gegensatz zum Hochbau, fehlen hier definitiv Erfahrungen zur Planung mit der BIM-Methode.

Insbesondere müssen die verfügbaren Softwareprogramme weiterentwickelt und auf den Brückenbau angepasst werden. Da die Vorteile der 3D-Modellierung und speziell die parametrische Modellierung im Brückenbau überwiegen, ist allerdings davon auszugehen, dass Brückenbauwerke in naher Zukunft vollständig mit der BIM-Methode realisieren lassen.

## Literaturverzeichnis

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

[1] Tautsching, A./Fröch, G./Mösl, M./Gächter, W.: *Building Information Modeling – Übersicht über Technologie und Arbeitsmethodik mit Praxisbeispielen*. In: Bergmeister, K./Fingerloos, F./Wörner, J.: *Betonkalender 2018, Band 1*. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2018.

[2] *Stufenplan Digitales Planen und Bauen: Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken*. Online verfügbar unter [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft 25.02.2018

[3] Breitenberger, M./Kreutz, J./Braml, T.: *Effizientes BIM für die Planung von Infrastrukturmaßnahmen*. In: *Beton- und Stahlbetonbau*. 113. Jahrgang, Heft 1, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2018.

[4] Nöldgen, M.: *BIM im Brücken- und Ingenieurbau. Digitale Bauwerksmodelle mit NX 10, 3D-Konstruktion, Datenintegration und FE-Simulation*. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2016.



## Autorin

Frau Christine Sander, geboren am 26.08.1989 in Kassel

- |                 |  |
|-----------------|--|
| 09/2010-07/2014 | Fachhochschule Münster<br>Bachelor-Studium Bauingenieurwesen<br>Vertiefung Konstruktiver Ingenieurbau<br>Abschluss Bachelor of Engineering |
| 10/2014-02/2018 | Hochschule München<br>Master-Studium Bauingenieurwesen<br>Allgemeiner Ingenieurbau   |
| 10/2014 - heute | ilp <sup>2</sup> Ingenieure GmbH & Co. KG, München<br>Projektingenieurin in Vollzeit   |

## Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät Bauingenieurwesen der OTH Regensburg im Fachbereich Baubetrieb bei Prof. Dipl.-Ing. Klaus Hager.

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.**

# TRAGGERÜSTE IM KONVENTIONELLEN HOCHBAU

## Bachelorarbeit

*Daniel Wandelt*

Traggerüste spielen in der Bauausführung eine – im wahrsten Sinne des Wortes – „tragende“ Rolle. Allerdings finden sie im Zuge der Ausschreibung und häufig auch während der Bauausführung immer noch zu wenig Beachtung.

Es ist daher (insbesondere auch im Hinblick auf immer anspruchsvollere Bauvorhaben) nicht zuletzt für mittelständische Bauunternehmen entscheidend, sich mit der Materie eingehend auseinanderzusetzen, um immer wieder auftretenden Streitfällen bestenfalls von vornherein vorzubeugen.

Die vorliegende Bachelorarbeit betrachtet deshalb das o.g. Thema von der baubetrieblichen Seite. Dabei wurden zunächst die technischen Hintergründe (Definition und Aufgliederung) und davon ausgehend die vertragsrechtlichen Aspekte (Vergütungsansprüche etc.) untersucht und erläutert. In einem dritten Teil wurden - in enger Zusammenarbeit mit der betreuenden Baufirma - gängige Argumentationsketten in Streitfragen auf ihre Stichhaltigkeit überprüft und gegebenenfalls Korrekturen und Gegenargumente vorgeschlagen.

**Keywords:** Traggerüste, Bemessungsklassen, DIN EN 12812, Hilfsgründungen, VOB, besondere Leistungen, ATV DIN 18331

## 1. Definition und Einteilung

### 1.1 Allgemeines

Traggerüste sind in der DIN 12812 geregelt. Diese unterscheidet die drei folgenden Verwendungszwecke:

- *um die durch den frisch eingebauten Beton erzeugten Lasten so lange aufzunehmen, bis die Konstruktion selbst eine ausreichende Tragfähigkeit erreicht hat*
- *um die Lasten von Bauteilen, Anlagen und Ausrüstung, die aus dem Aufbau, der Instandhaltung, der Änderung oder dem*

*Entfernen von Gebäuden oder anderen Bauwerken resultieren, aufzunehmen*

- *zusätzlich als Unterstützungs-konstruktion zur zeitweiligen Lagerung von Baustoffen, Bauteilen und Ausrüstung*

Wann immer also temporäre Lasten aus Bauteilen abgetragen werden müssen, kommen Traggerüste zum Einsatz. Sie bilden die vorübergehend notwendige Unterstützung.

## 1.2 Bemessungsklassen

Die Einteilung der Traggerüste erfolgt in die Bemessungsklassen A und B.

Die Bemessungsklasse A kann für einfache Fälle angewendet werden. Hierfür müssen zwingend die folgenden vier Bedingungen (vgl. DIN 12812) eingehalten werden:

- a) die Querschnittsfläche der Deckenplatten darf  $0,3\text{m}^2$  je Meter Breite nicht überschreiten
- b) die Querschnittsfläche der Träger darf  $0,5\text{m}^2$  nicht überschreiten
- c) die lichte Spannweite der Träger und Deckenplatten darf  $6,0\text{m}$  nicht überschreiten
- d) die Höhe bis zur Unterseite des zu errichtenden Bauteils muss weniger als  $3,5\text{m}$  betragen

Die Bemessungsklasse A stellt quasi einen „Bestandsschutz“ für sehr einfach gehaltene Traggerüste dar. Für diese sind keine umfangreichen Bemessungsleistungen erforderlich, da sie der bewährten Praxis entsprechen und sehr gut erprobt sind.

Bei Überschreiten mindestens eines der zuvor genannten Kriterien ist automatisch die Bemessungsklasse B anzuwenden.

Für diese ist nach DIN 12812 „eine vollständige Bemessung auf Grundlage der entsprechenden Eurocodes durchzuführen“.

Die Bemessungsklasse B teilt sich weiterhin auf in die Klassen B1 und B2, zwischen denen der entwerfende Ingenieur wählen kann.

Die „Bemessungsklasse B2 verwendet ein einfacheres Bemessungsverfahren als Bemessungsklasse B1. Durch Berücksichtigung ergänzender Randbedingungen wird sichergestellt, dass die Sicherheitsniveaus der Bemessungsklasse B1 und B2 vergleichbar sind.“ (vgl. DIN 12812)

Die Bemessung nach Bemessungsklasse B1 ist ein genaueres und damit auch aufwendigeres Verfahren, das aber theoretisch zu weniger Materialaufwand führt.

Die Bemessung nach Bemessungsklasse B2 hingegen erfolgt in Form eines vereinfachten Verfahrens. Aufgrund einiger Abstraktionen ist die Berechnung mit geringerem Aufwand verbunden. Eine pauschale Beaufschlagung mit dem Sicherheitsbeiwert 1,15 gewährleistet ein mit der Bemessungsklasse B1 vergleichbares Sicherheitsniveau.

Die Berechnung nach Bemessungsklasse B2 ist häufig das Verfahren der Wahl, da die Bemessung zum einen schneller und einfacher angestellt werden kann und zum anderen der in Klasse B1 theoretisch geringere Materialaufwand in der Praxis kaum zum Tragen kommt.

## 1.3 Materialien und Systeme

Für Traggerüste kommen die verschiedensten Materialien und Systeme zum Einsatz.

Im Hoch- und Ingenieurbau werden vor allem Deckenstützen, Schwerlaststützen, Lasttürme und Rundholzstützen verwendet.

Deckenstützen (landläufig: Spriëße) bestehen aus Stahl oder Aluminium und werden meist für die Unterstützung von Bauteilen mit kurzen bis mittleren Einschalzeiten (Decken und Unterzüge) bis zu einer Höhe von ca. 5,00m wirtschaftlich eingesetzt.

Schwerlaststützen sind die konsequente Weiterentwicklung der Deckenstützen. Sie kommen überall dort zum Einsatz, wo sehr große Lasten (üblicherweise bis ca. 200kN je Stütze) in großen Höhen abgetragen werden müssen. Schwerlaststützen bestehen aus einzelnen Aluminium-Segmenten, die per Hand transportiert und vor Ort zusammengebaut werden können. Sie eignen sich deshalb auch hervorragend für Orte, an denen kein oder nur eingeschränkter Kraneinsatz möglich ist.

Müssen flächige Bauteile in großen Höhen abgestützt werden, kommen oftmals Lasttürme zum Einsatz. Sie werden von den meisten Schalungsherstellern sowie von einigen Gerüsthern angeboten und bestehen meist aus einem Katalog von Einzelteilen, die dann vor Ort zu einem Turm zusammengesetzt werden.

Lasttürme werden typischerweise bis zu einer Höhe von ca. 15m eingesetzt und können Lasten von bis zu 97kN je Stiel abtragen.

Rundholzstützen kommen überall dort zum Einsatz, wo große Lasten über sehr lange Zeiträume abgetragen werden müssen (primär bei Hilfsgründungsmaßnahmen). Sie sind abhängig von der Vorhaltdauer eine günstige Alternative zu Schwerlast- oder Deckenstützen, besonders wenn diese angemietet werden müssten.

## 2. Ausschreibung und Vergütung von Traggerüsten

### 2.1 Traggerüste der Schalung

Seit dem Erscheinen des Ergänzungsbandes von 2005 sind Traggerüste explizit in der VOB genannt. Seitdem wurde deren besondere Bedeutung nach und nach weiter eingearbeitet.

Die VOB/C legt in der ATV DIN 18299 in Abschnitt 0.2.6. unter anderem fest, dass in der Leistungsbeschreibung nach den Erfordernissen des Einzelfalles „besondere Anforderungen für das Auf- und Abbauen sowie Vorhalten von Gerüsten“ anzugeben sind.

In der ATV DIN 18331 (Betonarbeiten) ist folgendes festgehalten:

*4.1 Nebenleistungen sind ergänzend zur ATV DIN 18299, Abschnitt 4.1, insbesondere:*

*4.1.2 Auf-, Um- und Abbauen sowie Vorhalten der Arbeits- und Schutzgerüste sowie Traggerüste der Bemessungsklasse A nach DIN EN 12812, soweit diese Gerüste für die eigene Leistung notwendig sind.*

*4.2 Besondere Leistungen sind ergänzend zur ATV DIN 18299, Abschnitt 4.2, z.B.:*

*4.2.6 Leistungen, die über Abschnitt 4.1.2 hinausgehen, z.B. Traggerüste für*

*– Deckenplatten,  $\geq 0,3$  m<sup>2</sup> Querschnittsfläche je Meter Breite oder*

*– Träger,  $\geq 0,5$  m<sup>2</sup> Querschnittsfläche oder*

*– Bauteile mit lichter Spannweite  $\geq 6,0$  m oder*

*– Bauteile, deren Unterseite über  $\geq 3,50$  m der Aufstellfläche des Traggerüstes liegt.*

Kurz zusammengefasst bedeutet das folgendes: Traggerüste der Bemessungsklasse A sind gemäß Abschnitt 4.1.2 der ATV DIN 18331 Nebenleistungen, die nicht besonders ausgeschrieben und auch nicht separat vergütet werden (müssen).

Traggerüste der Bemessungsklasse B hingegen sind eine besondere Leistung im Sinne des Abschnittes 4.2.6. Diese müssen explizit in der Leistungsbeschreibung genannt werden und es



besteht ein Vergütungsanspruch der ausführenden Firma.

## 2.2 Traggerüste als Hilfsgründungen

Wird ein Traggerüst beispielsweise auf einer bereits vorhandenen Decke aufgebaut, die noch nicht ihre volle Tragfähigkeit erreicht hat bzw. deren Tragfähigkeit für die Lasten aus dem Traggerüst inklusive der Lasten aus dem Betoniervorgang des abzustützens darüber liegenden Bauteils nicht bemessen ist, kann dies dazu führen, dass in den unter dem Traggerüst liegenden Stockwerken weitere Abstützungen erforderlich sind.

Diese Abstützungen sind per Definition ebenfalls Traggerüste und werden im baubetrieblichen Sprachgebrauch häufig als Durchsteifung bzw. Hilfsgründung bezeichnet.

Gemäß Abschnitt 4.2.8 der ATV DIN 18451 (Gerüstarbeiten) ist das Herstellen und Entfernen von Hilfsgründungen eine besondere Leistung, d.h. sie müssen analog zu Traggerüsten der Bemessungsklasse B besonders beschrieben und bei Ausführung vergütet werden.

Die folgende Abbildung zeigt eine schematische Darstellung:

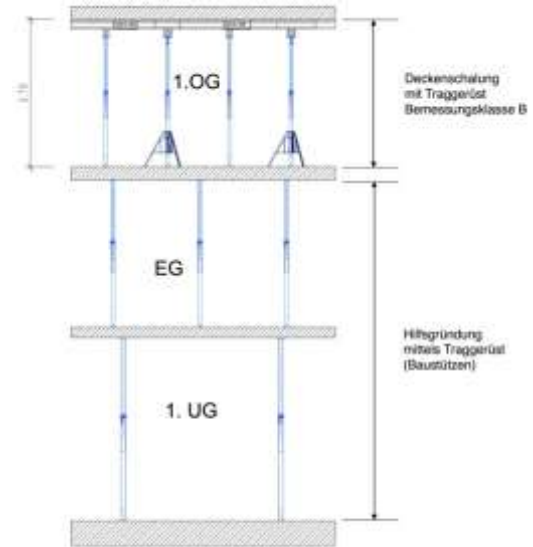


Abb. 1: Schema Traggerüst und Hilfsgründung

## 3. Resümee

Traggerüste sollten bestenfalls schon im Zuge der Planung genau bestimmt und bemessen werden.

In der anschließenden Ausschreibung sollten alle Traggerüste der Bemessungsklasse B idealerweise unter einer eigenen Ordnungszahl mit Nennung aller relevanten Randbedingungen erfasst und ausreichend beschrieben sein.

Dabei dürfen auch eventuell nötige Hilfsgründungsmaßnahmen nicht außer Acht gelassen werden.

Dies dient zum Einen der Verminderung des unternehmerischen Kalkulationsrisikos und zum Anderen wird auf der Bauherrenseite eine Sicherung der Kosten und der Bauzeit geschaffen.

## Literaturverzeichnis

### In der Zusammenfassung verwendete Quellen:

1. DIN EN 12812; Traggerüste – Anforderungen, Bemessung und Entwurf; Deutsche Fassung EN 12812:2008; Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
2. Standpunkt des Bundesverbandes öffentlich bestellter und vereidigter sowie qualifizierter Sachverständiger e.V. „Traggerüste als Hilfsgründung“ 03-2016
3. DIN 18331 (VOB/C), Stand Ausgabe 2002 bis Ausgabe 2016, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
4. DIN 18299 (VOB/C), Stand Ausgabe 2002 bis Ausgabe 2016, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin

### Für die Arbeit sonstige vordergründig verwendete Quellen:

1. DIN EN 12811-1; Temporäre Konstruktionen für Bauwerke – Teil 1: Arbeitsgerüste – Leistungsanforderungen, Entwurf, Konstruktion und Bemessung; Deutsche Fassung EN 12811-1:2003; Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
2. Aufsatz „Traggerüste als Hilfsgründung“, Stand 17.12.2015  
Autor: ö.b.u.v. Sachverständiger Dipl.-Ing. (FH) Michael Bieber
3. Aufsatz „Traggerüste sind gesondert Auszuschreiben!“  
Autorin: Rechtsanwältin und Fachanwältin für Vergaberecht und für Bau- und Architektenrecht Kerstin Irl, LL.M.Eur. baurecht: BauR 11-2016
4. Aufsatz „Irrungen und Wirrungen in der Rechtsprechung des Bundesgerichtshofs zur Auslegung von Bauverträgen“;  
Autor: Vors. Richter am BGH a.D. Prof. Dr. Rolf Kniffka; baurecht: BauR 2015 (Heft 12)
5. DIN 18451 (VOB/C), Stand Ausgabe 2002 bis Ausgabe 2016, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin



### **Autor**

Daniel Wandelt

Studium des Bauingenieurwesens an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt / Dualer Student bei Riedel Bau GmbH & Co. KG von August 2012 bis Mai 2017

Studienabschluss Bachelor of Engineering

Ab Mai 2017 Bauleitung (Rohbau) bei Riedel Bau GmbH & Co. KG

### **Betreuer**

Die Arbeit entstand an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen in Kooperation mit Riedel Bau GmbH & Co. KG

Betreuer der Hochschule: Prof. Dr. sc. Christian Schmidle, Dekan, Lehrgebiet Baubetrieb

Betreuer bei Riedel Bau: Dipl. Ing. (FH) Martin Schlereth, Oberbauleiter

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.**

# UNTERSUCHUNGEN ZUM VERBUNDVERHALTEN VON FRISCHBETONVERBUNDFOLIEN UNTER NACHGESTELLTEN BAUSTELLENBEDINGUNGEN

## Bachelorarbeit

B. Eng. Theresa Weigl

**Welche Auswirkungen hat eine Winterbetonage oder die baustellenübliche Verschmutzung auf den Verbund zwischen Frischbetonverbundfolie und Beton? Verbundfestigkeit und Hinterläufigkeit sind wesentliche Parameter für Zuverlässigkeit und dauerhafte Dichtigkeit von Abdichtungssystemen. In einer Versuchsanordnung unter im Labor nachgestellten Baustellenbedingungen wird der Einfluss der Parameter Frischbetontemperatur und Verschmutzungsgrad der Frischbetonverbundfolie auf die Verbundfestigkeit und Hinterläufigkeit untersucht. Die Versuchsergebnisse liefern keine gesicherten Hinweise über eine mit der Temperatur abnehmende Verbundfestigkeit. Deutlich ist hingegen die Verschlechterung der Verbundfestigkeit mit zunehmender Verschmutzung. Signifikant erweist sich der Unterschied zwischen gemessener Verbundfestigkeit und den aufnehmbaren Spannungen bei der Untersuchung der Hinterläufigkeit bei Einwirkung eines für Tiefgaragenanwendungen üblichen Wasserdrucks.**

**Keywords:** Frischbetonverbundfolie, FBV, WU-Konstruktion, „schwarze Wanne“, Sekundärabdichtung „Weiße Wanne“

## Problemstellung

Bauteile unterhalb der Geländeoberkante stellen seit jeher eine große Herausforderung dar, da sie durch anstehende Bodenfeuchtigkeit, nicht drückendes und/oder drückendes Sickerwasser und Grundwasser beansprucht werden. Diese Belastung erfordert besondere Abdichtungsmaßnahmen. In jüngster Zeit kommt

in diesem Zusammenhang immer häufiger die Frischbetonverbundfolie (FBV) zum Einsatz. Von zentraler Bedeutung bei der Verwendung des Systems sind die Witterungsbedingungen und der Verschmutzungsgrad der Folie bei der Verlegung bzw. bei der Betonage.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Untersuchung, ob der Verschmutzungsgrad der

Frischbetonverbundfolie sowie tiefe Temperaturen, beispielsweise bei einem Einbau im Winter, zu einem relevanten Verlust oder Abfall des Verbundes von Frischbetonverbundfolie und Beton führen.

In diesem Zusammenhang soll die Frischbetonverbundtechnologie hinsichtlich der rechtlichen und baupraktischen Einordnung sowie der Verbundeigenschaften – Verbundfestigkeit und Hinterläufigkeit bei unterschiedlichen Frischbetontemperaturen und Verschmutzungsgraden – untersucht werden.

## Rechtliche und baupraktische Einordnung der Frischbetonverbundtechnologie

Die rechtliche Einordnung der FBV-Technologie ergab, dass sich die Verwendung dieser Abdichtungsvariante in einer regelwerktechnischen Grauzone befindet und zeitnah einer einheitlichen Regelwerksituation bedarf. Dennoch können die Systeme gemäß der jeweiligen allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisse (abP) im Rahmen der Bauweise „Schwarze Wanne“ verwendet werden. Gleiches gilt für die Verwendung der FBV als Sekundärabdichtung im Zusammenspiel mit der Abdichtungsvariante „Weiße Wanne“.

Die Eigenschaften der Frischbetonverbundfolien tragen dazu bei, dass die Systeme als wirtschaftliche Lösungsmöglichkeit zur Sicherstellung einer hohen Nutzungsklasse bei Bauwerken angesehen werden können. Allerdings ermöglicht der Einsatz von Frischbetonverbundfolien keine Kompensation der herkömmlichen WU-Planung. WU-Konstruktion und FBV müssen ein gesamtheitliches Bild ergeben, die Planung hinsichtlich Bewehrungsführung, Bewehrungsart, Verlegerichtung, Übergreifungsstöße und Arbeitsfugen muss für den optimalen Einbau der FBV aufeinander abgestimmt sein. [1]

## Untersuchungen zum Verbundverhalten

Das Verbundverhalten von Frischbetonverbundfolien wurde hinsichtlich Haftung und Hinterläufigkeit in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur und des Verschmutzungsgrads untersucht.

Im Versuch wurde labortechnisch eine praxisähnliche Situation hergestellt, um die Ergebnisse anschließend mit den Angaben des Herstellers zu vergleichen. Die Grundlage der Herstellerangaben stellt dabei die Zulassung der jeweiligen Frischbetonverbundfolie dar.

Exemplarisch wurden für die Analyse zwei unterschiedlich wirkende Frischbetonverbundsysteme gewählt: zum einen die FBV SikaProof – A der Firma Sika, welche einen mechanischen Verbund zum Beton herstellt und zum anderen die Preprufe 300 R des Unternehmens Grace Construction Products Ltd., die einen chemischen Verbund mit dem Beton eingeht. Die je Temperatur zusammengehörenden Probekörper wurden unter den gleichen Bedingungen aus derselben Frischbetoncharge hergestellt.

Im Labor wurden Probekörper mit unterschiedlichen Frischbetontemperaturen sowie unterschiedlicher Verschmutzung hergestellt. Für die Folie wurden drei Verschmutzungsgrade definiert:

- VG 1: unbenutzt, sauber
- VG 2: sandig (200 g/m<sup>2</sup>)
- VG 3: lehmig (600 g/m<sup>2</sup>)

| SikaProof - A         | Verschmutzungsgrad |       |       |
|-----------------------|--------------------|-------|-------|
| Frischbetontemperatur | 1                  | 2     | 3     |
| 20°                   | PK-M1              | PK-M2 | PK-M3 |
| 10°                   | PK-M4              |       | PK-M5 |
| 5°                    | PK-M6              |       | PK-M7 |
| 0°                    | PK-M8              |       | PK-M9 |
| Preprufe 300 R        |                    |       |       |
| Frischbetontemperatur | 1                  | 2     | 3     |
| 20°                   | PK-C1              | PK-C2 | PK-C3 |
| 10°                   | PK-C4              |       | PK-C5 |
| 5°                    | PK-C6              |       | PK-C7 |
| 0°                    | PK-C8              |       | PK-C9 |

Abb. 1: Probekörpermatrix



Abb. 2: Links: Verschmutzungsgrad 2 sandig, Rechts: Verschmutzungsgrad 3 lehmig

In einem ersten Schritt wurde der Verbund hinsichtlich der Oberflächenzugfestigkeit der erhärteten Probekörper mithilfe eines Haftzugprüfgeräts getestet.

Anschließend wurde die Hinterläufigkeit anhand eines eigenen Versuchsaufbaus analysiert. Die Frischbetonverbundtechnologie wird überwiegend bei Bodenplatten von Tiefgaragen verwendet und ist auf eine anstehende Wassersäule von 20 m [2] begrenzt einsetzbar. Der Versuchsaufbau dieser Bachelorarbeit basiert auf der Annahme, dass die FBV bei einer ein- bis zweigeschossigen Tiefgarage verwendet wird und diese somit ca. 6 m in anstehendes Grundwasser eintaucht. Somit stellt sich ein Druck von 6 m Wassersäule oder 0,6 bar ein.

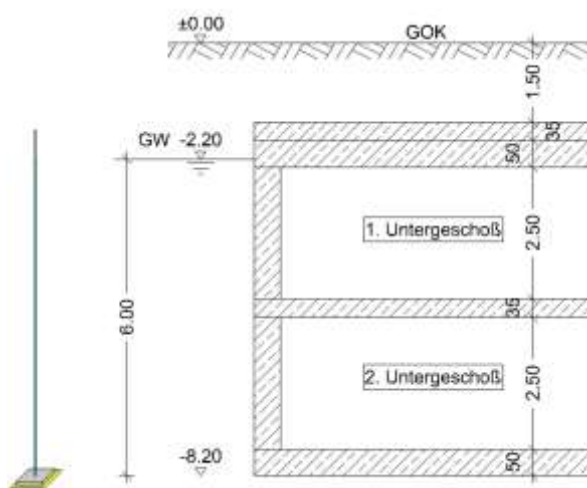


Abb. 3: Darstellung des Versuchsaufbaus zur Hinterläufigkeit (links im Bild) mit schematischer Darstellung der angenommenen Praxissituation (rechts im Bild)

Bei der Betonage wurde zur Untersuchung der Hinterläufigkeit ein Klebpacker (siehe Abb. 2) im Probekörper mittig einbetoniert. Im Bereich des Packers entsteht kein Verbund zwischen der

Frischbetonverbundfolie und dem Beton. Der Packer stellt sozusagen eine Fehlstelle im Verbund dar und kann somit im Hinblick auf eine mögliche Hinterläufigkeit geprüft werden.

Die Prüfkörper wurden über einen an den Packer angeschlossenen Schlauch mit der Wassersäule belastet. Die Auswirkung der Druckbeaufschlagung zeigte sich bei einer eintretenden Hinterläufigkeit durch das Bilden einer Wasserblase zwischen Beton und Frischbetonverbundfolie und wurde in weiteren Untersuchungen genauer betrachtet.



Abb. 4: Probekörper mit Wasserblase nach Druckbeaufschlagung

## Auswertung der Ergebnisse

Die Auswertung der Versuche zum Verbundverhalten hinsichtlich der Haftung ergibt, dass sich die Haftung durch Verschmutzung sowohl bei chemischen als auch bei mechanischen Verbund deutlich verschlechtert, jedoch kann keine Verallgemeinerung bezüglich der Größe der Verbundfestigkeitsminderung getroffen werden. Das Verhalten des Verbundes bezüglich der Frischbetontemperatur unterscheidet sich bei mechanisch und chemisch wirkenden Systemen. Die Beurteilung des Zusammenspiels von Frischbetontemperatur und Verschmutzungsgrad liefert keine eindeutigen Ergebnisse. Im Zusammenhang mit dieser Bewertung muss festgehalten werden, dass Grundlage einer vollständigen Beurteilung identische Grundbedingungen bei der Herstellung der Probekörper sind. Die Betonagecharge der Frischbetontemperatur 0 °C erreichte eine Konsistenz von F5 anstelle von F4, dies muss bei der Zusammenführung der



Ergebnisse beachtet werden. Allgemein ist festzustellen, dass die FBV mit chemischem Verbund höhere Haftzugwerte entwickelt als die Frischbetonverbundfolie mit mechanischem Verbund.

Im Rahmen der Untersuchung des Verbundverhaltens hinsichtlich der Hinterläufigkeit zeigt sich, dass die sich bildende Wasserblase am verschmutzten Probekörper einen größeren Durchmesser entwickelt als am unverschmutzten. Desweiteren lässt sich festhalten, dass keine Verallgemeinerung bezüglich des Unterschieds der Wasserblasendurchmesser hinsichtlich der Verbundart möglich ist. Auch in diesem Zusammenhang muss auf die unterschiedliche Frischbetonkonsistenz der 0 °C Betonagecharge verwiesen werden.

Ein wesentlicher Vorteil bei der Anwendung von FVB ist Lokalisierbarkeit von Fehlstellen. Dies gilt jedoch nur, solange der Verbund ungestört ist. Für die Anwendungspraxis bedeutet dies, dass dem Verbundverhalten große Bedeutung zuzumessen ist und geeignete Maßnahmen zur Gewährleistung der Verbundwirkung getroffen werden müsse.

Aus den Ergebnissen zur Haftung und Hinterläufigkeit in Abhängigkeit des Verschmutzungsgrads können Rückschlüsse für die Anwendung gezogen werden. Optimale Verbundeigenschaften werden bei unverschmutzter FBV erreicht. Dies ist baupraktisch nicht zu erreichen. Daher ist es notwendig, Verschmutzungen auf ein Minimum zu reduzieren. Einfache Maßnahmen wie eine Besenreinigung oder eine Reinigung der FBV mit Wasser vor der Betonage können die Verbundeigenschaften verbessern. Diese Ergebnisse sind auch auf eine Winterbetonage zu übertragen. Bei sauberer Folie werden auch bei geringen Frischbetontemperaturen gute Verbundfestigkeiten erreicht

Bei der Zusammenführung der Ergebnisse von Verbundfestigkeit und Hinterläufigkeit ist

festzustellen, dass sich die Versuchsergebnisse aus der Verbundfestigkeit nicht auf eine Beaufschlagung mit Wasserdruck von „innen“ übertragen lassen. Die dabei zur Ablösung der Folie notwendigen Spannungen (Wasserdruck 0,6 bar) weichen um den Faktor 6 bis 11 ab.

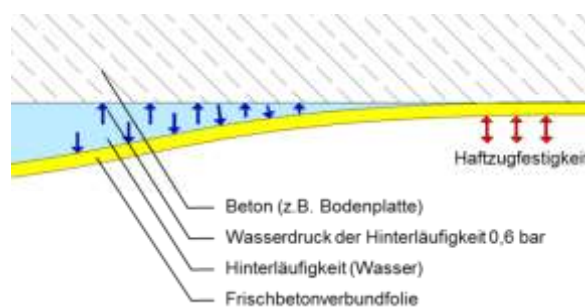


Abb. 5: Wasserdruck und Haftzugfestigkeit

Es wäre zu erwarten, dass aufgrund der gemessenen Haftzugwerte zwischen 0,175 und 0,371 N/mm<sup>2</sup> bei einer Beaufschlagung mit einem Wasserdruck von 0,6 bar und einer entsprechenden Spannung von 0,06 N/mm<sup>2</sup> keinerlei Ablösungen und Blasenbildung durch Hinterläufigkeit auftritt. Ob dieses Ergebnis systematisch zutreffend ist, kann wegen der Probenanzahl und des Versuchsaufbaus im Rahmen dieser Arbeit nicht beurteilt werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen nötig.

Werden diese Ergebnisse durch weitere Untersuchungen bestätigt, müssen daraus Konsequenzen beim Einsatz von Frischbetonverbundsystemen gezogen werden. Da der gewählte Versuchsaufbau die reale Belastungssituation eines gefluteten Bauwerks darstellt, muss beispielsweise sichergestellt werden, dass Baukörper mit FBV im Hochwasserfall nicht von „innen“ geflutet werden, da bereits geringe Wasserdrücke von „innen“ eine Hinterläufigkeit bewirken können.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: DBV Deutscher Beton- und Bautechnik Verein  
DBV-Heft 37 „Frischbetonverbundfolie“, S.59, Berlin, Fassung 2016/8
- [2]: DBV Deutscher Beton- und Bautechnik Verein  
DBV Regionaltagung 2015 „Frischbetonverbundfolie – Hinweise aus Theorie, Forschung und Praxis zu einer neuartigen Technologie“, Dipl. –Ing. Zitzelsberger, T., Vortrag 2a, S.4, München, 2015

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. DBV Deutscher Beton- und Bautechnik Verein  
DBV Regionaltagung 2015 „Frischbetonverbundfolie – Hinweise aus Theorie, Forschung und Praxis zu einer neuartigen Technologie“, München, 2015
2. DBV Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein  
DBV-Heft 37 "Frischbetonverbundfolie", Berlin, Fassung 2016/8
3. Sika (Hrsg.) Produkthandbuch: FBV - Frischbetonverbunddichtungsbahn, Stuttgart, 2011/02



### **Autorin**

Frau Theresa Weigl, geboren am 10.04.1994 in München

|           |  |
|-----------|--|
| seit 2017 | Hochschule München<br>Masterstudium Bauingenieurwesen                      |
| 2017      | Hochschule München<br>Bachelor of Engineering im Bereich Bauingenieurwesen |
| 2012      | Allgemeine Hochschulreife  |

### **Betreuer**

Die Arbeit wurde angefertigt im Fachgebiet Betontechnologie der Hochschule München, Professor Dr. -Ing. Christoph Dauberschmidt

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.**

# ENTWICKLUNG EINES INGENIEURMODELLS FÜR EINE STAHLVERZAHNUNG

## Bachelorarbeit

Sarah Wörner

**Kontakt- und Verbindungselemente bedingen neben Festigkeitsnachweisen die Beurteilung von Reibung, Verschleiß und Materialverhalten. Solch eine Nachweisführung bedarf meist einer aufwendigen FEM-Analyse und Beurteilung der Beständigkeit, was einen hohen Zeitaufwand voraussetzen. In der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine neue Verbindungsart im Bereich des Stahlbetonfertigteilbaus. Es werden Stahl-Zahnleisten als Verbindungselemente zwischen einzelnen Stahlbetonbauteilen eines modular zu errichtenden Bauwerks verwendet. Betrachtet wird die Kraftübertragung zwischen den Stahlzähnen. Mit dem Erstellen eines Berechnungsmodells ist es möglich das Spannungsverhalten in einem Zahnleistenkontakt zu ermitteln. So kann beispielsweise eine Vordimensionierung von Stahlzahnleisten ohne computerunterstützte Software durchgeführt werden, was in der Baupraxis die Entwurfsplanungsphase zeitlich verkürzt.**

**Keywords:** Zahnleiste, Kontaktmechanik, Kontaktspannungen, Ingenieurmodell, Stahlbetonfertigteile

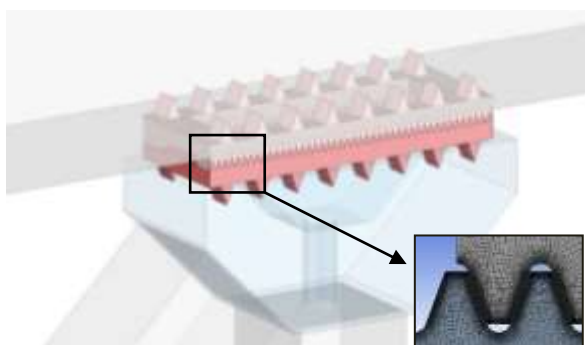


Abb. 1: Darstellung der Stahlbetonfertigteil-Verbindung und Stahl-/Stahl-Verzahnung.

## Ziel und Grundlagen

Im Rahmen eines hochschulinternen Forschungsprojektes zur Entwicklung eines modularen

Fachwerkträgers aus Stahlbetonfertigteilen (siehe. Abb.1) dienen Zahnleistenpaare als Verbindungsmittel zwischen den einzelnen Fachwerkstreben. Die Stahleinbauteile befinden sich an den beiden Verbindungsflächen der Betonfertigteile. Die Verbindungselemente besitzen auf der Betonseite eine große Stahlverzahnung um die Kräfte aus dem Betonbauteil in das Stahleinbauteil einzuleiten. Auf der gegenüberliegenden Seite besitzt das Stahleinbauteil eine kleine Stahlverzahnung, mit der die Kräfte von einem Stahleinbauteil zum Anderen übertragen werden. Beide Fertigteillemente werden an der Verzahnung

aneinandergesetzt und über eine Gewindestange fixiert. Diese innovative modulare Verbindung ist in vielfältigen Anschlusssituationen im Stahlbetonfertigteiltbau einsetzbar und lässt eine trockene Fügung der Fertigteilelemente zu.

Im modernen Bauwesen ist die Kontaktmechanik eine grundlegende ingenieurwissenschaftliche Aufgabe. Sie behandelt das mechanische Verhalten zwischen zweier, sich berührender Körper unter statischen und dynamischen Einwirkungen und findet ihre Anwendung bei der Erstellung von technischen Konstruktionen.

Bereits in der Entwurfsphase eines Bauprojektes sind grundlegende Beanspruchungs- und Einwirkungswerte notwendig, um die Dimensionen von Bauteilen festzulegen. Im Allgemeinen greift man an dieser Stelle zu Erfahrungswerten bzw. Grenzwerttabellen für eine ausreichend genaue Vordimensionierung. Ziel dieser Arbeit ist es, ein analytisches Ingenieurmodell aufzustellen das als Hilfsmittel einer Vordimensionierung von Zahnleisten dient und so einen Aufschluss über die Spannungsverhältnisse in der Stahlverzahnung gibt. Für die Baupraxis soll es so möglich sein, eine Festlegung des geeigneten Werkstoffes, sowie die Maße der Verbindung seinen Beanspruchungen anzupassen, ohne vorab zeitintensive FEM-Modellierungen durchführen zu müssen. Auf Basis der Normalkontakttheorie wird ein entsprechendes Berechnungsmodell entwickelt, das die Spannungswerte in den Zahnkontakten unter elastischen Materialverhältnissen bestimmt.

### Lastfluss in der Zahnleiste

Um Auskunft über einen Spannungszustand in einer Zahnverbindung zu erhalten, muss die angreifende Kraft am Ort des Zahnkontakts bekannt sein. Das Kräfteverhältnis in der Zahnleiste wird anhand eines hypothetischen Lastflusses aufgestellt. Durch die Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Kraft auf die Anzahl der Zähne, erfährt jeder Zahn die gleiche Beanspruchung. Aufgrund von Umlenkkräften in der Verzahnung, stellt sich ein s-förmiger

Kräfteverlauf ein, wie in Abb.2 zu sehen ist. Die Situation des Kraftangriffs an den Zahnflanken beschreibt sich als einfaches statisches System, was erlaubt, die Reaktionskräfte durch das Aufstellen eines Momentengleichgewichts zu bestimmen.

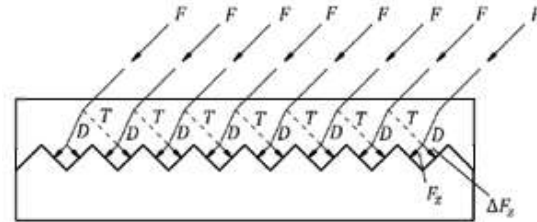


Abb. 2: S-förmiger Kraftverlauf in der Zahnleiste

### Simulationsergebnisse

Mit Hilfe den jetzt bekannten Kräften an den Zahnflanken, kann eine Normalspannungsverteilung  $\sigma = \frac{F}{A}$  aufgestellt werden. Diese erzeugt jedoch nur einen über den Zahnkontakt gemittelten Spannungswert. Spannungsspitzen in der Zahnflanke werden demnach nicht berücksichtigt. Hinsichtlich dieser Problematik ist eine genaue Untersuchung der Spannungszustände an den Zahnflanken notwendig, um ein realitätsgetreues Spannungsmodell entwickeln zu können. In einer Parameterstudie wurden Untersuchungen von unterschiedlichen FEM-Modellen der Zahnleisten aufgestellt, die es möglich machten, die Berücksichtigung der Spannungsdifferenzen auf das zu entwickelnde Ingenieurmodell zu übertragen. Hierfür wurde das Simulationsprogramm ANSYS Workbench 16.0 verwendet (Abb. 6). Damit konnte das durch den Kontakt geometrisch nichtlineare Verhalten abgebildet werden.

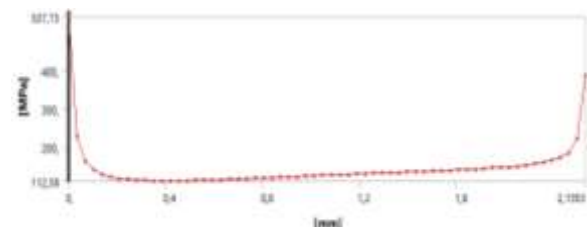


Abb. 3: Parabelförmiger Spannungsverlauf über die Zahnflanke

Es verdeutlichte, dass sich die Spannungen unter einem gleichförmigen Verlauf über die gesamte Zahnleiste verteilen. Demzufolge wurde

eine prozentuale Verteilung der Spannungen über Zahnflankenbereiche aufgestellt. Gleichermaßen ist auch der Spannungszustand am einzelnen Zahnkontakt als Graph dargestellt worden (siehe Abb. 3).

Die Spannungsspitzen im Zahngrund und am Zahnkopf sind, aufgrund der unterschiedlich gekrümmten Zahnoberflächen, auf die sogenannten Hertz'schen Pressungen zurückzuführen. Weiterführende Untersuchungen haben dennoch gezeigt, dass sich diese Belastungen nicht 1:1 mit der Methode nach Heinrich Hertz berechnen lassen. Eine solche Berechnung der Kontaktprobleme ist stark von der Form der Berührung abhängig und führt zu 30-fach höheren Werten, als die Spannungswerte der ANSYS-Simulationen.

Durch das Anlegen von Trendkurven in den drei maßgebenden Bereichen des Spannungsverlaufes ist eine Berücksichtigung der seitlichen Spannungsspitzen möglich (Abb. 4). Das Steigungsverhalten dieser Geraden gibt demnach einen Aufschluss über die Spannungskonzentrationen im Zahnkontakt. Unter diesem Ansatz können die Spannungsspitzen im Ingenieurmodell berücksichtigt werden.

### Entwicklung des Ingenieurmodells

Die vorausgehende Parameterstudie hat gezeigt, dass das Spannungsverhalten in der Zahnleiste durch geometrische und mechanische Abhängigkeiten beeinflussbar ist. Um den hypothetischen Kraftfluss in der Zahnleiste in realitätsnahe Spannungsverläufe zu überführen, werden die in der Studie aufgestellten prozentualen Verteilungen der Spannungen auf das analytische Modell übertragen.

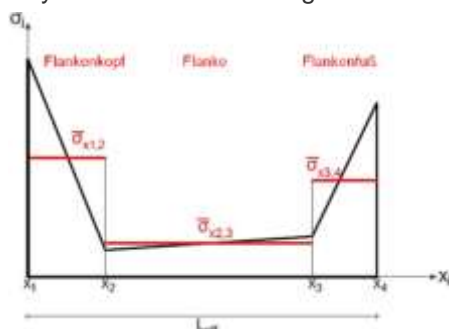


Abb. 4: Spannungsbereiche über die Zahnflanke

Die seitlichen Spannungswerte sind durch das Steigungsverhältnis der Trendkurven berücksichtigt. Die unter dieser linear steigenden Gerade, verlaufenden Spannungsf lächen bilden die Form eines Trapezes (Abb.5). Die weitere Herangehensweise zur analytischen Berechnung der Kontaktspannungen, basiert auf den mathematischen Disziplinen der Analysis. Es folgt das Ergebnis dieser Spannungsformeln:

$$\sigma_1 = \frac{F_{z,i}}{x \cdot b} - \frac{1}{2} \cdot m \cdot x$$

$$\bar{\sigma}_{x_1-x_2} = \left( \frac{1}{2} \cdot m \cdot x_2^2 + t \cdot x_2 - \left( \frac{1}{2} \cdot m \cdot x_1^2 + t \cdot a \right) \right) \cdot \frac{1}{x_2 - x_1}$$

Mit den beiden hergeleiteten Gleichungen kann das Spannungsverhältnis in Stahlverzahnungen dargestellt werden. Demnach ist es möglich, einzelne Spannungswerte  $\sigma_1$  oder ein gemittelttes Spannungsaufkommen  $\sigma_{x_1-x_2}$ , in einen selbst definierten Bereich, zu bestimmen. Als Eingangsgrößen definieren sich die geometrischen Zahnparameter, das Steigungsverhalten  $m$  der Spannungen im Kontaktbereich und die einwirkende Kraft  $F_{z,i}$ , die durch eine prozentuale Aufteilungen im Kraftfluss realisiert wird.

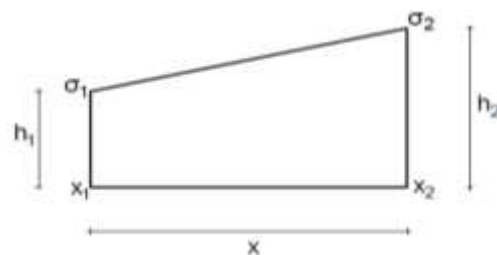


Abb. 5: Schematische Darstellung der Spannungsfläche

Um das Berechnen nach dieser analytischen Vorgehensweise zu vereinfachen, ist zusätzlich eine Tabellenkalkulation mit dem Programm Microsoft Office Excel 2007 erstellt worden. Einige Zeilen in den Berechnungstabellen erfordern eine manuelle Eingabe der prozentualen Spannungsverteilungen sowie das Steigungsverhältnis. Diese Eingangsgrößen gehen aus den Ergebnissen der Parameterstudie einher. Demnach konnte das Auftreten der Spannungen bei geänderten Eingangswerten



und somit deren Unterschiede dargestellt werden. Die Spannungsverteilungen und Geradengleichungen in den einzelnen Zahnflanken fallen nicht in jeder Simulation gleich aus, was die Anwendung in Bezug auf die analytische Berechnung der Spannungen beeinträchtigt. Ziel der Parameterstudie war es, allgemeine Ausgangswerte zu erstellen, die das Beanspruchungsverhalten in der Zahnleiste so beeinflussen, dass das Ingenieurmodell auf unterschiedliche Zahnmodelle übertragen werden kann.

### Problematik und verbesserter Lösungsansatz

Auf Basis von weiteren Untersuchungen ist festgestellt worden, dass der analytische Ansatz stark vom einwirkenden Kraftverhältnis, sowie dem Kraftneigungswinkel abhängt. Greift eine Kraft mit geringem Wert an, verfälscht die resultierende flache Steigung der Trendkurven die Spannungsergebnisse. Dieser systematische Fehler wurde durch das Erstellen eines verbesserten Lösungsansatzes behoben. Hierfür wurden weitere Simulationsmodelle, die die beiden Abhängigkeiten Kraft und Winkel darstellen sollen, generiert und anschließend das Spannungsverhalten intensiv analysiert.

Das Steigungsverhältnis in Abhängigkeit des Lastneigungswinkels verläuft in einer Parabelform. Demnach kann die Winkelabhängigkeit durch eine quadratische Gleichung beschrieben werden. Durch eine durchgeführte Polynomregression wurden die einzelnen Koeffizienten des Graphen bestimmt. Die Spannung an der Zahnflanke steigt linear mit der angreifenden Kraftkomponente an. Somit wird diese Abhängigkeit als Geradengleichung dargestellt.

Aus diesen Ansätzen und einem, aus den Untersuchungen resultierenden, Bezugspunkt wurde eine erweiterte Spannungsformel entwickelt.

$$\sigma_x = (x - x_W) \cdot (a \cdot \beta^2 + b \cdot \beta + c) + m_F \cdot F_{Res} + t_F$$

Das Ergebnis der Herleitung beschreibt eine Spannung  $\sigma_x$  an einer Stelle  $x$ , die sich durch das Zusammenwirken der Resultierenden Kraft  $F_{Res}$  und dem entsprechenden Lastwinkel  $\beta$  einstellt. Die Eingangsgrößen entsprechen der Kraft  $F_{Res}$  pro Zahn, dem Lastangriff  $\beta$  und der Stelle  $x$  über die Zahnflanke. Die Koeffizienten  $m_F$  und  $t_F$  beschreiben das Steigungsverhalten des Spannungsverlaufes über den Zahnflankenbereich. Damit kann der planende Ingenieur bei bekannter einwirkender Kraft die Zahnleiste dimensionieren.

### Fazit

Untersuchungen und Vergleiche mit den ANSYS-Ergebnissen haben gezeigt, dass diese analytische Herangehensweisen zur Bestimmung der Spannungen, ausreichend genaue Lösungen für eine Vordimensionierung sowie für Festigkeitsberechnungen solcher Zahnleisten ausgeben. Unter Verwendung des Lösungsansatzes, errechnen sich Spannungsergebnisse mit einer geringen Abweichung zu den ausgehenden FEM-Werten. Somit ist es in zukünftiger Anwendung von modularen Fachwerkträgern möglich, schon in der Entwurfsplanung die Beanspruchungen in Zahnleistenpaaren ohne großen Aufwand einer Finite-Elemente-Simulation zu bestimmen und diese Werte für eine Dimensionierung zu verwenden.

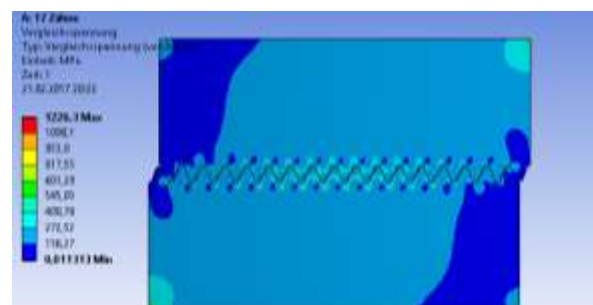


Abb. 6: Simulation eines Zahnleistenpaares in ANSYS Workbench

## Literaturverzeichnis

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Popov V.: Kontaktmechanik und Reibung: Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik, 2016 – Springer Vieweg; 3. Auflage
2. Hofmann, K.: Kraftübertragung mit Zahnleisten zwischen modularen Bauteilen in Stahlbeton, unveröffentlichte Bachelorarbeit, Hochschule Coburg, 2015
3. Schmid, V.: Hochbelastete Verbindungen mit Zahnleisten in Hybridtragwerken aus Konstruktionsbeton und Stahl, 2000 – Grauer, Ullrich



### **Autorin**

Frau Sarah Wörner, geboren am 13. Oktober 1994 in Schweinfurt

seit 2017 Masterstudiengang Bauingenieurwesen, Schwerpunkt Konstruktiver Ingenieurbau an der  
Fachhochschule Erfurt

2017 Bachelor of Engineering (B.Eng.) Allgemeines Bauingenieurwesen  
an der Hochschule Coburg

2013 Fachhochschulreife

### **Betreuer**

Die Arbeit wurde angefertigt an der Hochschule Coburg, Studiengang Bauingenieurwesen bei  
Prof. Dr. H. Falter

Betreuer: J. Schmidt M.Sc

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet**