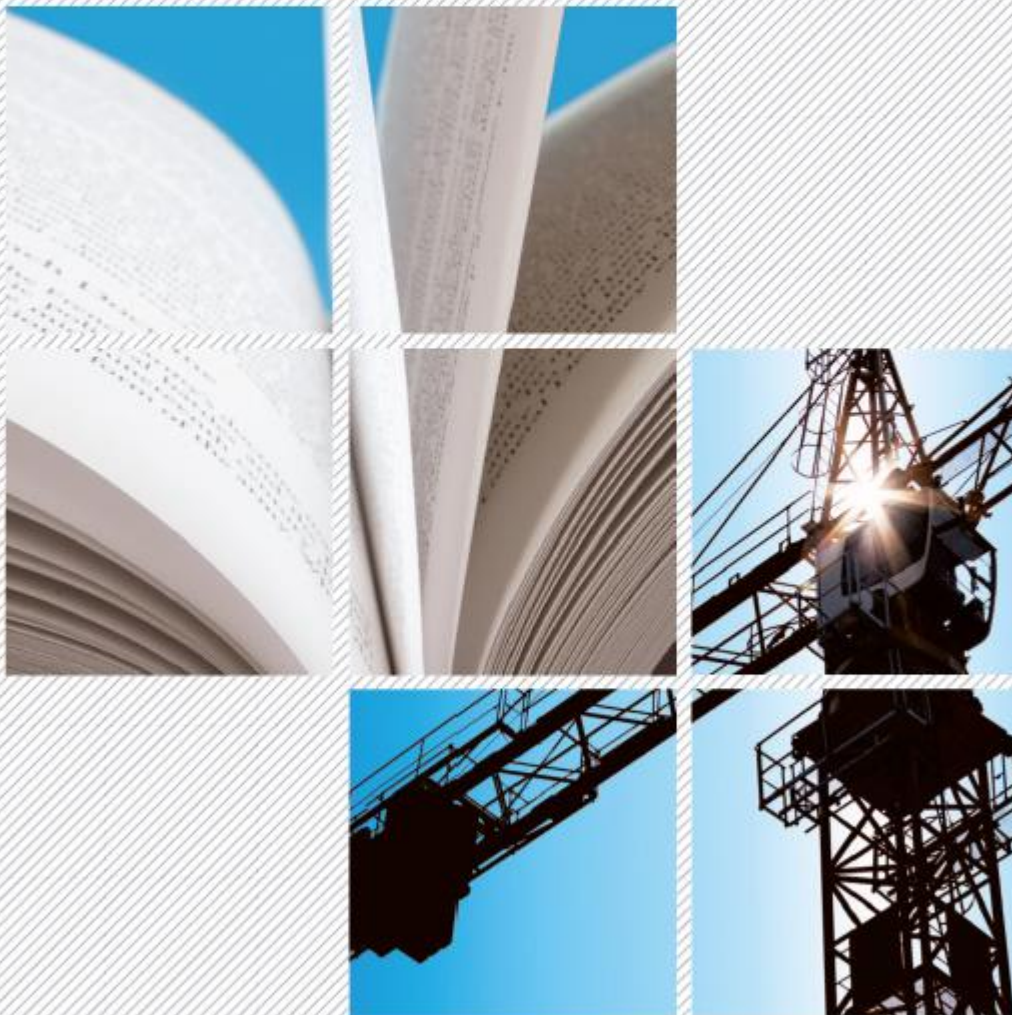




DAS
BAYERISCHE
BAUGEWERBE

HOCHSCHULPREIS

des Bayerischen Baugewerbes



Wettbewerbsbeiträge **2015**

Vorwort

Zum siebten Mal zeichnete Franz-Xaver Peteranderl, 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 2015 wurden insgesamt 15 Bachelor- und Masterarbeiten von den Hochschulen für angewandte Wissenschaften in München und Augsburg, der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm und der Technischen Universität München eingereicht. Neben der hohen Beteiligung war erneut die große Dichte an exzellenten Arbeiten erfreulich. Alle Arbeiten wurden nach der Vorprüfung der Zusammenfassungen in die engere Wahl für die Preisvergabe genommen. Aus diesen 15 Arbeiten hat der Wettbewerbsausschuss unter dem Vorsitz von Herrn Prof. Dr. Ing. Niels Oberbeck entschieden, 12 Arbeiten mit einer Teilnahmeurkunde auszuzeichnen. Drei Arbeiten ragten hervor und machten den Wettbewerb um die drei Geldpreise unter sich aus.

1. Preis, 3.000 Euro Fabian Schiebel

Mit dem 1. Preis wurde Fabian Schiebel für seine Masterarbeit ausgezeichnet. Die Arbeit entstand an der TU München zum Thema „Modell zur Strategieentwicklung und Leistungstiefenoptimierung von Bauunternehmen“.

Der Schwerpunkt liegt auf der Leistungstiefenoptimierung, also der Entscheidung zwischen den möglichen Beschaffungsformen. Als Grundlage werden Theorien und Methoden aus der Volkswirtschaftslehre, Betriebswirtschaftslehre, Betriebswissenschaft, Fertigungstechnik und Verfahrens-/Prozesstechnik sehr umfassend beschrieben, die in diesem Zusammenhang beachtenswert sind. Die später verwendeten Strategiebegriffe werden erläutert und zueinander in Beziehung gesetzt, Werkzeuge werden vorgestellt, die bei der Analyse des Umfelds, der Unternehmensanalyse und der Implementierung der Strategie eingesetzt werden können.

Auf dieser Grundlage wird ein Modell zur Strategieentwicklung in sechs Einzelschritten hergeleitet und am Beispiel der Schiebel Bauunternehmung GmbH eingesetzt:

1. Vision und Unternehmensleitbild werden festgelegt und daraus quantitativ messbare Unternehmensziele abgeleitet.
2. Analyse des Umfelds auf der Ebene des Makroumfelds, der Branche und des Marktes mit Hilfe der PESTEL Analyse und das Entwerfen von möglichen Zukunftsszenarien. Auf Branchenebene werden die Wettbewerbskräfte nach Porter analysiert und eine dynamische Branchenstrukturanalyse erstellt.

Zur Beurteilung des Marktes wird das Mikroumfeld unter die Lupe genommen und das Marktvolumen bestimmt.

3. Identifizierung der strategischen Geschäftsfelder und strategischen Geschäftseinheiten und deren Anteil an Umsatz, EBIT und Beitrag zum Ergebnis.
4. Benchmarking zur Enthüllung von Verbesserungspotentialen und SWOT-Analyse zur Generierung von Strategiealternativen. Zur Entscheidung für eine Strategie wird eine Nutzwertanalyse herangezogen, mit der sowohl quantitative als auch qualitative Kriterien berücksichtigt werden können.
5. Herunterbrechen der Strategie für die Funktionsbereiche Produktion, Kooperation und Beschaffung, Marketing, Forschung und Entwicklung, Finanzierung und Personal unter Berücksichtigung der Methode zur Optimierung der Leistungstiefe.
6. Entwicklung einer Balanced Scorecard zur Implementierung und Kontrolle der Strategie.

Sein Fazit für die Strategie der Fa. Schiebel aus den zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen:

- Konzentration auf die Kernkompetenzen und diejenigen Geschäftstätigkeiten bei denen man sich vom Wettbewerb abheben kann.
- Keine alleinige Betrachtung von Rentabilitätskennzahlen zur Optimierung der Leistungstiefe.
- Festlegen einer Zukunftsvision für das Bauunternehmen.
- Mitarbeiterzufriedenheit im Blick halten.
- Kooperation mit Partnerunternehmen auf Augenhöhe anstreben.

Der Wettbewerbsausschuss würdigte dabei neben einer herausragenden wissenschaftlichen Arbeitsweise den besonderen Nutzen und Vorbildcharakter, den diese Arbeit für die Betriebe des Bayerischen Baugewerbes hat.

2. Preis, 2.000 Euro **Christopher Fiedler**

Den 2. Preis erhielt Herr Christopher Fiedler für seine Masterarbeit zum Thema „Optimierung von gitterträgerbewehrten Balkendecken mit Zwischenbauteilen durch Vorspannung“.

In der Arbeit wird der gitterträgerbewehrte Deckenträger durch die zusätzliche Aufbringung einer Vorspannung weiterentwickelt. Dies führt zu erheblichen Vorteilen im Montagezustand, sie können dadurch von etwa zwei auf fünf Meter erhöht werden. Das verbessert die Wirtschaftlichkeit dieses Bauteils erheblich. Neben der konstruktiven Erarbeitung dieser Produktverbesserung werden auch noch die Umsetzung im Fertigteilwerk sowie die Mehrkosten für dieses Bauprodukt im Vergleich zu den erzielbaren höheren Marktpreisen bearbeitet. Der Wettbewerbsausschuss würdigt hiermit die umfassende und sehr marktorientierte Ausarbeitung. Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Massivbau der TU München, Univ. Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer.

3. Preis, 1.000 Euro **Stefan Adler**

Der 3. Preis ging an Stefan Adler, der eine Bachelorarbeit einreichte, die sich mit der „Optimierung einer Bohrpfahlwand durch vergleichende Berechnungen mit verschiedenen Verfahren“ beschäftigte.

Stefan Adler befasste sich mit einer Baugrubenumschließung aus einer überschnittenen Bohrpfahlwand für das Germanische Nationalmuseum in Nürnberg. Aufgabenstellung war es, die nach Eurocode 7 zulässigen Berechnungsmethoden zum einen mit einer numerischen Berechnung mit der finiten Elementmethode und zum anderen mit einer klassischen Grundbaustatik zu vergleichen.

Es zeigte sich, dass die Ergebnisse durchaus unterschiedlich sind und es stellte sich die Frage, welches Verfahren geeigneter ist mit dem Ergebnis, dass für reine Standsicherheitsberechnungen die klassischen Verfahren ausreichend sind. Für die genauere Prognostizierung des Baugrundes und ggf. zur Minimierung der erforderlichen Bohrpfahlquerschnitte ist jedoch die finite Elementmethode unerlässlich. Die Arbeit wurde angefertigt an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm bei Prof. Dr. Pläßmann.

Auszeichnungen mit einer Teilnahmeurkunde

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

- Lukas Albrecht für seine Bachelor's Thesis an der Technischen Universität München: „Lärmschutz an Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsstrecken“
- Martina Auer für ihre Bachelor's Thesis an der TU München: „Empirische Analyse von Vorfertigungsgrad und Witterungseinfluss bei Bauprojekten“
- Matthias Berger für seine Bachelor's Thesis an der Technischen Universität München: „Erfassung und Auswertung des Personalaufwandes im Bereich der gewerblichen Rohbautätigkeiten“
- Hans Brandl für seine Masterarbeit an der Hochschule Augsburg: „Anwendung der hygrothermischen Gebäudesimulation in der präventiven Konservierung am Beispiel der Kirche St. Margaretha“
- Janosch Dlouhy für seine Masterthesis an der Hochschule Augsburg: „Anwendung und Umsetzung von Lean Management Methoden im Planungs- und Bauprozess der BMW-AG“
- Josef Landler für seine Master's Thesis an der Technischen Universität München: „Beitrag zur Bemessung liegender Verbunddübeln in Ultrahochleistungsbeton (UHPC)“
- Maria Schmidmayer für ihre Bachelorarbeit an der Technischen Universität München: „Grinding - eine lärmarme Betontextur“
- Ferdinand Schülen für seine Bachelorarbeit an der Technischen Universität München: „Untersuchungen zur zeitlich veränderlichen Wasseraufnahme von Recycling-Baustoffen“
- Stefan Sellner für seine Bachelorarbeit an der Hochschule München: „Feinstaubpartikel - Untersuchung und Beurteilung der Luftreinheit in Wohnräumen und an Arbeitsplätzen anhand der Konzentration luftgetragener Partikel“
- Katrin Stahl für ihre Bachelor's Thesis an der Technischen Universität München: „Numerische Simulation von Verbundträgern mit Ultrahochleistungsbeton und Verbunddübeln“
- Daniel Steinbauer für seine Masterarbeit an der Hochschule München: „Numerische Modellierung einer Stützkonstruktion in Hanglage - Verformungsprognose eines Bohrpfahlschachtes unter visko-hypoplastischen Bedingungen“
- Daniel Weger für seine Master's Thesis an der Technischen Universität München: „Einfluss rheologischer Eigenschaften auf die Gradierung von Stahlfasern mithilfe von Carbopol-Gelen“

Fachkolloquium zum Thema „Entwicklung höchstwärmedämmender Massivwand- baustoffe“

Herr Professor Dr. rer. nat. Wolfgang Krcmar, Leiter des Schwerpunkts „Energieeffiziente Werkstoffe“ im Energie Campus Nürnberg und Professor in der Fakultät Werkstofftechnik der Technischen Hochschule Nürnberg-Georg Simon Ohm berichtete in einem interessanten Vortrag über seine jahrzehntelange Erfahrung in der Entwicklung höchstwärmedämmender Massivwandbaustoffe.



Von links nach rechts, oben nach unten:

Franz Xaver Peteranderl, Fabian Schiebel, Daniel Steinbauer, Stefan Adler, Matthias Berger, Hans Brandl, Janosch Dlouhy, Ferdinand Schülen, Christopher Fiedler,
Katrín Stahl, Maria Schmidmayer, Martina Auer, Josef Landler, Stefan Sellner



Präsident Peteranderl im Gespräch mit dem Gastredner Professor Dr. rer. nat. Wolfgang Krcmar (links) und dem Vorsitzenden des Wettbewerbsausschusses Prof. Dr.-Ing. Niels Oberbeck (Mitte)



Präsident Peteranderl gratuliert Fabian Schiebel zum Hochschulpreis des Bayerischen Baugewerbes

Inhaltsverzeichnis

Baugrube für das Tiefdepot des Germanischen Nationalmuseums in Nürnberg Bemessung des Verbaus - Rechenmethoden im Vergleich Stefan Adler, Bachelorarbeit, TH Nürnberg	Seite 9
Lärmschutz an Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsstrecken Lukas Albrecht, Bachelor's Thesis, TU München	Seite 15
Empirische Analyse von Vorfertigungsgrad und Witterungseinfluss bei Bauprojekten Martina Auer, Bachelor's Thesis, TU München	Seite 21
Erfassung und Auswertung des Personalaufwandes im Bereich der gewerblichen Rohbautätigkeiten Matthias Berger, Bachelor's Thesis, TU München	Seite 27
Anwendung der Hygrothermischen Gebäudesimulation in der präventiven Konservierung am Beispiel der Kirche St. Margaretha Hans Brandl, Masterarbeit, Hochschule Augsburg	Seite 33
Anwendung und Umsetzung von Lean Management Methoden im Planungs- und Bauprozess der BMW-AG Janosch Dlouhy, Masterthesis, Hochschule Augsburg	Seite 39
Optimierung von gitterträgerbewehrten Balkendecken mit Zwischenbauteilen durch Vorspannung Christopher Fiedler, Master's Thesis, TU München	Seite 45
Beitrag zur Bemessung liegender Verbunddübeln in Ultrahochleistungsbeton (UHPB) Josef Landler, Master's Thesis, TU München	Seite 51
Modell zur Strategieentwicklung und Leistungstiefenoptimierung von Bauunternehmen Fabian Schiebel, Masterarbeit, TU München	Seite 57
Grinding - eine lärmarme Betontextur Maria Schmidmayer, Bachelorarbeit, TU München	Seite 63
Untersuchungen zur zeitlich veränderlichen Wasseraufnahme von Recycling-Baustoffen Ferdinand Schülen, Bachelorarbeit, TU München	Seite 69
Feinstaubpartikel - Untersuchung und Beurteilung der Luftreinheit in Wohnräumen und an Arbeitsplätzen anhand der Konzentration luftgetragener Partikel Stefan Sellner, Bachelorarbeit, Hochschule München	Seite 75
Numerische Simulation von Verbundträgern mit Ultrahochleistungsbeton und Verbunddübeln Katrin Stahl, Bachelor's Thesis, TU München	Seite 81
Numerische Modellierung einer Stützkonstruktion in Hanglage Daniel Steinbauer, Masterarbeit, Hochschule München	Seite 87
Einfluss rheologischer Eigenschaften auf die Gradierung von Stahlfasern mithilfe von Carbopol-Gelen Daniel Weger, Master's Thesis, TU München	Seite 93

BAUGRUBE FÜR DAS TIEFDEPOT DES GERMANISCHEN NATIONALMUSEUMS IN NÜRNBERG

BEMESSUNG DES VERBAUS – RECHENMETHODEN IM VERGLEICH

Bachelorarbeit im WS 2014/15

Stefan, Adler

Bei der Berechnung von Baugruben stehen heutzutage im Wesentlichen zwei Verfahren zur Auswahl: Entweder man bedient sich der klassischen Grundbaustatik oder man führt eine numerische Berechnung mit der Finite-Elemente-Methode durch.

Beide Verfahren sind nach dem EC 7 zulässig, liefern aber durchaus unterschiedliche Ergebnisse.

Es stellt sich für den Anwender also die Frage, welches Verfahren das für seine Berechnung geeignetere ist. Diese Frage soll in der folgenden Arbeit für das Tiefdepot des Germanischen Nationalmuseums in Nürnberg mit einer Baugrube von über 20 m Tiefe behandelt werden.

Da die klassische Grundbaustatik von einem Versagenszustand im Boden als Belastung ausgeht, der in der Realität ja nie erreicht werden soll, kann durch eine wirklichkeitsnähere Modellierung eventuell wirtschaftlicher bemessen werden.

Keywords: Rechenmethoden Vergleich, Baugrubenwand, Grundbaustatik, Finite Elemente, FEM.

Einleitung

Für die Bemessung einer Baugrubenwand stehen die bewährten Verfahren der klassischen Grundbaustatik oder die Methode der Finiten Elemente (FEM) zur Verfügung

In einer Veröffentlichung der Autoren Hettler, Schanz [7] in der Zeitschrift Bautechnik findet sich folgender Hinweis: „Im Einzelfall muss der Planer prüfen, welches Verfahren angemessen ist.“

Der Planer muss selbst im Voraus entscheiden, welche Methode am besten geeignet ist. Hierzu wurden in den letzten Jahren zahlreiche Empfehlungen veröffentlicht, die im Kapitel 2 „Darstellung des aktuellen Standes der Technik“ zusammengefasst vorgestellt werden.

Für eine Baugrube in Nürnberg mit ca. 21 m Tiefe, einem sehr steifen Verbau aus Bohrpfählen Ø 1,2 m mit drei Aussteifungen und angrenzender Bebauung werden beide Rechenverfahren durchgeführt. Anschließend werden die Ergebnisse gegenübergestellt, um

schließlich zu entscheiden, welches Verfahren hier zur Anwendung kommen sollte.

Wäre mit Hilfe der FEM eine wirtschaftlichere Bemessung möglich, könnte das eine Realisierung von Projekten, die bisher am finanziellen Aufwand scheitern, erleichtern. Letztendlich ist die Verbauwand ein notwendiges, aber vom Bauherrn nicht gewünschtes Produkt.

Darstellung des aktuellen Standes der Technik

Nach den EAN [3] sind die Methoden der klassischen Grundbaustatik das heutzutage überwiegend angewandte Verfahren bei der Berechnung der Standsicherheit von Baugruben. Es können Baugruben von einfachem bis mittlerem Schwierigkeitsgrad, bei denen die Verformungen (Setzungen) im angrenzenden Baugrund nicht berücksichtigt werden müssen, gerechnet werden.

Nachweise der Gebrauchstauglichkeit sind nur unter Ansatz einer Bettung/Federn für die Auflager möglich. Zudem können nur die Verformungen des Verbaus, nicht die des angrenzenden Erdreichs abgeschätzt werden.

Mit der FEM kann jede Art von Baugruben modelliert werden. Da dies aber mit einem hohen Aufwand verbunden ist und besondere Sachkenntnis erfordert, sollte sie erst dort angewandt werden, wo die herkömmlichen Methoden an ihre Grenzen stoßen. Dies ist z.B. für schwierige Untergrundverhältnisse oder eine komplexe Geometrie der Baugrube der Fall.

Für Nachweise der Standsicherheit ist die FEM nur eingeschränkt geeignet, zur Ermittlung von Widerständen im Boden wird die Verwendung der klassischen Verfahren empfohlen.

Für die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit liefert die FEM Heibaum, Herten [5] zufolge deutlich genauere Ergebnisse und ist vielseitiger einsetzbar als herkömmliche Methoden.

Durch verschiedene Vergleichsberechnungen, u.a. von Hettler, Ortiz, Mumme [6], Hock-Berghaus [1] und Mayer [8], konnte belegt

werden, dass die Ergebnisse aus klassischen Berechnungen und die aus Berechnungen mit der FEM unterschiedlich sind. Die Größe dieser Unterschiede variiert jedoch sehr und folgt, keiner eindeutigen Relation. Auch kann nicht generell angegeben werden, welches Verfahren die richtigeren Ergebnisse liefert, beide Rechenmethoden beinhalten Modellvorstellungen, welche die Realität mehr oder weniger gut abbilden.

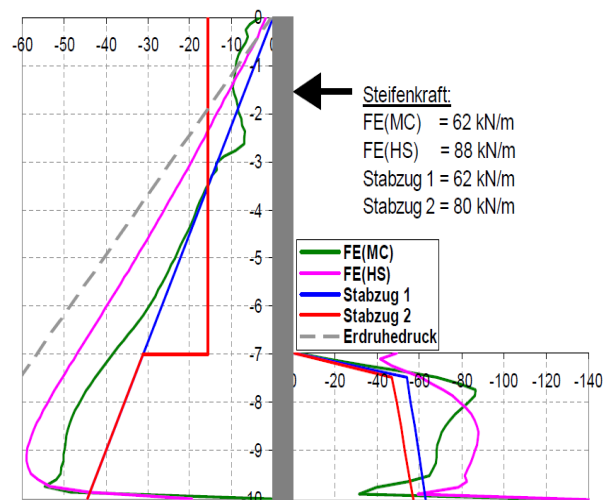


Abb. 1 zeigt die Spannungsverteilung resultierend aus einer Vergleichsberechnung von Mayer [8]

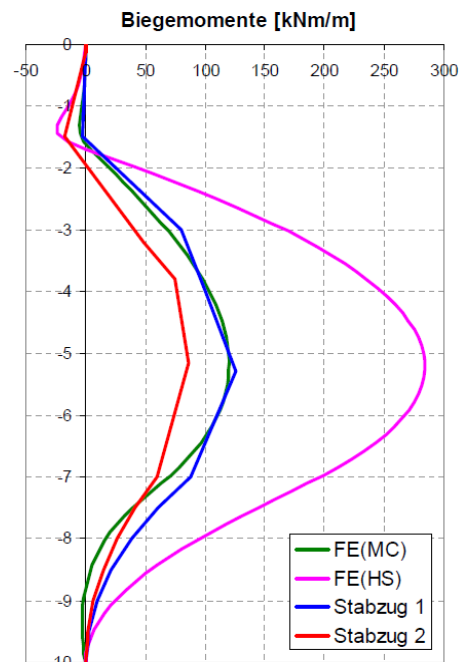


Abb. 2 stellt die zugehörige Verteilung der Biegemomente dar

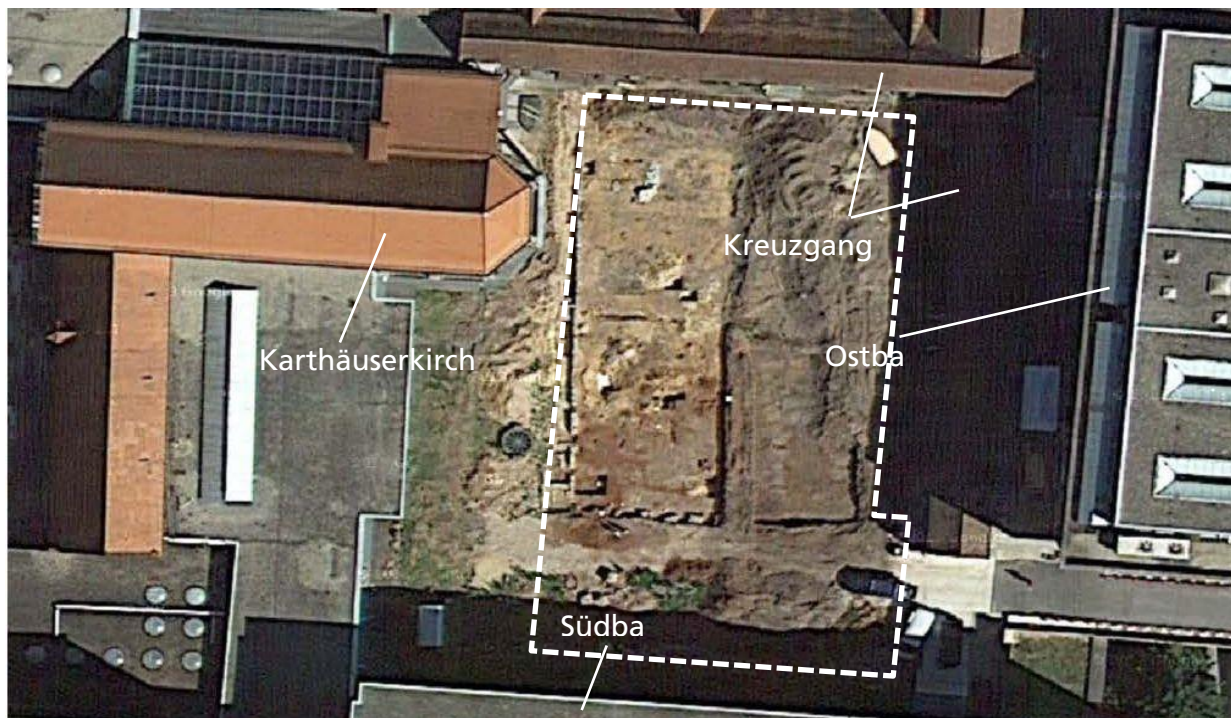


Abb. 3: Grundriss der Baugrube und angrenzende Bebauung, Quelle google maps (Stand 09.09.2014)

Darstellung des Projektes Tiefdepot des GNM in Nürnberg

Die Baugrube für das geplante Tiefdepot wird eine Länge von ca. 50 m und eine Breite von ca. 27 m haben. Die Tiefe beträgt ca. 21 m unter GOK. Die Verbauwand soll aus überschrittenen Bohrpfehlen hergestellt werden, welche durch die Betondecken des Tiefdepots ausgesteift werden (Deckelbauweise). Die angrenzende Bebauung, dargestellt in Abb.3, reicht bis ca. 1 m an den Baugrubenrand heran.

Die Untergrundverhältnisse wurden im Baugrundgutachten vom Grundbauinstitut der TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH dargestellt. Diesem zufolge gliedert sich der Untergrund in 6 Schichten, nämlich ganz oben eine Schicht Auffüllung, dann zwei Schichten quartärer Sande und schließlich drei Schichten aus Keuperfels ab einer Tiefe von ca. 21 m unter GOK. Das Grundwasser steht ab einer Tiefe von ca. 10 m unter GOK an.

Berechnung der Baugrube mit klassischen Methoden

In Anlehnung an die vorhandene Ausführungsstatik der Kästner Ingenieure GmbH

wurde die Baugrube mit dem Programm Verbau der Fides DV-Partner GmbH nachvollzogen.

Die Berechnung wurde in 7 Schnitten verteilt über den Umfang der Baugrube durchgeführt. Dabei wurde der Wandfuß im endgültigen Zustand als horizontal unverschieblich angenommen, die Auflagerreaktion im Fels wurde durch eine Bettung modelliert.

Die charakteristischen Werte für das Biegemoment und die Querkraft in Schnitt 6, welcher sich als der Maßgebende herausstellte, sind in folgender Tabelle dargestellt. Bei der Berechnung wurde stets nach den Vorgaben der EAB [2] vorgegangen.

z [m]	Mk [kNm/m]
0,00	0,00
-1,17	-3,15
-5,60	316,67
-12,50	-2095,95
-22,46	1617,19
-26,05	249,98

In Abb. 4 soll schematisch ein Überblick über den Querschnitt der Baugrube gegeben werden.

Zu erkennen sind 5 Bodenschichten, die Fundamentlasten aus der angrenzenden Bebauung sowie die 3 Aussteifungen durch die Geschossdecken des Tiefdepots.

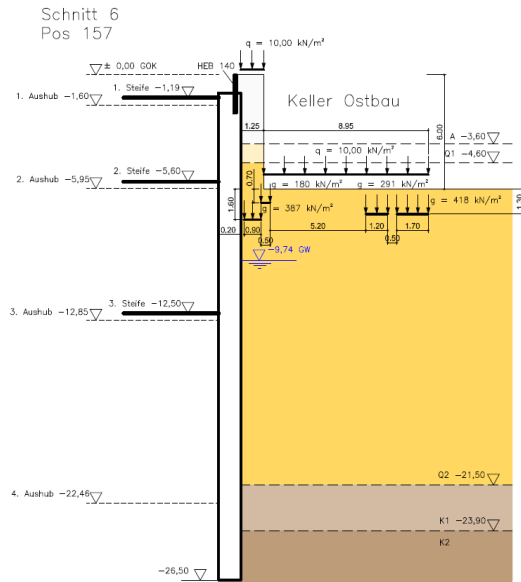


Abb. 4: Schnitt 6 durch die Baugrubenwand

Numerische Berechnung der Baugrube mit der Methode der Finiten Elemente

Die Berechnung für Schnitt 6 wurde zweidimensional mit dem Programm Plaxis 2D AE.01 und nach den Vorgaben der EAN [3] durchgeführt. Als Stoffmodell wurde das hardening soil small-Modell verwendet, da es die Spannungsabhängigkeit der Steifigkeit des Bodens sowie plastische Verformungen berücksichtigt.

Der Kontakt der Bohrpfehlwand zum Untergrund wurde mit Interface-Elementen modelliert. Das FE-Modell ist in Abb. 5 zu sehen.

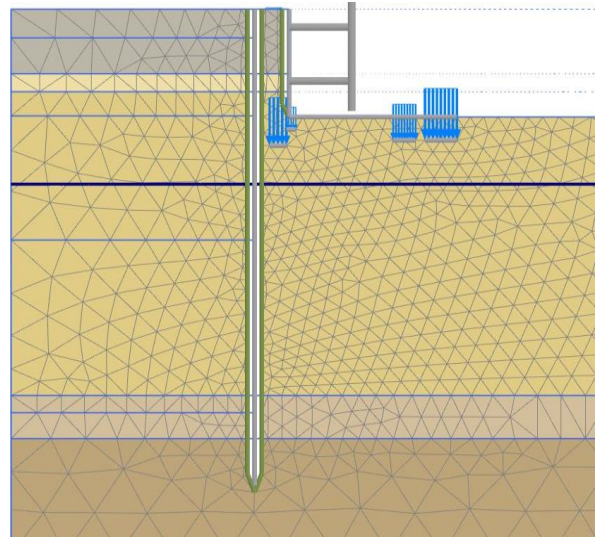


Abb. 5: FE-Modell mit Bohrpfehlwand, Keller des Ostbaus und Fundamentlasten

Es wurden sämtliche Aushub- und Belastungszustände modelliert. Die Verteilung des charakteristischen Biegemomentes ist in folgender Tabelle dargestellt:

Tiefe z [m]	Biegemoment M_k [kNm/m]
-1,19	4,68
-5,60	541,87
-12,50	932,51
-22,46	-504,13
-26,34	10,26

Darüber hinaus wurde die Anfälligkeit des Modells gegenüber angenommenen Parametern mit Hilfe einer Sensitivitätsstudie untersucht.

Vergleich der Ergebnisse

Das maximale Biegemoment auf Höhe der 3. Aussteifung aus der FEM-Berechnung ist mit 932,51 kNm/m etwas halb so groß wie das aus der klassischen Berechnung mit 2095,95 kNm/m.

Demnach könnte die Verbauwand mit der FEM, unter Berücksichtigung der Ergebnisse für eine schlankere Wand, deutlich wirtschaftlicher bemessen werden.

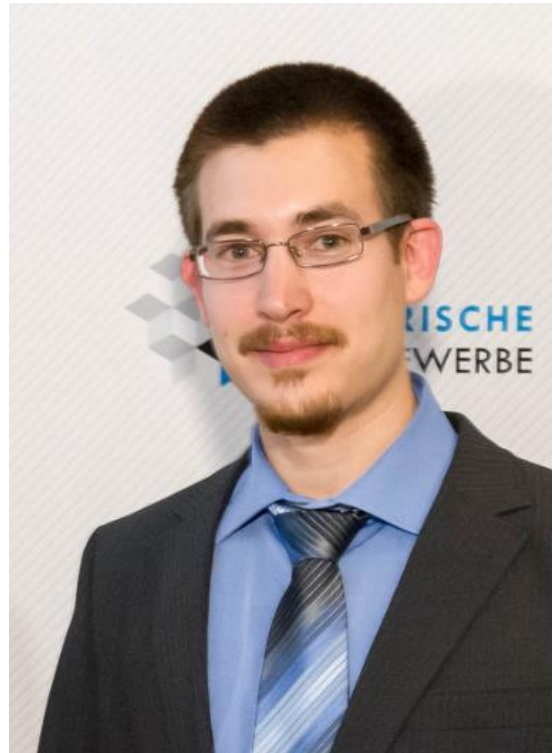
Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Beiträge zum Workshop Numerik in der Geotechnik, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik-AK 1.6, 1997.
- [2] Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., 5. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin 2012.
- [3] Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Abschnitt 1,3 und 4
- [5] Heibaum, Herten: FEM für geotechnische Nachweise nach neuer Normung ?, Bautechnik 84 (2007), Heft 9, S. 627-635, Ernst & Sohn, Berlin.
- [6] Hettler, Ortiz, Mumme: Berechnung von Baugrubenwänden mit verschiedenen Methoden: Trägermodell, nichtlineare Bettung, FEM, Bautechnik 83 (2006), Heft 1, S. 35-45, Ernst & Sohn, Berlin.
- [7] Hettler, Schanz: Zur Anwendung der FEM bei Baugrubenwänden, Bautechnik 85 (2008), Heft 9, S. 603 – 615, Ernst & Sohn, Berlin.
- [8] Mayer: Vortrag zum Workshop „Anwendung der FEM“ in Weimar, 2003.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [4] Grabe, Hettler, Drewsen: Entspricht die Anwendung der FEM in der Geotechnik dem Stand der Technik? Beitrag zum Workshop „Bemessen mit FEM“ in Hamburg, 2007.
- [9] Perau: Nachweis der Standsicherheit von Verbauwänden mit der FEM, Geotechnik 33 (2010), Heft 1, S. 19 – 28, VGE Verlag, Frankfurt.
- [10] Schweiger, Vermeer, Wehnert: Zur Bemessung tiefer Baugruben mit der Finite-Elemente-Methode, Geomechanics and tunneling 2 (2009), S. 333 – 343, Ernst & Sohn, Berlin.
- [11] Weißenbach, Hettler,: Baugruben Berechnungsverfahren, 2. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin 2011.



Autor

Herr Stefan Adler wurde am 12.06.1990 in Nürnberg geboren. Nach der Ausbildung zum Metallbauer (Konstruktionstechnik) von 2005 - 2008 erlangte er an der Rudolf Steiner-Schule Nürnberg 2010 die allgemeine Hochschulreife. Nach dem freiwilligen Wehrdienst bei der Marine in Parow und Rostock von Juli 2010 bis Mai 2011 absolvierte er ab Oktober 2011 das Studium des allgemeinen Bauingenieurwesens an der TH Nürnberg Georg-Simon-Ohm und nach Beendigung des Bachelorstudiums im Februar 2015 das Masterstudium ab März 2015.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der TH Nürnberg Georg-Simon-Ohm, Fakultät Bauingenieurwesen, Prof. Dr.-Ing. B. Pläßmann, Fachgebiet Geotechnik, Labor für Geotechnik.

Die Arbeit wurde mit dem 3. Preis ausgezeichnet.

LÄRMSCHUTZ AN EISENBAHN - HOCHGESCHWINDIGKEITSSTRECKEN

Bachelor's Thesis

Lukas Philipp Albrecht

An Hochgeschwindigkeitsstrecken der Deutschen Bahn gewinnen Lärmschutzwände zunehmend an Bedeutung. In dieser Arbeit werden Konstruktionsprinzipien für Lärmschutzwände nach dem aktuellen Stand der Technik aufgezeigt. Gleichzeitig wird auf negative Einflüsse eingegangen, die bei der Erstellung und dem Betrieb von Lärmschutzwänden zu beachten sind.

Der zweite Teil der Arbeit untersucht einen konkreten Baumangel an Lärmschutzwänden. Die einwandfreie Lagerung der Lärmschutzelemente in den Pfosten erfordert ein hohes Maß an Genauigkeit bei der Erstellung. Da dies nicht immer gegeben ist, gibt die Arbeit Lösungsansätze, um bestehende Schäden sanieren zu können.

Größter Bestandteil der Arbeit ist der Nachweis eines Lärmschutzwandpfostens gegen Ermüdung. Dazu werden das statische System, Belastung und Widerstand entsprechend aktueller Richtlinien und Normen erfasst. Für die Einwirkungen auf die Lärmschutzwand werden neben genormten Belastungen auch reale Messergebnisse herangezogen. Obwohl die realen Belastungen niedriger sind als die allgemein gültigen Lasten aus der Norm, gelingt es nicht, den Pfosten dauerhaft gegen Ermüdung nachzuweisen. Jedoch kann die Betriebsfestigkeit auf eine Lebensdauer von 35 Jahren nachgewiesen werden.

Keywords: Eisenbahn Hochgeschwindigkeitsverkehr, Lärmschutzwand, Ermüdungsnachweis

Aufgabenbeschreibung

Die Bachelor's Thesis „Lärmschutz an Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsstrecken“ entstand in Zusammenarbeit mit der DB Netz AG in Augsburg und dem Lehrstuhl für Verkehrswegebau der TU München. Am Beispiel der Lärmschutzwand an der ICE-Strecke zwischen München und Augsburg wurde die standardisierte, bauliche Lösung der Pfosten-Element-Konstruktion untersucht.

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurde der aktuelle Stand der Technik im Bereich der Lärmschutzwände erfasst. Außerdem wurden Einwirkungen auf die Lebensdauer der Stützpfeiler und der Flächenelemente allgemein erarbeitet. Zu häufigen Schadensfällen wurden in der Arbeit Sanierungsvorschläge entwickelt. Hauptbestandteile der Arbeit sind die Modellierung einer Lärmschutzwand und eine Simulation der Druck-Sog-Belastung anhand von real gemessenen Belastungen im Rahmen eines Nachweises der Ermüdungssicherheit. Dabei wurden Unterschiede zwischen aktuell gültigen Richtlinien und dem Bemessungsverfahren zur Zeit der Erstellung der Lärmschutzwand untersucht. Im Fokus standen dabei dynamische Einwirkungen aus Zugvorbeifahrten mit Hochgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 1).

Methodisches Vorgehen

Die Arbeit wurde von Anfang an mit drei verschiedenen Methoden angefertigt. Der erste Teil, Stand der Technik, stützt sich vor allem auf Literaturrecherchen in Regelwerken der Deutschen Bahn und allgemeinen wissenschaftlichen Texten zum Eisenbahnbau in Deutschland.

Die negativen Auswirkungen auf Lärmschutzwände und Sanierungsmöglichkeiten dazu wurden mit den Verantwortlichen bei der Deutschen Bahn erarbeitet. Dazu zählen die Zusammenfassung der bekannten Schäden und deren Beurteilung, sowie Ursachenforschung. Die Sanierungsvorschläge stammen entweder

von Mitarbeitern der DB und wurden in der Arbeit lediglich wissenschaftlich zusammengefasst und beurteilt oder von mir selbst. Diese Ideen erläutern die Arbeit, es werden Ansätze zur Weiterentwicklung, sowie Vor- und Nachteile aufgeführt.

Der Nachweis eines Lärmschutzwandpfostens gegen Ermüdung im letzten Teil der Arbeit stützt sich auf Richtlinien der Deutschen Bahn, die zusammen mit den gültigen Normen den Rahmen für die Bemessung der Lärmschutzwände bilden. Außerdem wurde ein analytisches Verfahren angewandt, um die Restnutzungsdauer der Pfeiler zu ermitteln.

Stand der Technik - Lärmschutz

Die Eisenbahnstrecke zwischen München und Augsburg wurde in den Jahren 1998 bis 2011 für den modernen Hochgeschwindigkeitsverkehr ausgebaut und mit ortsfestem Lärmschutz versehen. Durch die Erhöhung der Bemessungsgeschwindigkeit auf 230 km/h verbindet der ICE die beiden Städte heute mit einer Fahrzeit von nur 26 Minuten.

Zum Schutz von Umwelt und Anwohner setzt die Deutsche Bahn an viel befahrenen Hochgeschwindigkeitsstrecken auf passiven und aktiven Lärmschutz. Während beim passiven Lärmschutz lärmempfindliche Gebäude in ihrer eigenen Hülle vor dem Eindringen von Schall geschützt werden (z.B. durch schalldichte Fenster und Lüftungsanlagen), schottet der aktive Lärmschutz die Fahrbahn von der Umgebung ab und vermindert somit Lärmemissionen durch den Zugverkehr. Das typische Mittel zum aktiven Lärmschutz sind Lärmschutzwände in Pfosten-Element-Bauweise.

Diese Konstruktion setzt sich aus Stahlpfosten und Lärmschutzelementen zusammen. Stahl-I-Profil-Pfosten (meist HEA, HEB oder HEM Profile) werden mit einem Regelabstand von fünf Metern in Betonfundamenten aufgestellt. Zwischen den Pfeiler werden Lärmschutzpaneele aus Stahlbeton, Holz,

Aluminium oder transparenten Materialien eingebaut.

Die Verbundpaneele aus Beton bestehen aus einer Tragschicht aus Stahlbeton und einer Absorberschicht aus offenporigem, unbewehrtem Beton mit Holzfaserzuschlag.

Daneben können auch Lärmschutzpaneele aus Aluminium verwendet werden. Diese bestehen aus einem gelochten Hohlkasten aus Aluminium, der mit einer schallabsorbierenden Matte aus Mineralwolle gefüllt wird.

Um das Erscheinungsbild von Lärmschutzwänden in Stadtgebieten aufzuwerten werden auch transparente Elemente verwendet. In einen Aluminiumrahmen werden Glasscheiben eingesetzt. Zwar haben transparente Lärmschutzelemente einen höheren architektonischen Wert, aber keine schallabsorbierende Wirkung.

pfosten, mangelhaft produzierte Aluminium- und Betonelemente sowie nicht sachgemäßer Einbau der Elemente im Hinblick auf die Lagerung zwischen den Stahlpfosten.

Bei der Planung von Lärmschutzwänden ist es wichtig, die Breite der Lärmschutzelemente an die Steglänge der Pfosten anzupassen. Nur wenn die Elemente geringfügig schmaler sind als der Steg lang können sie passgenau zwischen die Pfosten eingebaut werden. An der betrachteten Lärmschutzwand wurden einige Schadstellen

ermittelt, an denen die Elemente zu schmal sind und somit zwischen den Flanschen der Pfosten hin und her wackeln können. Das führt zu einer erhöhten Beschädigung der Pfosten aber zum anderen auch zu ungewollter Lärmbelastung bei Zugvorbeifahrten.

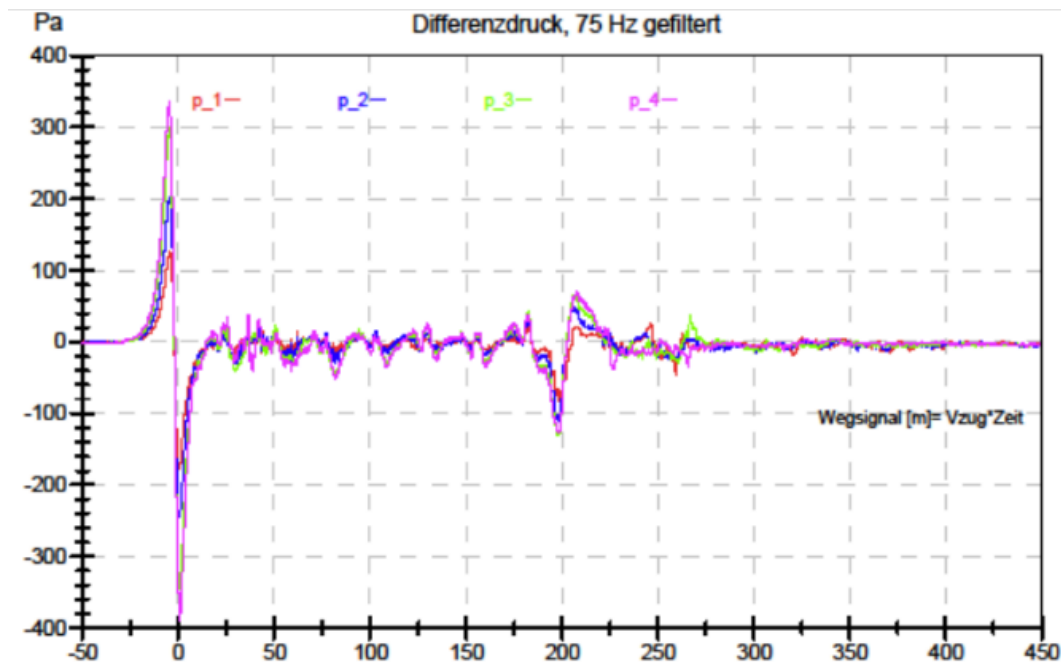


Abbildung 1: Zuginduzierte Druck-Sog Einwirkung auf eine Lärmschutzwand, [1]

Mängel an Lärmschutzwänden

Aufbauend auf den allgemeinen Regeln der Technik gibt die Arbeit eine Übersicht über die häufigsten Mängel, die während der Betriebszeit an der Lärmschutzwand festgestellt wurden. Dazu zählen Korrosion und Ermüdung der Stahl-

Sanierung Elementauflager

Um die unsachgemäße Lagerung der Lärmschutzelemente nach Inbetriebnahme beseitigen zu können werden beispielsweise Elastomerbänder eingebracht, die die Fuge zwischen Element und Flansch ausfüllen. Bei

neuen Produkten werden diese Bänder teilweise bereits standardmäßig eingebaut, da sie in unterschiedlichen Dicken eine flexible Anpassung der Elemente an die Pfosten ermöglichen. Ein nachträglicher Einbau der Bänder ist jedoch nicht einfach realisierbar. Da die Elemente unterschiedlich dick und teilweise in Ihrer Lage verschoben oder verdreht sind müssen Sie vor dem Einbau von Elastomerbändern bewegt werden. Ob eine wirtschaftlich sinnvolle Ausführung möglich ist, kann nur im Einzelfall erprobt werden.

Des Weiteren könnten spezielle Klammern oder Keile mit Federn entwickelt werden, die die Elemente in ihrer Lage fixieren, gleichzeitig aber auch die Aufnahme von dynamischen Belastungen sicherstellen. Im Moment gibt es keine Patentlösung in diese Richtung. In der Bachelorarbeit werden aber einige Möglichkeiten skizziert, die die wichtigsten Anforderungen aufzeigen.

Auch das Einbringen einer Fugenmasse ist eine Sanierungsmöglichkeit. Auch dazu ist im Moment kein perfektes Material bekannt. Da die Masse witterungsbeständig und dauerhaft sein und sowohl dynamische als auch statische Lasten aufnehmen muss, bestehen anderen Zusammensetzung besonders hohe Anforderungen.

Nachweis gegen Ermüdung

Der größte Teil der Arbeit ist der Nachweis eines Lärmschutzwandpfostens gegen Ermüdung. Zum Zeitpunkt der Planung Ende der 90er Jahre waren dynamische Effekte aus Zugvorbeifahrten im Hochgeschwindigkeitsverkehr wenig bekannt. Deshalb wurde die Lärmschutzwand nach dem damaligen Stand der Technik für statische Ersatzlasten ausgelegt. Aus heutiger Betrachtung ist klar, dass die Ersatzlasten dynamische Effekte aus zuginduzierten Druck-Sog-Belastungen auf die Lärmschutzwände unzureichend erfasst haben. Nachweise nach der heute gültigen Richtlinie ([2]) können nicht erfolgreich geführt werden.

In der aktuellen Richtlinie gibt es zwei Berechnungsverfahren. Beim quasi-statischen Nachweis wird eine Ersatzlast gebildet, die von Zuggeschwindigkeit, Wandgeometrie und Abstand zur Gleismitte abhängig ist (vgl. Abbildung 2). Dabei orientiert sich die Richtlinie am Eurocode 1 Teil 2. Zusätzlich muss bei der Planung die Eigenfrequenz der Wand ermittelt werden. Ein davon abhängiger Dynamikbeiwert erhöht die statische Ersatzlast zusätzlich und erfasst auch dynamische Effekte einer Zugvorbeifahrt. Die Richtlinie stellt es dem

Planer jedoch frei, auch ein Computermodell der Wand zu erstellen und anhand von Simulationen mit vorgegebenen Belastungsprofilen die Lärmschutzwand zu bemessen. Auch hier muss die Dynamik mit erfasst werden.

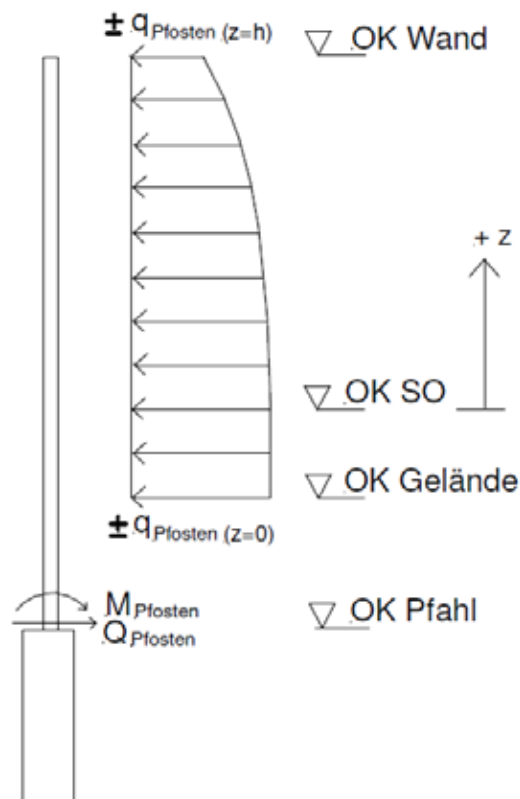


Abbildung 2: Lastbild für die Schnittgrößenermittlung am Pfosten der Lärmschutzwand, [2]

Bereits im Vorfeld der Bachelorarbeit wurde von einem Ingenieurbüro gezeigt, dass die Nachweise nach der aktuellen Richtlinie nicht erfüllt werden können. Gleichzeitig hat die Deutsche Bahn Druckmessungen an der Strecke durchgeführt, um die Lastannahmen aus der Norm mit den realen Belastungen vergleichen zu

können. Die gemessenen Drucke liegen unter den Anforderungen der Norm, da die Norm ein möglichst breites Spektrum an Belastungssituationen abdeckt. In der Bachelorarbeit wurden die Nachweise mit den realen Belastungen geführt. Dazu wurden Ausdrücke aus den Messprotokollen der DB Systemtechnik untersucht und eine maßgebende Zugvorbeifahrt ermittelt (siehe Abbildung 1). Die resultierende Belastung wurde an das Bemessungsverfahren der Richtlinie angepasst. Im quasi-statischen Verfahren konnte jedoch erneut keine Dauerfestigkeit der Lärmschutzwand nachgewiesen werden. Deshalb wurde ein Computermodell der Wand erstellt und die reale Belastung mit numerischen Lastkurven erfasst. Da auch hier kein positives Ergebnis erbracht werden konnte wurde die Restnutzungsdauer der Wandpfosten anhand aktueller Zugzahlen und den realen Belastungen errechnet. Für das Ermüdungsversagen der Stahlpfosten ist in erster Linie die Anzahl der Lastspiele in zwei

Richtungen (Druck und Sog) maßgebend. Da an den Pfosten Schweißstellen vorhanden sind, stellt die Norm für diese Schwachstellen die Wöhler-Linien zur Bestimmung der Ermüdungssicherheit zur Verfügung.

Anhand der Spannungsschwingbreite der maßgebenden Zugvorbeifahrt kann dann die aufnehmbare Anzahl von Lastspielen abgelesen werden. Daraus wiederum bestimmt sich eine Restnutzungsdauer in Jahren (im Beispiel 35 Jahre). Die theoretisch ermittelte Restnutzungsdauer liegt sehr nahe an der zu erwartenden Restnutzungsdauer der Pfosten. Da jedoch der schlechteste Pfostenquerschnitt mit der intensivsten Belastung bemessen wurde, kann davon ausgegangen werden, dass die Lärmschutzwandpfosten dauerhaft sind (Restnutzungsdauer > 50 Jahre).

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Eisenlauer M: Prüfbericht - Messung zuginduzierter Drucklasten auf Lärmschutzwände entlang der Strecke 5503 zw. Augsburg und Olching, DB Systemtechnik, München (2013) [nicht veröffentlicht]
- [2]: Neudeck M, Wiedemann A: Richtlinie 804.5501 – Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken, Deutsche Bahn AG, Frankfurt (2012)

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- 1. Freystein H, Muncke M, Schollmeier P: Handbuch Entwerfen von Bahnanlagen, Eurailpress, zweite Auflage Hamburg (2008)
- 2. Richtlinie 804.5501, wie [2]
- 3. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005, Deutsches Institut für Normung e.V. (2005)



Autor

Nach dem Abitur studierte Lukas Albrecht zunächst ein Semester populäre Musik und Medien an der Universität Paderborn. Es folgten ein halbjähriges Praktikum im Beton- und Tiefbau und das Studium Bauingenieurwesen an der TU München. Nach dem Bachelorabschluss 2014 absolviert Lukas Albrecht im Moment ein Auslandssemester an der NTNU in Trondheim, Norwegen, im Rahmen des Masterstudiums Bauingenieurwesen an der TU München. Studienschwerpunkte sind Massivbau, Holzbau, Bauwerkserhaltung, Baukonstruktion und Computation in Engineering. Neben dem Studium sammelte Lukas Albrecht praktische Erfahrungen in der Bauleitung, Verkehrsplanung, Tragwerksplanung und dem Prüfeningenieurwesen.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Verkehrswegebau der TU München von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein, betreut von M.Sc. Alexander Nottbeck.

In der Abteilung Instandsetzung der DB Netz AG in Augsburg unter der Leitung von Christoph Riedmaier wurde die Arbeit von Dominic Seibold betreut.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

EMPIRISCHE ANALYSE VON VORFERTIGUNGSGRAD UND WITTERUNGSEINFLUSS BEI BAUPROJEKTEN

Bachelor's Thesis

Martina Auer

Das Baugewerbe weist im Vergleich zu den stationären Industrien viele Besonderheiten auf. Zu diesen Besonderheiten gehört, dass sich der Vorfertigungsgrad bei jedem Bauprojekt individuell gestaltet und dass die Witterung im Baugewerbe – vor allem in einigen Leistungsbereichen – einen nicht unwesentlichen Einfluss auf die direkt am Bau beteiligten Personen nimmt. Im Rahmen der Arbeit bot sich die Gelegenheit, anhand von tatsächlichen Zahlen und Kennwerten aus der Baupraxis und auf Grundlage einer empirischen Analyse den Vorfertigungsgrad und den Witterungseinfluss im schlüsselfertigen Hochbau zu untersuchen und zu analysieren.

Keywords: Vorfertigung, Witterung, Schlüsselfertig, Empirische Analyse, Kalkulation, Hochbau, Leistungsbereich

Aufgabenstellung

Im Vergleich zu den stationären Industrien wie z.B. der Automobilindustrie weist das Baugewerbe viele Besonderheiten auf. Das dabei wohl gravierendste Unterscheidungsmerkmal ist, dass im Baugewerbe nicht wie in anderen Industriezweigen in Serie produziert wird, denn Immobilien sind üblicherweise Unikate.

Vorfertigung findet grundsätzlich in allen Industriezweigen statt. Auch in der Baubranche werden je nach Bedarf unterschiedliche Stoffe und Leistungen in unterschiedlichen Mengen und

Weisen je nach Anforderungen geliefert. So liegt bei jedem Bauprojekt ein individueller Vorfertigungsgrad und Montageanteil vor, der von den Verantwortlichen beeinflusst werden kann.

Der Witterungseinfluss nimmt in den stationären Industrien keinen oder nur einen unwesentlichen Teil ein, da in geschlossenen Räumen und unabhängig von der Witterung produziert wird. Im Baugewerbe hingegen ist der Witterungseinfluss in einem hohen Maße vorhanden, da die Produktion zu einem gewissen Prozentsatz außen stattfindet.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Vorfertigungsgrad und den Witterungseinfluss bei schlüsselfertigen Bauprojekten im Hochbau zu untersuchen. Dies erfolgt unter Zuhilfenahme von Zahlen und Daten aus der Praxis, welche von Generalübernehmern, Generalunternehmern und Nachunternehmern zur Verfügung gestellt werden. Es wird akribisch analysiert und bewertet, wie unterschiedlich oder ähnlich sich der Vorfertigungsgrad und Montageanteil sowie der Witterungseinfluss bei verschiedenen Bauprojekten und innerhalb von Leistungsbereichen darstellt.

Im Rahmen einer empirischen Analyse werden die Faktoren Vorfertigungsgrad und Witterungseinfluss anhand von realen Bauprojekten im schlüsselfertigen Hochbau untersucht. Empirisch bedeutet dabei, dass es sich um eine Art der Analyse handelt, die sich nicht ausschließlich auf Theorien stützt, sondern auf messbaren Beobachtungen basiert.

Die Themengebiete Vorfertigung und Witterung werden in der Literatur zwar behandelt, jedoch wird dabei der in der Arbeit angestrebte Ansatz nicht verfolgt. Dieser beinhaltet, dass die Witterung nicht als negativer Einflussfaktor angesehen wird. Die Verfasserin setzt sich mit diesem Ansatz fundamental im Rahmen einer empirischen Analyse auseinander.

Definition der Schlüsselbegriffe

Um die Analyse durchführen zu können, müssen zuerst die beiden relevanten Schlüsselbegriffe des Vorfertigungsgrades und des Witterungseinflusses definiert werden.

Vorfertigungsgrad

Der Vorfertigungsgrad bezeichnet den Teil der Gesamtbauleistung, dessen Kosten vorgefertigt entstehen. Dem Vorfertigungsgrad steht der Montageanteil gegenüber, der die Kosten, die direkt auf der Baustelle generiert werden, widerspiegelt. Addiert man innerhalb einer Position Montageanteil und Vorfertigungsgrad, so erhält man den Einheitspreis.

Die Vorfertigung darf dabei nicht mit der Vorleistung gleichgesetzt werden.

Witterungseinfluss

Witterungseinfluss findet immer dann statt, wenn jemand oder etwas der Witterung ausgesetzt ist. Zur Witterung zählen neben Niederschlag und Sonnenstrahlung auch Wind und Temperatur. Witterungseinfluss besteht bis zu genau dem Zeitpunkt, an dem das Dach des Gebäudes errichtet ist und alle Fenster und Außentüren eingebaut sind. Ab dem Zeitpunkt, an dem von einer geschlossenen Gebäudehülle ausgegangen wird, findet kein Witterungseinfluss mehr statt.

Durchführung der Analyse

Die Durchführung der empirischen Analyse erfolgt nach einem Ablaufschema, das basierend auf den Schemata zur Durchführung einer empirischen Analyse von Aepli et al. und Hug und Poscheschnik von der Verfasserin entwickelt wurde. Abbildung 1 zeigt das Ablaufschema, das im Rahmen der Arbeit Anwendung fand.

Die Datenaufbereitung erfolgt bereits getrennt nach Vorfertigung und Witterung und unter Zu



Abb. 1: Ablaufschema zur Durchführung der Analyse

hilfenahme der Kalkulationsdaten der jeweiligen Unternehmen und den Bauablaufplänen aus dem Projektmanagement.

Um die Daten einheitlich gliedern und später bewerten zu können, wird von der Verfasserin auf Grundlage des „Standardleitungsbuch Dynamische BauDaten“ ein Schema zur Unterteilung in Leistungsbereiche erstellt. Die Leistungsbereiche können Abbildung 2 entnommen werden.

Die Angebote bzw. Schlussrechnungen der Nachunternehmer werden positionsweise in Excel-Tabellen übertragen. Dort werden die Einheitspreise bzw. der Gesamtbetrag einer jeden Position hinsichtlich Vorfertigungsgrad und Witterungseinfluss aufgeteilt.

Der Vorfertigungsgrad wird anhand von Kalkulationsdaten der jeweiligen Unternehmen, der Witterungseinfluss durch die Angaben auf den Bauablaufplänen ermittelt. Die erzielten Resultate werden in der Arbeit anhand von Diagrammen verdeutlicht.

Auswertung der Daten

Im Zuge der Datenauswertung werden die in Excel zusammengestellten Daten bzw. Ergebnisse in Diagrammen abgebildet. Ausgewertet werden jeweils hinsichtlich des Vorfertigungsgrades und des Witterungseinflusses die Bauprojekte zueinander sowie die Bauprojekte innerhalb der Leistungsbereiche.

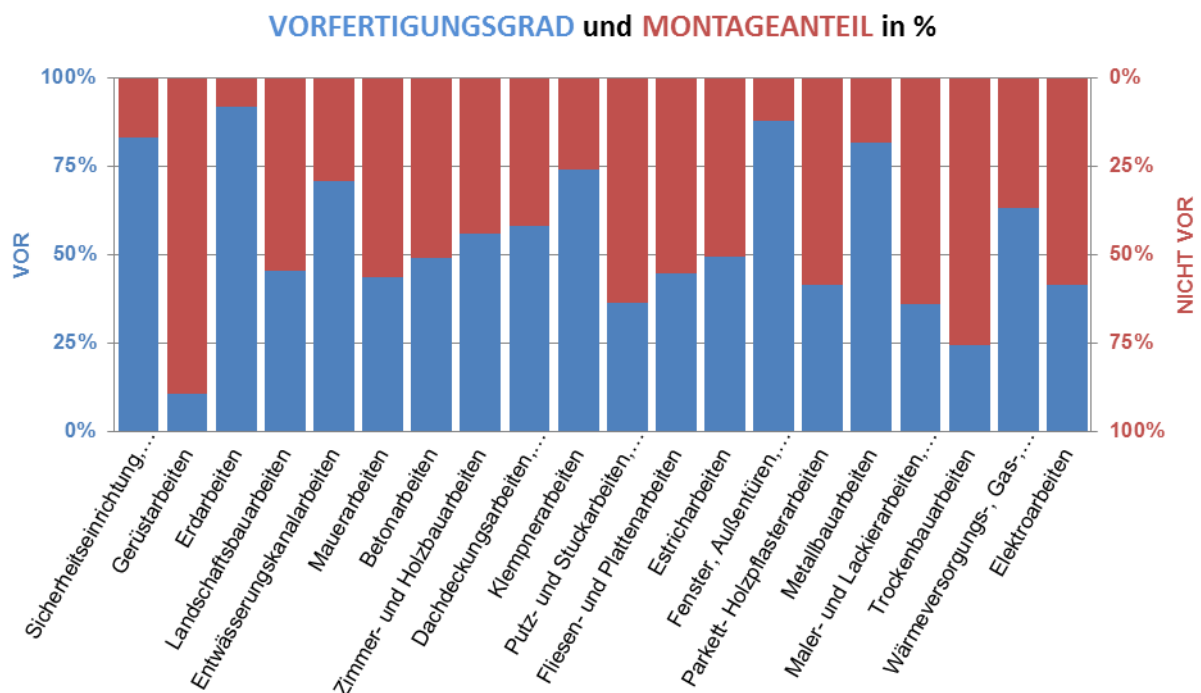


Abb. 2: Analyse des Vorfertigungsgrades an einem Projekt

Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Auswertung eines Projekts bezüglich des Vorfertigungsgrades. Eine solche Auswertung wurde für jedes

Projekt getrennt für Vorfertigungsgrad und Witterungseinfluss und daraus resultierend die Auswertung der Bauprojekte zueinander erstellt.

Abbildung 3 zeigt die Auswertung bzw. den Vergleich des Witterungseinflusses innerhalb eines Leistungsbereiches. Diese Auswertung wurde für jeden Leistungsbereich getrennt nach Vorfertigungsgrad und Witterungseinfluss

erstellt. Der Balken rechts in der Abbildung zeigt jeweils den Witterungseinfluss bzw. Vorfertigungsgrad innerhalb eines Leistungsbereichs bezogen auf alle untersuchten Projekte.

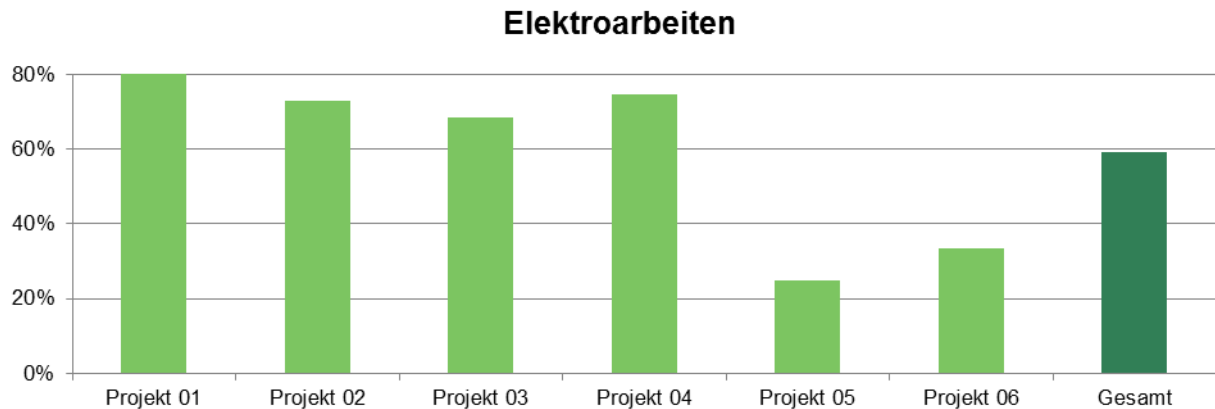


Abb. 3: Vergleich des Witterungseinflusses im Leistungsbereich Elektroarbeiten

Resümee und Ausblick

Essentiell für die Durchführung der empirischen Analyse ist eine gründliche und genaue Vorarbeit, in der die relevanten Begriffe definiert werden und der Ablauf der Untersuchung festgelegt wird.

Bei der Auswertung der Daten wurde festgestellt, dass die im Zuge dieser Arbeit untersuchten Bauprojekte einen Vorfertigungsgrad von 59% und einen Montagegrad von dementsprechend 41% aufweisen. Rund 40% der Preise wurden folglich auf der Baustelle generiert.

Die Witterung nimmt bei 80% der anfallenden Leistungen Einfluss. In diesen 80% sind Vorleistungen enthalten, deren Leistungen nicht der Witterung ausgesetzt waren. Dieser Anteil konnte in der Arbeit nicht bestimmt werden. 20% der Preise wurden generiert, während kein Witterungseinfluss bestand.

Die Arbeit bezieht sich exemplarisch auf sechs Bauprojekte. Von den 56 ausführenden Unternehmen, die um die Aufschlüsselung ihrer Kalkulationsdaten bzw. um die Herausgabe ihrer Bauablaufpläne gebeten wurden, beteiligten sich 52 an der Analyse. Ohne die Mithilfe der Unternehmen wäre eine derartig umfassende und praxisnahe Analyse nicht möglich gewesen.

Aufbauend auf dem in der Arbeit entwickelten Schema könnten weitere Analysen folgen. Die Untersuchung sollte von einer an der Realisierung von Bauprojekten beteiligten Person durchgeführt werden. Dies hat zum Vorteil, dass die benötigten Daten sofort eingeholt werden und der Bauablaufplan gezielt auf die Auswertung der Analyse erstellt werden kann.

Literaturverzeichnis

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Zimmermann, Josef: Ergänzungskurs Bauprozessmanagement – Projektrealisierung, Kosten- und Leistungsrechnung, Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung der Technischen Universität München. Ausgabe 04/2013 München 2013.
2. Aepli, Jürg; Gasser, Luciano; Gutzwiller, Eveline; Tettenborn, Annette: Empirisches wissenschaftliches Arbeiten. 2. Auflage. Julius Klinkhardt Verlag, Bad Heilbrunn 2011.
3. Hug, Theo; Poscheschnik, Gerald: Empirisch Forschen. Huter & Roth Verlag, Wien 2010.
4. Stier, Winfried: Empirische Forschungsmethoden. 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1999.
5. Peer, Shlomo: Vorfertigung auf der Baustelle / Die Wirtschaftlichkeit der Vorfertigung einzelner Bauteile bei konventioneller Ausführung von Wohnbauten und ihre Grenzen. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld 1964.
6. Zimmermann, Josef: Schlüsselfertiger Hoch- und Ingenieurbau, Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung der Technischen Universität München. Ausgabe 10/2013 München 2013.



Autor

Frau Martina Auer wurde am 25.05.1988 in Rosenheim als Tochter eines Diplom-Bauingenieurs und einer Kauffrau geboren. Nach dem Abitur 2007 in Rosenheim, danach Ausbildung zur diplomierten Grafikerin und ab 2010 Bauingenieursstudium an der Technischen Universität München mit Abschluss als Bachelor of Science. Seit 2014 als Bauingenieurin im Familienunternehmen in Rosenheim tätig.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, Fachbereich der TU München, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Zimmermann, Betreuer Dipl.-Ing. Christoph Gottanka.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ERFASSUNG UND AUSWERTUNG DES PERSONAL- AUFWANDES IM BEREICH DER GEWERBLICHEN ROHBAUTÄTIGKEITEN

Bachelor's Thesis

Matthias, Berger

Die Produktionsplanung ist Grundlage für viele weitere Prozesse. Neben der Geräteplanung ist hier die Personaleinsatzplanung besonders hervorzuheben, da diese zum Großteil maßgeblich für einen termingerechten Ablauf des Projektes ist. Annahmen die in diesen Planungen getroffen werden, stammen oftmals nur von pauschalen mittleren Nutzungsannahmen. Ziel dieser Arbeit ist es zunächst, über eine Literaturrecherche, Tabellenwerke dieser Nutzungsannahmen zu ermitteln und anschließend Methoden zur Erfassung und Dokumentation von Personalaufwand zu analysieren. Erste Differenzen zwischen den einzelnen Zeitwerttabellen können hier bereits aufgezeigt werden. Das Ergebnis der Recherche wird anschließend zur Aufnahme von Personalaufwand in Form von Lohnstunden bei realen Bauprojekten ermittelt. Die daraus gewonnenen Daten können somit mit der vorliegenden Literatur verglichen und Unterschiede zwischen Realität und der Nutzungsannahmen aus Tabellenwerken dargestellt werden. Mit Hilfe neu ermittelter Werte können als Ergebnis der Arbeit neue Zeitwerte mit Angabe der verwendeten Kolonnenstärke berechnet werden.

Themenstellung

Die Einhaltung der Terminierung sowie der geplanten Produktivität von Leistungsprozessen in der Bauausführung sind wesentliche Kriterien in der Projektrealisierung.

Dabei ist die Produktionsplanung ein wichtiger Grundstein für viele weitere Prozesse. Insbesondere der Personaleinsatzplanung kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da

sie im Allgemeinen nur über pauschale Nutzungsannahmen berücksichtigt werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Analyse, Erfassung und Dokumentation von Daten des Personalaufwandes im Bereich der gewerblichen Rohbautätigkeiten.

Über eine Literaturrecherche sollen bestehende Daten und Methoden zur Erfassung und Messung des Personalaufwandes dargestellt und analysiert werden.

Anschließend sollen mit Hilfe analysierter Methoden Daten des Personalaufwandes der gewerblichen Tätigkeiten im Rohbau erfasst, dokumentiert und in einer Auswertung den bestehenden Daten vergleichend gegenübergestellt werden.

Motivation

Die Einhaltung der Terminierung sowie der geplanten Produktivität von Leistungsprozessen in der Bauausführung sind wesentliche Kriterien der Projektrealisierung.

Ein wichtiger Meilenstein für viele weitere Prozesse, insbesondere der Geräte- und Personaleinsatzplanung, stellt hierbei die Produktionsplanung dar, welche im Allgemeinen lediglich über pauschale mittlere Nutzungsannahmen berücksichtigt werden. Hier ist zu prüfen, inwieweit es plausibel ist, diese Werte in der Planung anzunehmen.

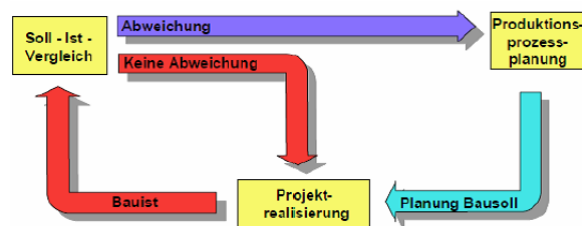


Abbildung 1: Regelkreis Termin- und Ablaufcontrolling

Analyse verwendbarer Methoden

Nach einer kurzen Darstellung des Stands der Wissenschaft im Bereich der Ablauf- und Terminplanung werden über eine Literaturrecherche bestehende Methoden zur Erfassung, Messung und Dokumentation des Personalaufwandes dargestellt und analysiert.

Des Weiteren werden in der Literatur bereits vorhandene Daten bzw. Tabellen von Aufwandswerten vorgestellt, welche später zur Ermittlung von zu erwartenden Lohnstunden verwendet werden.

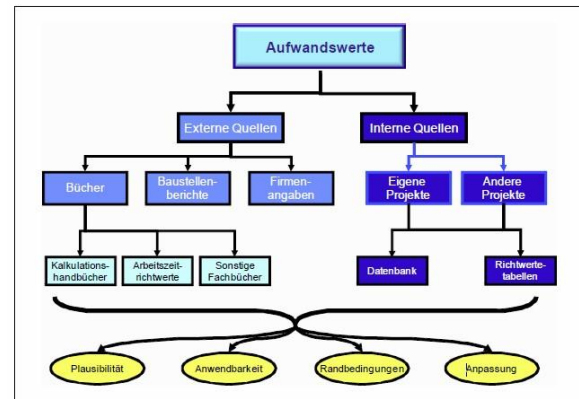


Abbildung 2: Quellen von Aufwandswerten

Erster Vergleich anhand eines Referenzobjektes

Um bereits frühzeitig Unterschiede in den Zeitwerten aus der Literatur sichtbar zu machen, wird eine Massenermittlung eines Referenzobjektes durchgeführt und anhand der ermittelten Massen und Daten, die erwarteten Bauzeiten, die über Lohnstunden angezeigt werden können, ermittelt.

Hier zeigen sich bereits deutliche Unterschiede in den laut Literatur anzusetzenden Lohnstunden, was auf eine Problematik der Verwendung externer Quellen hinweist.

Differenzen in angewandter Literatur und deren Gründe

Zur Verdeutlichung der vorliegenden Unterschiede, werden einzelne Zeitwerte aus den Tabellen vergleichend gegenübergestellt und die prozentuale Abweichung vom berechneten Mittelwert aufgezeigt.

Nach der Ermittlung der Differenzen wird nach Gründen gesucht, wodurch diese teils gravierenden Differenzen entstanden sind.

Diese können aus verschiedenen Bereichen wie z.B. Baustellenbedingungen, Betriebsbedingungs-

en, Bauwerksbedingungen oder auch Einflüsse durch das Bauverfahren erklärbar sein.

Datenaufnahme an realen Projekten

Im zweiten Teil der Bachelor's Thesis werden reale Daten am ersten Beispielprojekt mit Hilfe der zuvor ermittelten Methoden dokumentiert. Diese Daten stammen von Wänden, Stützen, und Bodenplatten. Das untersuchte Bauprojekt befindet sich direkt an der S-Bahn Stammstrecke Haltestelle Moosach. Durch Anwesenheit vor Ort wurden Daten ermittelt und auf dafür erstellten Protokollen dokumentiert. Zur Datenermittlung gehören Zeitaufwand und das dafür eingesetzte Personal.



Abbildung 3: Schalung Wand 2

Betrachtet wurden Teilprozesse wie Bewehrung, Schalung und Betonage. Nachdem die Gesamtzeiten der betrachteten Bauteile ermittelt wurden, konnte anhand von Plänen, die Bauteilabmessungen und deren benötigtes Material ausgelesen bzw. berechnet werden, was Voraussetzung für die späteren Berechnungen mit Hilfe der Tabellenwerke ist.

Die zu erwartenden Lohnstunden konnten nun ermittelt und graphisch gegenübergestellt werden, um darzustellen, welche Teilprozesse maßgeblich für die ermittelten Zeitdifferenzen sind.



Abbildung 4: Betonage Bodenplatte mit Pumpe

Das zweite Bauprojekt befindet sich in Landshut. Es handelt sich um eine neu zu erstellende Tiefgarage am Landratsamt Landshut, deren Rohbau in rund 3 Monaten erstellt wird. Auch hier werden wiederum Daten gesammelt, die Gesamtzeiten einzelner Bauteile ermittelt und die zu erwartenden Bauzeiten aus den Tabellenwerken generiert. Wie zuvor werden diese Ergebnisse erneut tabellarisch und graphisch gegenübergestellt und miteinander verglichen.



Abbildung 5: Deckentische für UG 2.1 Takt 4 mit erkennbarem Entwässerungsgefälle

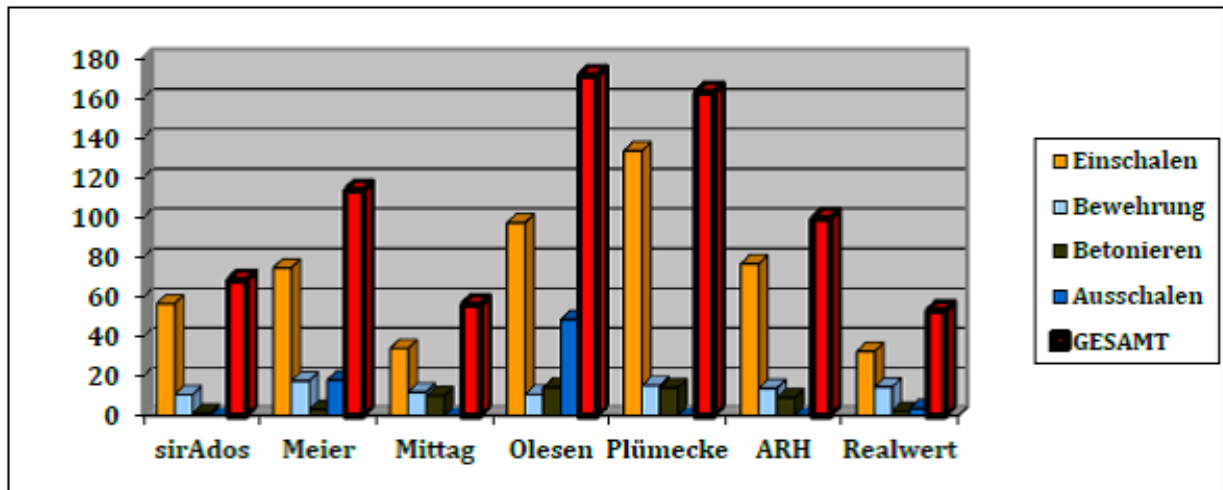


Abbildung 6: Vergleich Lohnstunden Wand - Lüftungsschacht B

Bei Betrachtung der dadurch erzeugten Graphiken wird deutlich, dass die real verbrauchten Lohnstunden die laut externen Quellen anzusetzenden Lohnstunden sehr deutlich unterschreiten.

Selbst bei den hier ermittelten Werten wird die Schwierigkeit der Generierung von Zeitwerten deutlich, da sich selbst auf der gleichen Baustelle bei sehr ähnlichen Vorgang der Wert oft deutlich unterscheidet.

Ermittlung neuer Aufwandswerte

Als Ergebnis dieser Arbeit werden für die betrachteten Gewerke neue Zeitwerte anhand der ermittelten Daten mit folgender Formel generiert, welche dann auch mit den Tabellenwerken verglichen werden können:

$$w = \frac{D}{Q} [\text{Einheit}] (q)$$

Formel 1: Modifizierter Zeitwert

mit w = modifizierter Zeitwert
 D = Dauer des Vorgangs
 q = Kolonnenstärke
 Q = Erbrachte Menge

Um eine präzisere Stellungnahme dazu abgeben zu können, wäre eine große Menge von Daten erforderlich, um eine statistisch verwertbare Ableitung vornehmen zu können. Aufgrund der durchgängigen Unterschreitung der Realwerte zu den Tabellenwerken ist dies aber dringend nötig.

Im Anschluss wird kurz auf die Möglichkeit einer digitalen Datenaufnahme für weitere Untersuchungen eingegangen. Diese Methode mittels Time-Lapse-Kameras könnte den Aufwand der Datenaufnahme auf ein Minimum reduzieren und somit helfen, viele aussagekräftige Daten zu generieren und auswerten zu können.

UG 2.1 T4		D	q	Q	w
	Schalung	18,00 h	4	387,50 m²	0,046 h/m² (4)
	Bewehrung	18,00 h	8	9360 kg	1,92 h/t (8)
	Betonage	4,243 h	6	150,00 m³	0,028 h/m³ (6)
UG 2.1 T5		D	q	Q	w
	Bewehrung	17,00 h	8	12570 kg	1,35 h/t (8)
	Betonage	13,50 h	6	208,32 m³	0,065 h/m³ (6)
UG 1.2 T2		D	q	Q	w
	Schalung	15,00 h	4	309,40 m²	0,048 h/m² (4)
	Bewehrung	10,00 h	8	7470 kg	1,34 h/t (8)
	Betonage	4,27 h	6	120,00 m³	0,036 h/m³ (6)

Abbildung 7: Zeitwerte für Decken (Projekt 2)

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Abb.1: Zimmermann, Josef: Ergänzungskurs Bauprozessmanagement. Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung an der Technischen Universität München. Ausgabe 04/2013, S. 12
- [2]: Abb.2: Hofstadler, Christian: Kalkulation von Stahlbetonarbeiten: Schalarbeiten, Bewehrungsarbeiten, Betonarbeiten, PDF zur Vorlesung, Bauwirtschaftslehre VU am Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft, Projektentwicklung und Projektmanagement an der Technischen Universität Graz, 2011, S. 37

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. weka Media GmbH: sirAdos Zeitwert-Tabellen Rohbau, 1. Auflage Juli 2013, Kissing
2. Meier, Ewald: Zeitaufwandtafeln für die Kalkulation von Hochbau- und Stahlbetonarbeiten, 3. Auflage, Wiesbaden, 1990
3. Mittag, Martin: Arbeitszeiten, Baupreise, Leistungsbeschreibung - Aktuelle Spezialausgabe für Mauer-, Beton- und Werksteinarbeiten WEKA GmbH, Kissing, Grundwerk 1994, 13. Aktualisierung Band 2
4. Olesen, Günter: Kalkulationstabellen Hochbau, 12. Überarbeitete Auflage, Berlin, 2005
5. Zeitechnik Verlag GmbH: Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau Gesamtausgabe, Dreieich, 1983
6. Bundesministerium des Innern: Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlung, PDF-Arbeitsversion, Berlin, Stand: Dezember 2013
7. Zimmermann, Josef: Kybernetik der Planungsprozesse / Grundkurs Bauprozessmanagement / Ergänzungskurs Bauprozessmanagement, Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung an der Technischen Universität München, Ausgaben 04/2013



Autor

Herr Matthias Berger studierte nach der schulischen Ausbildung an der Technischen Universität München mit Abschluss als Master of Science. Seit 2014 ist er als Assistent der Bauleitung bei Nagelschneider GmbH tätig.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Zimmermann, Betreuer M.Sc. Peter Greitemann

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ANWENDUNG DER HYGROTHERMISCHEN GEBÄUDE-SIMULATION IN DER PRÄVENTIVEN KONSERVIERUNG, AM BEISPIEL DER KIRCHE ST. MARGARETHA

Masterarbeit

Hans Brandl

Für ein ideales Raumklima zur Erhaltung von Kulturgütern existieren unterschiedlich eng gefasste Empfehlungen. Teilweise können diese Raumklimaanforderungen nur unter hohem energetischen und finanziellen Aufwand umgesetzt werden oder sind mit den Vorgaben des Denkmalschutzes nicht zu vereinbaren. Es ist deshalb erforderlich, Schadenspotentiale zuverlässig zu prognostizieren, um effiziente, minimalinvasive und wirtschaftliche Lösungsstrategien zum Schutz wertvoller, historischer Gebäudesubstanz entwickeln zu können. Die Arbeit zeigt am Beispiel der Kirche St. Margaretha, wie mit Hilfe der Gebäudesimulation systematisch die Wirkung unterschiedlicher Sanierungsmaßnahmen auf die Schadenspotentiale untersucht werden kann und durch die Kombination verschiedener Maßnahmen eine wirtschaftlich tragbar und energetisch effiziente Gesamtmaßnahme entwickelt wird.

Keywords: Hochschulpreis, Baugewerbe, Hygrothermische Gebäudesimulation, Energie Effizienz Design E2D, Fraunhofer IBP, Präventive Konservierung, Climate for Culture, Historische Gebäude, Kulturelles Erbe, Validierung, Schadenspotentiale, Wufi®Plus, Raumklima.

Motivation

Die Masterarbeit entstand im Studiengang „Energie Effizienz Design E2D“ an der Hochschule Augsburg und wurde am Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP verfasst. Sie stellt am konkreten Beispiel eines historischen Bauwerks, der Kirche St. Margaretha in Roggersdorf (Abbildung 1), die Anwendung hygrothermischer Gebäudesimulation im Bauwesen und speziell in

der präventiven Konservierung dar. Die kleine Kirche in der Nähe von Holzkirchen ist Teil des europäischen Projekts „Climate for Culture“. Das Projekt untersucht die Auswirkungen des Klimawandels auf historische Gebäude und Kulturgüter, mit dem Ziel, effektive, effiziente und nachhaltige Strategien zu deren langfristiger Bewahrung zu entwickeln.



Abb. 1: St. Margaretha in Roggersdorf bei Holzkirchen in Bayern

Zielsetzung

Ziel ist es, in einem ganzheitlichen Ansatz, die Wirkprinzipien der Raumklimabildung historischer Gebäude zu erfassen und somit Bedingungen zu definieren, die eine nachhaltige Erhaltung der Gebäude sicherstellen. Dabei steht bei der Erhaltung historischer Substanz, die Vermeidung von Schäden an Bauwerk und Inventar im Vordergrund.

In der Sanierungspraxis zeigt sich, dass trotz umfangreicher Erfahrungen, die Wirkung verschiedener Maßnahmen nicht immer richtig eingeschätzt werden kann. Primär hygrothermische Zusammenhänge und Schadensprozesse sind sehr komplex in ihrer Darstellung und in der Prognose. Die Folge sind Sanierungen, die nicht zur Schadensreduzierung bzw. zukünftigen Schadensvermeidung beitragen oder sogar zur Schadenvergrößerung führen. Zuverlässige Prognosen der tatsächlichen Schadenspotentiale für Bauwerk und Inventar sind deshalb erforderlich.

Die Kirche St. Margaretha (Abb. 1) wies bereits kurz nach umfangreicher Gesamtanierung wieder erhebliche Schäden an Substanz und Inventar auf, wie Feuchteflecken durch Salze, Putzschäden, Schimmel und Durchfeuchtung der Wände. Darüber hinaus Risse, Craquelè und Fassungslockerungen an Altar und Ausstattung.

Mit Hilfe der Simulation sollten die Schadensursachen ermittelt und im Modell die Schadenspotentiale in ausreichender Vorhersagegüte abgebildet werden:

- Mikrobielles Wachstum
- Salzdeliquescenzen
- Tauwasserbildung
- kurzzeitige Luftfeuchteschwankungen
- Hohe relative Luftfeuchten über 70% r.F.
- Frost-/Tauwechsel

Methodik

Die Arbeit gliedert sich dabei in mehrere Bereiche.

1. Umfassende Schadenschronik und Analyse der Schadenspotentiale anhand umfangreicher Messwerte der Außen- und Raumklimamessungen.
2. Raumklimaanalysen der unterschiedlichen Gebäudezonen.
3. Aufbau eines hygrothermischen Gebäudesimulationsmodells in WUFI®Plus (Abb. 2).

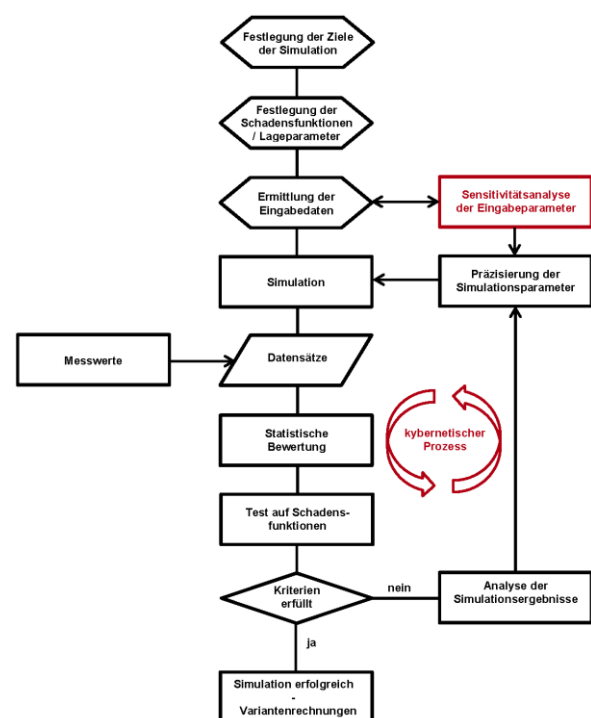


Abb. 2: Erweitertes Flussdiagramm zum Aufbau und Ablauf der Simulation nach Kilian [1]

4. Kalibrierung des hygrothermischen Simulationsmodells durch Ermittlung der Schadenspotentiale und Vergleich von Simulation und Messung. Bewertung der Wiedergabegüte von Raumklima und Schadenspotentialen mithilfe statistischer Kennwerte.
5. Validierung der kalibrierten Simulation hinsichtlich Raumklima- und Schadenspotentialwiedergabe sowohl an realen Messwerten als auch am theoretischen Ansatz. Bestätigung der Zuverlässigkeit und der allgemeinen Wiedergabegüte.
6. Untersuchung der zu erwartenden Entwicklung von Raumklima und Schadenspotentialen bis ins Jahr 2100 in Folge des Klimawandels. Dazu wurden im Zuge des EU Projekts **CLIMATE FOR CULTURE**, neueste, regionale Klimamodelle ReMo (A1B und RCP4.5) des MPI-M verwendet.
7. Ableitung klimastabilisierender und substanzerhaltender Maßnahmen, Gegenüberstellung von Wirkung, Kosten und Energieeffizienz und Entwurf einer optimierten Gesamtstrategie.

Ergebnisse

Die Raumklimaabbildung durch die hygrothermische Gebäudesimulation am historischen Gebäude, wurde erfolgreich mit sehr guter Genauigkeit erreicht. Die wesentlichen Schadensprozesse ließen sich hinreichend genau abbilden.

Die untersuchten Schadensprozesse hängen neben der Höhe der relativen Raumluftfeuchte, vor allem von deren Schwankungen ab. Diese werden im Wesentlichen von der Feuchtepufferung des Modells im Kontext mit den Luftwechseln bewirkt. Deren Erfassung und die dahin gehende Parameterpräzisierung führten letztendlich zu dem sehr guten Simulationsmodell. Dabei wurde vor allem die Feuchtepufferung, durch die Aufnahme allen

Inventars und der Innenausstattung erfasst. Ergänzt wurde dies durch genaue Untersuchungen zu den detaillierten Luftwechseln in der Kirche und deren Implementierung im Modell.

Die Berücksichtigung der hygrothermischen Koppelung, also die gekoppelte Simulation thermischer und hygrischer Prozesse nach Künzel [2] ist dabei die wesentliche Voraussetzung für die Abbildung von Schadensprozessen. Jedoch sind dazu nur wenige Simulationsprogramme wie WUFI® Plus in der Lage.

Präventive Maßnahmen

Das Potential hygrothermischer Simulationsmodelle zeigt sich vor allem in der Untersuchung möglicher, präventiver Maßnahmen zur Klimastabilisierung und Schadensvermeidung. Tabelle 1 zeigt exemplarisch die untersuchten präventiven Maßnahmen hinsichtlich der Begrenzung der Schadenspotentiale, Verbesserung des allgemeinen Raumklimas, des Energiebedarfs und der Kosten. In der Arbeit wurden dazu auch Synergieeffekte in Kombinationen dieser Maßnahmen untersucht.

Es können bereits erhebliche Verbesserungen erreicht werden, indem hohe Luftwechsel vermieden werden, ebenso hohe Infiltrationsraten beispielsweise durch Abdichtung der größten Leckagen z.B. an der Eingangstür. Auch zeigt sich bereits ein deutlich klimastabilisierender Effekt durch eine moderate Lüftung über die Kippfenster während der Gottesdienste, um hohe Feuchteschwankungen durch die Feuchteabgabe der Besucher zu vermeiden.

In einem optimierten Gesamtkonzept, wird eine adaptive Lüftung vorgeschlagen, bei der zurückhaltende Luftwechselraten bis maximal $0,5 \text{ h}^{-1}$, eine Reduzierung der

Schadenspotentiale bei noch ausreichender Raumklimastabilität erreichen. Eine zusätzliche Beheizung zur Vermeidung von Frosttemperaturen im Kirchenschiff erscheint im Winter unumgänglich, durch die geregelte adaptive Lüftung jedoch sehr energieeffizient realisierbar.

Eine etwaige Feuchtequelle wie sie im Simulationsmodell abgebildet wird, muss jedoch identifiziert und deren Ursache behoben werden. Der Meinung des Autors nach ist dafür Feuchte aus dem umliegenden Bodenbereich und/oder Eintrag durch Schlagregen und ablaufende Feuchte über die Außenwände verantwortlich. Demzufolge empfiehlt es sich, eine verbesserte Sockelabdichtung und eine Drainage oder eine Hydrophobierung der Außenwände in Erwägung zu ziehen.

Relevanz der Schadensanalyse für die Baupraxis

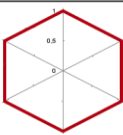
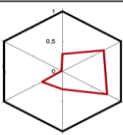
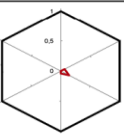
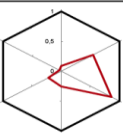
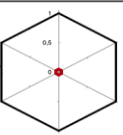
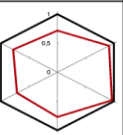
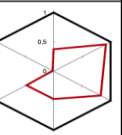
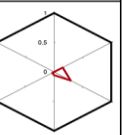
Erstmalig gelang hier die Validierung nur *eines* Modells hinsichtlich *mehrerer*, komplexer Schadenspotentiale und sogar für die Wiedergabe detaillierter Klimabedingungen in und an einzelnen Bauteilen. Anhand des Modells ließen sich sogar Rückschlüsse auf vorhandene, bisher noch nicht erkannte Schadensursachen

ziehen. So konnte ein Zusammenhang über bisher ausgeschlossene „aufsteigende Mauerwerksfeuchte“ durch Tauwasserbildung und Bodenfeuchte aufgezeigt werden, der sich in der Simulation nicht nur im Raumklima bestätigte, sondern auch die hygrischen Verhältnisse der Bauteile im Sockelbereich reproduzierte.

Zur effizienten Parameterermittlung wurden in der Arbeit unterschiedlichste Methoden zur zielführenden Generierung der Eingabeparameter und Randbedingungen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen die Anwendbarkeit und Zielführung dieser Methoden und ermöglichen so, über die Anwendung im historischen Gebäudebereich hinaus, auch für gewöhnliche Bestandsgebäude oder Neubauten ein effektives, schnelles und ökonomisches Vorgehen zum Aufbau von Simulationsmodellen. Dazu trägt vor allem die in Kilian [1] vorgestellte Methodik (Abb. 2) bei, die hier erstmalig angewendet wurde und hervorragende Ergebnisse lieferte.

Aufbauend auf der vorliegenden Arbeit können Arbeitsmittel und Bewertungstools für die Baupraxis zur sicheren Ableitung effektiver und effizient dimensionierter Maßnahmen und Konzepte entwickelt werden.

Tabelle 1: Vergleich ausgewählter Maßnahmen. Die Spinnendiagramme der Schadensquotienten zeigen die Wirkung auf die sechs untersuchten Schadenspotentiale. Je näher die rote Kurve am Mittelpunkt liegt, desto effektiver ist die Wirkung der Maßnahme.

	Messung 2012	Sockeltemperierung 10 W/m	hygrostat. Heizung	adapt. Lüftung $n = 1,0 \text{ h}^{-1}$	Entfeuchtung	Sanierputzsystem	Sockelhydrophobierung	Gesamtmaßnahme
rel. Luftfeuchte Mittelwert in %	78	73	65	73	65	76	73	67
Schadensquotienten								
Schäden allg.	-	o	+	o	+	-	-	+
Raumklima allg.	-	-	+	-	+	-	-	+
Energiebedarf in kWh (jährlich)	0	4380	10050	366	3500	0	0	645
Energiekosten in Euro (jährlich)	0	1093	2507	91	873	0	0	161

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Kilian, R.: Klimastabilität historischer Gebäude. Bewertung hygrothermischer Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung. Stuttgart, Universität, Dissertation, 2013
- [2]: Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Bichlmair, S.: Simulation und Analyse des Raumklimas in ausgewählten Räumen im Schloss Linderhof. Masterarbeit Hochschule Rosenheim, 2010
2. Holm, A.; Antretter, F.; Kilian, R.; Ritter, F.; Wehle, B.): Controlled ventilation of historic churches - assessment of impact on the indoor environment via hygrothermal building simulation. In: XII DBMC 2011, 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components. Vol.2. Porto: FEUP, 2011, S. 923–930
3. Kilian, R.: Statistische Untersuchungen der Klimaschwankungsbreite in unterschiedlich genutzten Kirchenbauten. In: WTA-Almanach 2007. Bauinstandsetzen und Bauphysik. München: WTA, 2007, S. 327–347
4. Norrefeldt, V.: Bewertung des Luftaustausches verschiedener Fensterkonfigurationen durch numerische Simulation. Diplomarbeit TU München, 2008
5. Schweiger, S.: Experimentelle Bestimmung der Sorptionseigenschaften von historischen Räumen. Diplomarbeit, Hochschule Rosenheim, 2013
6. Solomon, S. (Hrsg.): *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Chapter 2: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Intergovernmental Panel on Climate Change. 1. publ. Cambridge [u.a.]: Cambridge Univ. Press, 2007*
7. Steiger M.; Asmussen S.: *Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: The phase diagram Na₂SO₄-H₂O and the generation of stress. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72 (17), 2008, S.4291-4306, 10.1016/j.gca.2008.05.053*



Autor

Herr Hans Brandl studierte nach Erlangen der Fachhochschulreife 1987 bis 1991 „Physikalische Technik“ an der FH München und im Anschluss von 2008 bis 2012 „Energieeffizientes Planen und Bauen E2D“ an der Hochschule Augsburg. Die Bachelorarbeit wurde mit dem Bayerischen Kulturpreis 2012 ausgezeichnet. Von 2012 bis 2015 absolvierte er das Masterstudium „Energie Effizienz Design E2D“ an der HS Augsburg

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät für Architektur und Bauwesen, im Fachbereich „Energie Effizienz Design E2D“ der Hochschule Augsburg, bei Frau Professor Dr.-Ing. Runa T. Hellwig, sowie am Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP in Holzkirchen, im Bereich „Präventive Konservierung“ bei Dr. Ralf Kilian.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ANWENDUNG UND UMSETZUNG VON LEAN MANAGEMENT METHODEN IM PLANUNGS- UND BAUPROZESS DER BMW AG

Masterthesis

Janosch Dlouhy

In der Masterthesis „Anwendung und Umsetzung von Lean Management Methoden im Planungs- und Bauprozess der BMW AG“ wird die Einführung von Lean Methoden eines Industrieunternehmens in seiner Bautätigkeit betrachtet, begleitet und weiterentwickelt. Beginnend stand die allgemeine Recherche zu Lean Methoden, und der Spezialisierung für das Bauwesen mit dem Stand der Technik. Die Rechercheergebnisse wurden strukturiert und auf Pilotprojekte übertragen. Die Ergebnisse der Piloten wurden dokumentiert und als Verbesserungsansätze in der Thesis erarbeitet. Auf Wunsch von BMW wurde am Ende der Arbeit eine Handlungsempfehlung mit Ausblick auf ein mögliches Vorgehen in der Planungsphase erörtert. Der integrale, strukturierte, modularisierte Gesamtprozessansatz bietet die Grundlage für den automatisierten Abgleich mit Building Information Modelling (BIM) und ermöglicht damit ein großes synergetisches Potential mit Industrie 4.0 im Bauwesen. Darüber hinaus besteht erstmals die durchgängige Messung in kleinen Einheiten und damit auch Vergleichbarkeit von Bauprozessen.

Keywords: Hochschulpreis, Baugewerbe, Lean Management, Lean Construction, Wertschöpfung, Taktplanung, Prozess, BIM, Industrie 4.0

Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, Prozesse und Werkzeuge aufzuzeigen, die aktuellen Herausforderungen des Baugewerbes in ein schlüssiges und im Detail einfaches Prinzip umsetzen. Die Komplexität wird durch die Durchgängigkeit der einfachen Einzelschritte erzeugt. Dabei liegt mein Augenmerk hauptsächlich auf der Sichtweise des Bauherrn. Dieser hat als einziger Projektbeteiligter die

richtige Motivation um Verschwendung zu reduzieren, den kompletten Zusammenhang der Projekte sichtbar vor sich und kann als einziger die Transparenz von allen anderen Projektbeteiligten einfordern. Denn am Schluss bezahlt immer der Auftraggeber die Kosten des Projektes, sowohl monetär, terminlich wie auch qualitativ.

Der Lean Gedanke

Unter der Voraussetzung einer stabilen Umgebung wird in einer Lean Produktion (schlanke Produktion) die Wertschöpfung (Kundenwunsch) in den Mittelpunkt allen Schaffens gestellt. Jede Planung und Arbeit wird diesem Ziel untergeordnet. Das gesamte Projektteam erarbeitet workshop-basiert in einer transparenten visuellen Form alle Arbeitsinhalte und deren Strukturierung. Kleine Arbeitseinheiten werden gewählt und diese in ein getaktetes Flussprinzip gestellt. Weitere Arbeitsschritte werden über einen Pull-Mechanismus (Ziehprozess) ausgelöst und gesteuert. Alle beteiligten Teammitglieder werden bei der terminlichen wie fachlichen Entscheidung einbezogen. Bei Taktübergabe findet in allen Bereichen eine kurzzyklische Messung zur Qualitätssicherung statt. Durch den stabilen wiederholenden Regelprozess werden Fehler aufgedeckt und vermieden. Optimierung stellt sich durch die redundanten Arbeitsprozesse in stabiler Umgebung ein. Direkte Verschwendung wird eliminiert, indirekte Verschwendung reduziert; **Transparenz; Teambuilding; Vermeidung von Verschwendung; Pull; Takt; Fluss; Streben nach Perfektion; Null Fehler.**

Taktung in der Realisierungsphase

Gesamtprozessanalyse: Definieren aller Teilbereiche des Bauprojektes und deren Grobprozessplanung durch den Last Planner Ansatz.



Abb. 1: Gesamtprozessanalyse auf brown paper zum Pilotprojekt BMW Niederlassung Zürich

Taktplanung: Dimensionieren der einzelnen Prozessschritte in den Teilbereichen. Skalieren und Einpassen der Arbeitspakete in die Gewerkesequenz unter dem Projekttakt.

Harmonisieren der Arbeitsressourcen in der Gewerkesequenz (Gewerkezug). Aufsetzen eines Taktplanes durch Einfügen aller benötigten wertschöpfenden Arbeiten durch die Gewerkezüge.

Taktsteuerung: kurzzyklisches Messen des Fortschritts der Taktplanung in gewählter Detaillierung. Baustellen-Reporting. Abschlussbewertung pro Arbeitspaket zum Ende des Taktes.

Pilotprojekt Neubau Werk Brasilien

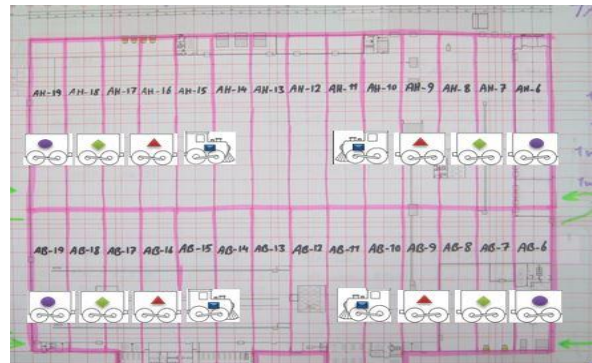


Abb. 2: Taktplan Rohbau mit Baurichtung und Gewerkezug

Als erste Lean Baustelle in der BMW AG wurde ein überzeugendes Konzept in der Realisierungsphase erarbeitet. Viele genutzten Tools, wie das Dashboard, die Arbeit mit dem GU und der Projektsteuerung, können in Folgeprojekte übernommen werden. Die Arbeit zwischen den Parteien hat menschlich, wie auch fachlich überzeugt. Die Taktung der Ausführung erzeugt einen stabilen Produktionsprozess, in welchem erhebliche zeitliche Einsparungen erzielt werden konnten. Kollisionen und Behinderungsanzeigen wurden deutlich reduziert.

- Frühe Einbindung des Projektteams
- Hoher Vorproduktionsanteil durch Nutzung von bestehendem Hallenkonzept
- Klare Organisationsstruktur und Teambuilding durch Intensivtage
- Alle Beteiligten wurden ins Team integriert
- Kommunikation der kurzen Wege (wichtige Dinge werden besprochen,

Lösungen entstehen im Team, alle Beteiligten haben das selbe Projektziel

- GU als externer Partner mit einer Stimme und genauer Verantwortlichkeit.
- Transparenz in der Planung und in der Steuerung
- Workshopbasiertes Arbeiten (unterstützt durch das „Big Room“)
- Deutliche zeitliche Einsparungen und qualitative Konstanz durch Taktplanung



Abb. 3: Dashboard (Taktsteuerungstafel) Werk Brasilien

Pilotprojekt Feuerwache Werk Dingolfing

Die Planer teilten das Gebäude in Funktionsbereiche auf und ermittelten in diesen jeweils das KGV. Dann überprüften sie die Massen und Ressourcen mit dem zeitlichen Takt. Dabei entstand die Erkenntnis, dass der Wochentakt für Teile der Baustelle zu grob war. Die Taktbereiche wurden in einen Untertakt der Woche geteilt 2 x 2,5 Tage. Damit war die Struktur wieder durchgängig.

Auf Grundlage des Taktbereichplanes entstanden die Gewerkesequenz und der Gewerkezug. In Verbindung mit dem Endfertigstellungstermin wurden die Züge vom Flächenbereitstellungstermin nach vorne gelegt, daraus ergab sich automatisch der Baubeginn

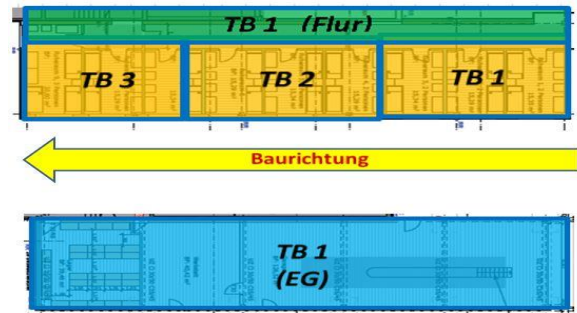


Abb. 4: Taktbereiche und Baurichtung FW DGF

[illegible]

Abb. 5: Gewerkesequenz mit Harmonisierung der Aufwandswerte

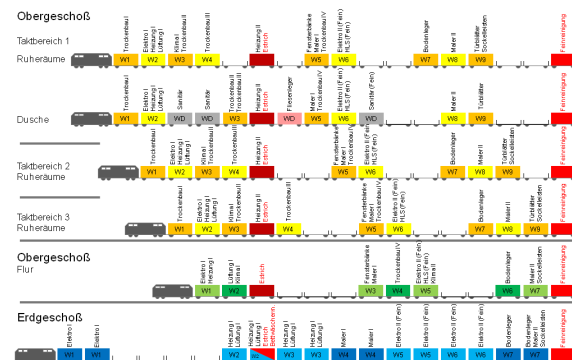


Abb. 6: Gewerkezüge FW DGF

Ergebnisse:

- Reduzierung der Bauausführungszeit (Ausbau) 25%
- Erfüllte Arbeitspakete zum geplanten Taktende 100%
- Statusreport pro Arbeitspaket für Termine, Qualität, Sicherheit 5 Bewertungen/ Takt
- Mehraufwand Besprechungen und Koordination 0%
- Behinderungsanzeigen 0

Abb. 7: Taktplan FW DGF

- Allgemeine Strukturen von Lean Construction für den Auftraggeber
- Takteinheit - einheitliches Reporting projektübergreifend
- Kennzahlen ermitteln aus der Reportingstruktur
- Betreuung weiterer Pilotprojekte mit Lean Construction



- TB1 / W4 / Maler 1 / 1-5 / -6 / ____

Takenzeit

T Q S	T Q S	T Q S	T Q S	T Q S	T Q S
☐	☐	☐	☐	☐	☐
☐	☐	☐	☐	☐	☐
☐	☐	☐	☐	☐	☐

Morgen Dienstag Mittwoch Donnerstag Freitag Samstag

Gesamt

KW ____

 - ☐ Getaktetes Arbeitspaket
 - ☐ Workable Backlog
 - ☐ Vorplanung nötig („_ Wochen“)

- Schulungskonzept – projekt- und organisationsbezogen
- Grundlagen für nachfolgende Projekte – Standards
- Der Integralplan – Weiterführung der Methodik auf die Planungsphase. Intergration von „agilem Planungsmanagement“ und Scrumprozessen



Durch die strukturierten und angepassten Prozesse an die industrielle Fertigung, ergeben sich passende Schnittstellen zu Zukunftsthemen.

Modularisierung und Gleichteile von Bauteilen und Elementen birgt nach dem Lean Ansatz ein hohes Potential der Verbesserung. Die Verschwendung durch eine nicht benötigte Varianz von Bauteilen wird auf ein Minimum geschrumpft, um die größtmögliche Wertschöpfung für den Kunden zu erreichen. Gerade in Synergie mit BIM kann damit ein hoher detaillierter Vordefinitionsgrad und ein starker Einsatz von Fertigteilen bzw. vorgefertigten Elementen erzeugt werden. Bei der Planung ganzer Baugruppen können komplette vorgefertigte Module am Markt abgefragt werden, was den industriellen Fertigungsgrad noch erhöht. Die Kosten per Bauteil und die Reduzierung der notwendigen Montagezeit auf der Baustelle, wie die genauere

Vorhersage von Montagezeiten, wirkt sich sehr positiv auf die Bauzeit und die Kosten aus.

Industrie 4.0 und RFID-Technik

Sowohl in der Baulogistik, wie auch im Betrieb, als auch im Zusammenspiel mit der Produktion, werden aktive und passive RFID Chips in naher

Zukunft einen wertvollen Beitrag zur Erhöhung der Baueffizienz und damit auch zur Ressourceneffizienz beitragen. Damit können Qualitäten, wie auch Kosten und Termineffekte deutlich sicherer erreicht werden.

Literaturverzeichnis

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Drees & Sommer Consulting (2014): Schulungsunterlagen Lean Construction Management
2. Gehbauer, F. (2007): Lean Management im Bauwesen –Grundlagen-
3. Gehbauer, F. (2007): Was bedeutet Lean Construction?
4. Glatz, G. (2001): Organisation gestalten, Weinheim Basel. Beltz-Verlag
5. Gloger, B. (2011): Scrum – Produkte zuverlässig und schnell entwickeln. München. Carl Hanser Verlag
6. Jochum, E. (2002) in: Bungard, W. / Kohnke, O. (Hrsg): Zielvereinbarungen erfolgreich umsetzen. 2. Auflage. Wiesbaden. S. 67- 90
7. Ohno, T. (2013): Das Toyota Produktionssystem, Frankfurt am Main. Campus Verlag GmbH
8. Porsche Consulting (2014): Schulungsunterlagen Lean Construction
9. Schuh, G. (Hrsg.) (2013) Lean Innovation. Berlin. Springer-Verlag
10. Syska, A. (2006): Produktionsmanagement. Das A-Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute. 1. Auflage. Wiesbaden. Gabler
11. Töpfer, A. (2008): Lean Six Sigma. Berlin. Springer-Verlag
12. Womack, J. (2013): Lean Thinking, Frankfurt am Main. CampusVerlag GmbH



Autor

Janosch Manuel Dlouhy, M. Eng.

PROMOTION BMW AG

INHOUSE BERATUNG BMW AG

MASTERTHESIS BMW AG LEAN CONSTRUCTION

STUDENT AN DER HS AUGSBURG ENERGIE EFFIZIENZ DESIGN

WERKSTUDENT BMW AG

STUDENT AN DER HS AUGSBURG E2D (Bachelor)

FIRMA BAUFRTZ / FORSCHUNG UND ENTWICKLUNGSABTEILUNG

EISENBEIß SOLAR AG / WERKSTUDENT

JAN 2015 - JAN 2017

SEP. 2014 - JAN. 2015

APRIL 2014 - SEP. 2014

MÄRZ 2012 - SEP. 2014

MÄRZ 2013 - MÄRZ 2014

SEP. 2008 - MÄRZ 2012

SEP. 2010 - MÄRZ 2011

JULI 2008 - FEB. 2010

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät für Architektur und Bauwesen,
Fachbereiche EnergieEffizienzDesign; Hochschule Augsburg;

Betreuer Prof. Georg Sahner; Studiengang EnergieEffizienzDesign (E2D)

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

OPTIMIERUNG VON GITTERTRÄGERBEWEHRTEN BALKENDECKEN MIT ZWISCHENBAUTEILEN DURCH VORSPANNUNG

Master's Thesis

Christopher, Fiedler

Balkendecken mit Zwischenbauteilen sind eine seit Jahrzehnten bewährte Bauweise im Bereich der Massivdecken. Sie bestehen aus den gitterträgerbewehrten Deckenträgern, den Zwischenbauteilen und dem auf der Baustelle eingebrachten Ortbeton. Anwendungsgebiet dieser Decken ist heutzutage vor allem die Altbausanierung. Im Bauzustand sind aufgrund der begrenzten Tragfähigkeit und Biegesteifigkeit der Deckenträger i.d.R. im Abstand von etwa zwei Metern Montageunterstützungen erforderlich. Gerade im Bereich der Sanierung können diese sehr aufwändig sein und verursachen teils erhebliche Kosten. Eine bewährte Methode, die Steifigkeit und Tragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen zu steigern, stellt die Verwendung von Vorspannung dar. Es wurde deshalb untersucht, ob und inwieweit sich die zulässigen Montagestützweiten durch eine werkseitige Vorspannung der Deckenträger vergrößern lassen. Besonders interessant ist in diesem Zusammenhang die Kombination aus Vorspannung und Gitterträgerbewehrung. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen der Vorspannung auf Nachweise im Endzustand betrachtet.

Keywords: Balkendecke, Zwischenbauteil, Deckenträger, Gitterträger, Montagestützweite, Ziegel-Einhängedecke, Betonsteindecke, Vorspannung, Deckensanierung

AUSGANGSSITUATION

Bei Balkendecken mit Zwischenbauteilen handelt es sich um ein Montagedeckensystem, das auf der Baustelle aus vorgefertigten Deckenträgern, Zwischenbauteilen und Ortbeton zusammengefügt wird. Dabei bilden die Deckenträger mit den Zwischenbauteilen eine Art verlorene

Schalung. Die Deckenträger bestehen üblicherweise aus je einem Gitterträger mit einer etwa 15 cm x 7 cm großen Betonfußleiste und bilden zusammen mit dem Ortbeton die Deckenbalken im Endzustand. Als Zwischenbauteile sind in Deutschland Ziegel, (Leicht-) Betonsteine oder Porenbetonsteine üblich. Dementsprechend werden die Decken auch als Ziegel-

Einhängedecken (Abb. 1), Betonsteindecken oder Hohlsteindecken bezeichnet. Anwendungsgebiet dieser Decken ist heutzutage vor allem die Altbausanierung. Die geringe Größe der Einzelteile ermöglicht den händischen Transport innerhalb der Gebäude, was zu den Hauptvorteilen dieses Deckensystems zählt. Abhängig von der Art des Zwischenbauteils ergeben sich außerdem Vorteile in Bezug auf Wärmedämmung, Schallschutz oder Brandschutz im Vergleich zu aufwändig zu schalenden Ortbetondecken.

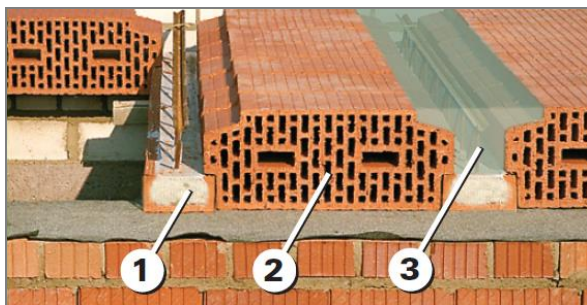


Abb. 1: Ziegel-Einhängedecke, bestehend aus Deckenträger (1), Zwischenbauteil/Deckenstein (2), Ortbeton (3) [1]

Im Bauzustand müssen die Deckenträger das Eigengewicht der Rohdecke und des Ortbetons, sowie Montagelasten aufnehmen und zu den Auflagern bzw. den Montagestützen weiterleiten. Dabei müssen die Abstände zwischen den Montagestützen so gewählt werden, dass weder die Tragfähigkeit der Deckenträger überschritten wird, noch zu große Durchbiegungen auftreten. Bei Verwendung üblicher Gitterträger sind i.d.R. im Abstand von etwa zwei Metern Unterstützungen notwendig. Gerade im Bereich der Sanierung führen Montagestützen jedoch häufig zu Problemen, beispielsweise bei nicht ausreichend tragfähigen Decken unterhalb der zu sanierenden oder wenn eine neue Decke über ein bestehendes, nicht belastbares Gewölbe erstellt werden soll. Außerdem verursachen Montagestützen zusätzliche Kosten und behindern die Bauausführung anderer Gewerke.

IDEE

Eine interessante Möglichkeit, die Tragfähigkeit und die Steifigkeit von Stahlbetonbauteilen zu erhöhen, stellt die Verwendung von Vorspannung dar. Durch eine werksseitige Vorspannung der Deckenträger mit Hilfe von Spannstahllitzen in der Betonfußleiste, könnte die Tragfähigkeit, sowie die Biegesteifigkeit der Deckenträger im Bauzustand gesteigert werden. Größere Montagestützweiten oder sogar unterstützungsfreie Decken wären die Folge. Besonders interessant ist in diesem Zusammenhang die Kombination aus Gitterträger und Vorspannung, da dafür kein analytisches Berechnungsmodell vorliegt.

NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN

In welchem Maß sich die Montagestützweiten durch den Einsatz von Vorspannung vergrößern lassen, wird mit Hilfe numerischer Berechnungen untersucht. Dafür wird zunächst ein geeignetes, dreidimensionales Finite-Elemente Modell des Deckenträgers entwickelt, um das Trag- und Verformungsverhalten im Bauzustand realistisch abbilden zu können. (Abb. 2)

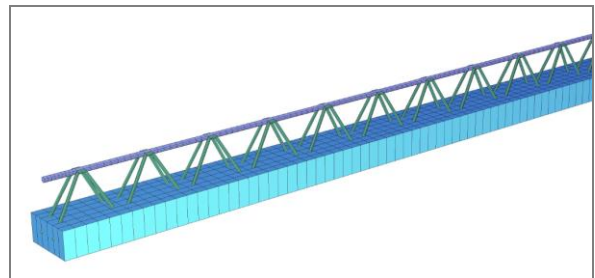


Abb. 2: Finite-Elemente Modell eines Deckenträgers

Die Berechnung erfolgt nichtlinear, um die Rissbildung der Betonfußleiste, sowie das Ausknicken des Gitterträgerobergurtes im Moment des Versagens korrekt abzubilden. Anhand vorhandener Versuchsergebnisse [2] der Firma Filigran Trägersysteme GmbH wird das Modell für Deckenträger ohne Vorspannung kalibriert. Nach der Implementierung der Vorspannung in das Modell, erfolgt die Berechnung verschiedener Deckenträger-

varianten, um den Einfluss einzelner Parameter untersuchen zu können.

Basierend auf diesen Ergebnissen werden maximal mögliche Montagestützweiten für vorgespannte Deckenträger ermittelt.

ERGEBNISSE

Mit Hilfe des entwickelten Finite-Elemente Modells lässt sich das Trag- und Verformungsverhalten gitterträgerbewehrter Deckenträger ohne Vorspannung realitätsnah abbilden, was der Vergleich mit Versuchsergebnissen der Firma Filigran Trägersysteme GmbH bestätigt hat. Das numerische Modell erscheint daher geeignet, die Auswirkungen der Vorspannung zu untersuchen.

Es hat sich gezeigt, dass die Aufbringung einer Vorspannung zu erheblichen Vorteilen im Montagezustand führt. Bei schlaff bewehrten Deckenträgern kommt es bereits im Bauzustand zu einer Rissbildung in der Betonfußleiste und damit zu einem deutlichen Abfall der Biegesteifigkeit. Die verringerte Biegesteifigkeit führt zu verhältnismäßig geringen Montagestützweiten, da sich andernfalls zu große Durchbiegungen ergeben würden. Ein weiterer Grund für die geringen Montagestützweiten ist die begrenzte Momententragfähigkeit der Gitterträger. Bei zu großen Stützenabständen käme es zu einer Überlastung der Gitterträger und die Deckenträger würden durch Ausknicken des Obergurts versagen.

Durch die Vorspannung wird die Rissbildung unter Gebrauchslast und der damit verbundene Steifigkeitsabfall vermieden, wie die berechnete Momenten-Durchbiegungskurve (Abb. 3) zeigt. Entsprechend beträgt die Biegesteifigkeit des vorgespannten Trägers nahezu das Doppelte des nicht vorgespannten Trägers. Die höhere Biegesteifigkeit führt zu einer Reduzierung der Verformungen, weshalb die Vorspannung größere Montagestützweiten ermöglicht, ohne

die zulässige Durchbiegung im Bauzustand zu überschreiten.

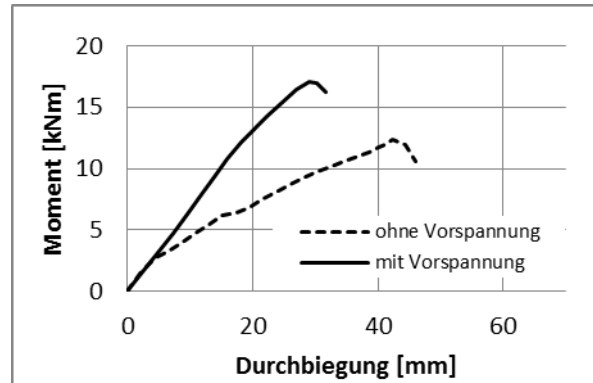


Abb. 3: Momenten-Durchbiegungskurve eines Deckenträgers im Biegeversuch mit und ohne Vorspannung

Zudem kommt es zu einer Steigerung der Momententragfähigkeit um bis zu 40 % (Abb. 3). Ursache dafür sind zum einen die exzentrisch angeordneten Spannstahlilitzen, die ein negatives Moment erzeugen, was den äußeren Einwirkungen entgegen wirkt. Somit werden die Spannungen im Gitterträger reduziert und die Belastung kann durch eine Vergrößerung der Montagestützweiten gesteigert werden, ohne den Gitterträger zu überlasten. Die zweite Ursache für die höhere Momententragfähigkeit der vorgespannten Deckenträger ist die Tatsache, dass das Aufreißen der Fußleiste über die komplette Höhe vermieden wird, wodurch sich der Beton bis zum Versagen am Lastabtrag beteiligen kann. Dadurch wird ebenfalls die Belastung des Gitterträgers reduziert und es kommt erst bei einer höheren Belastung bzw. größeren Montagestützweiten zum Versagen durch Ausknicken des Obergurts.

Insgesamt ermöglichen die höheren Biegesteifigkeiten und Momententragfähigkeiten der vorgespannten Deckenträger deutlich größere Montagestützweiten im Vergleich zu schlaff bewehrten Trägern. Bei Verwendung steifer Gitterträger mit 16 mm starken Obergurten wirkt sich die Vorspannung besonders deutlich aus. Abb. 4 zeigt beispielsweise mögliche Montagestützweiten üblicher Ziegel-Einhängedecken bei Verwendung von Gitterträgern mit 16 mm starkem Obergurt. Dabei zeigt sich, dass

unterstützungsfreie Decken mit einer Spannweite von bis zu 5 m realistisch sind. Das entspricht einer Steigerung von über 30 % gegenüber denselben Deckenträgern ohne Vorspannung. Im Vergleich zu den üblichen, schlaff bewehrten Deckenträgern mit lediglich 10 mm starken Gitterträgerobergurten und etwa 2 m Montagestützweite, entspricht dies sogar einer Steigerung von 150 %.

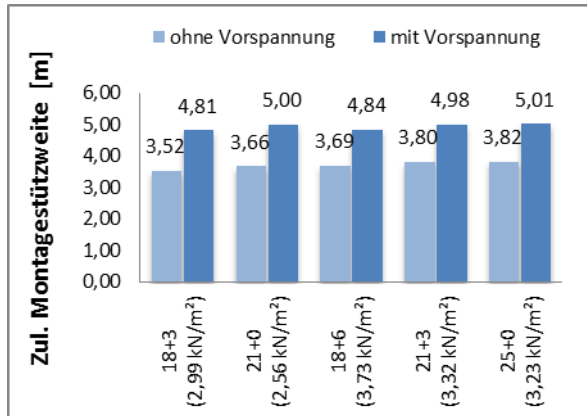


Abb. 4: Auswirkungen der Vorspannung auf die Montagestützweiten von Ziegel-Einhängendecken bei Verwendung von Gitterträgern mit Obergurt Ø16 mm

Mit Montagestützweiten von 5 m könnte ein Großteil dieser Decken unterstützungsfrei oder mit maximal einer Unterstützung hergestellt werden.

Das entwickelte Bemessungskonzept berücksichtigt die Vorspannung sowohl im Montage-, als auch im Endzustand. Speziell wurde auch auf die Berechnung der Durchbiegung unter Berücksichtigung zeitabhängiger Einflüsse, wie Kriechen, Schwinden und Relaxation eingegangen.

WIRTSCHAFTLICHKEIT

Um die Montagestützweiten von Balkendecken mit Zwischenbauteilen von etwa 2 m auf 5 m durch den Einsatz von Vorspannung in Kombination mit besonders steifen Gitterträgern zu vergrößern, entstehen im Wesentlichen Mehrkosten durch den erforderlichen Spannstahl und den größeren Stahlquerschnitt der steiferen Gitterträger. Da die höhere Zugfestigkeit des

Spannstahls für Nachweise im Endzustand angesetzt werden kann, wirkt sich das bessere Verhältnis von Kosten zu aufnehmbarer Spannung des Spannstahls im Vergleich zu Betonstahl positiv aus. Dadurch wird ein Teil der Mehrkosten für die steiferen Gitterträger kompensiert. Durch eine rationelle Fertigung auf langen Spannbahnen kann der zusätzliche Arbeitsaufwand für den Spannvorgang minimiert werden. Insgesamt ergeben sich in etwa Mehrkosten in Höhe von 5 €/m².

Der Marktpreis für unterstützungsfreie Balkendecken mit speziellen Gitterträgern, sog. V-Gitterträgern, liegt etwa 15 - 20 €/m² über dem Preis für übliche, zu unterstützende Balkendecken. Im Vergleich dazu stellt die Anwendung von Vorspannung ein wesentlich wirtschaftlicheres Verfahren dar, große Montagestützweiten zu ermöglichen.

Aufgrund der verhältnismäßig geringen Mehrkosten, könnten vorgespannte Deckenträger nicht nur zur Anwendung kommen, wenn keine Montageunterstützung möglich ist, sondern auch als wirtschaftliche Alternative zu üblichen Balkendecken. Mit diesem System müssten wesentlich weniger Montagestützen auf der Baustelle vorgehalten werden und die Arbeitszeit für das Aufstellen und den Abbau der Stützen könnte deutlich reduziert werden.

FAZIT

Die Verwendung von Vorspannung stellt eine interessante Möglichkeit dar, kostengünstig die Montagestützweiten von Balkendecken mit Zwischenbauteilen zu vergrößern. Durch die Kombination von Gitterträger und Vorspannung ergeben sich hohe Tragfähigkeiten und Biegesteifigkeiten bei verhältnismäßig geringem Bauteilgewicht. Die verringerte Anzahl an Montagestützen könnte sowohl zu geringeren Einbaukosten, als auch zu einem beschleunigten Bauablauf führen.

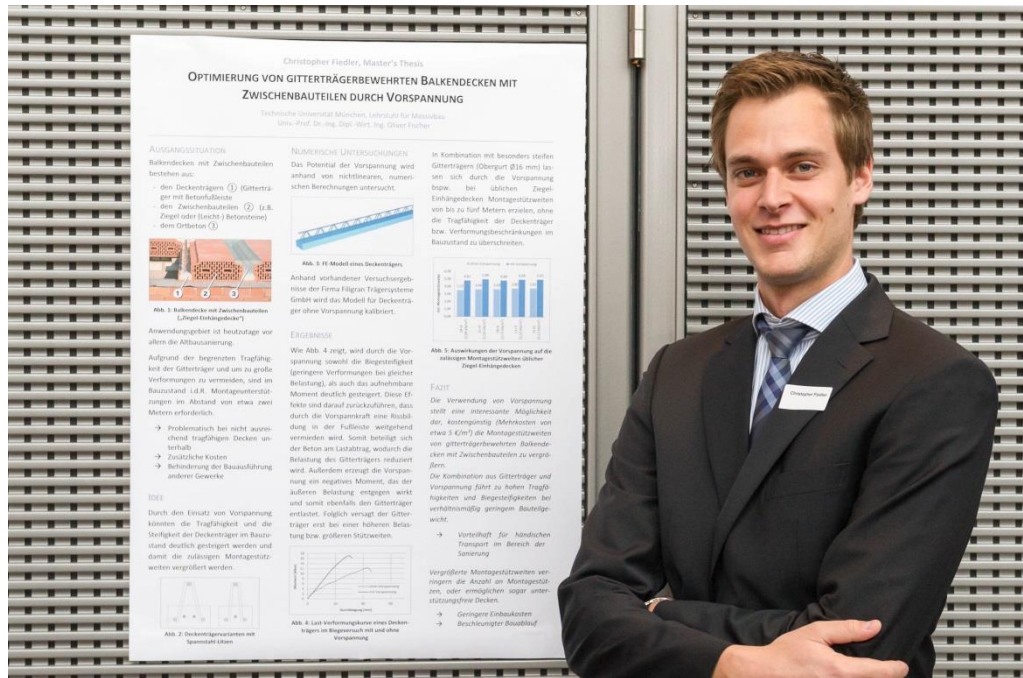
Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Fiedler Deckensysteme: Info Ziegel-Einhängedecken. Produktbroschüre, Marktredwitz, 2014
- [2]: Hegger, J.; Bertram, G.: Versuche zur Biege- und Querkrafttragfähigkeit von Elementdecken und Balken mit Gitterträgern im Montagezustand
Versuchsbericht 194/2007, Institut für Massivbau RWTH Aachen, 12.12.2007 (unveröffentlicht)

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Bertram, G.; Furche, J.; Hegger, J.; Bauermeister, U.: Zulässige Montagestützweiten von Elementdecken mit verstärkten Gitterträgern.
In: Beton-und Stahlbeton 106 (2011), Heft 8, S. 540 – 550, Ernst & Sohn, Berlin
2. Empelmann, M.; Henke, V.; Sender, Ch.: Eine Alternative zu weit gespannten Plattendecken
Vorgespannte Elementdecken mit großer Montagestützweite
In: BFT-International 75 (2009), Heft 3, S. 4-11, Bauverlag, Gütersloh
3. Hegger, J.; Bertram, G.: Versuche zur Biege- und Querkrafttragfähigkeit von Elementdecken und Balken mit Gitterträgern im Montagezustand
Versuchsbericht 194/2007, Institut für Massivbau RWTH Aachen, 12.12.2007 (unveröffentlicht)
4. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Filigran-D-Gitterträger, Filigran-DH-Gitterträger, Filigran-E-Gitterträger und Filigran-EH-Gitterträger für Balken-, Rippen- und Plattenbalkendecken mit Betonfußleisten oder Fertigplatten.
Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-15.1-148, 1. Januar 2014
5. Fingerloos, F.; Hegger, J.; Zilch, K.: EUROCODE 2 für Deutschland. Beuth, Berlin, 2012



Autor

Christopher Fiedler

- 2015 M.Sc. (Bauingenieurwesen); Technische Universität München
- 2012 B.Sc. (Bauingenieurwesen); Technische Universität München
- 2009 Allgemeine Hochschulreife; Otto-Hahn-Gymnasium Marktredwitz

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Massivbau der TU München, Professor Oliver Fischer, Betreuerin Dipl.-Ing. (FH) Julia Sauer M.Sc.

Die Arbeit wurde mit dem 2. Preis ausgezeichnet.

BEITRAG ZUR BEMESSUNG LIEGENDER VERBUNDDÜBEL-LEISTEN IN ULTRAHOCHLEISTUNGSBETON (UHPC)

Master's Thesis

Josef Landler, M.Sc.

Die Entwicklung des Ultrahochleistungsbetons birgt in wirtschaftlicher und ökologischer Hinsicht große Potenziale für die Anwendung sehr schlanker und filigraner Platten und Scheiben. Derartig dünnwandige Konstruktionsbauteile ermöglichen eine deutliche Reduktion der Querschnittsabmessungen sowie eine erhöhte Dauerhaftigkeit bei gleicher Tragfähigkeit. Die Bauteilverbindungen zwischen den im Fertigteilwerk hergestellten Elementen und anderen Bauteilen auf der Baustelle (Stützen, Decken usw.) müssen ebenfalls dementsprechend filigran ausgeführt werden. Die hohen Tragfähigkeiten dieser Bauteile aus UHPC bewirken einen Anstieg der Anforderungen an die Verbundmittel zur Übertragung der größeren Schubkräfte auf andere Bauteile. Klassische Kopfbolzendübel stoßen aufgrund erhöhter Anforderungen an Duktilität und Steifigkeit schnell an ihre Grenzen, weshalb vermehrt in den Steg eines Stahlprofils geschnittene Verbunddübelleisten Anwendung finden. Der vorliegende Beitrag zeigt die Ergebnisse numerischer Untersuchungen zum Tragverhalten liegender Verbunddübelleisten in schlanken Scheiben aus UHPC sowie einen Bemessungsansatz derartiger Verbundmittel für den praktischen Einsatz.

Keywords: Verbunddübelleisten, Verbundbau, Ultrahochleistungsbeton, UHPC, kontinuierliche Verbundmittel, modulare Bauweise, Fertigteil

Thematische Einführung

Der Einsatz von Ultrahochleistungsbeton ermöglicht die Erstellung hochtragfähiger und zugleich filigraner Verbundkonstruktionen mit geringem Materialeinsatz. Dabei wird eine deutliche Reduktion des Materialverbrauchs und des Bauteilgewichts erreicht, was sich letztendlich vorteilhaft auf die Materialkosten und insbesondere im Fertigteilbau auf die Montage und die Transport-

möglichkeiten auswirkt. Vorgefertigte Elemente, wie beispielsweise Wandscheiben mit Stärken bis 60 mm, ermöglichen dann ein modulares Baukastensystem (vgl. Abb. 1).

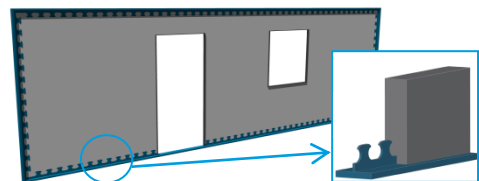


Abb. 1: Wandelement mit umlaufender Verbunddübelleiste als Verbindungselement an weitere Bauteile

Derartige filigrane Bauweisen sowie die erhöhte Tragfähigkeit des Verbundquerschnitts aus hochfesten Werkstoffen führen jedoch zu einem Anstieg der Anforderungen an die Schlankheit und Tragfähigkeit der Verbundmittel zur Übertragung der größeren Schubkräfte. Während klassische Kopfbolzendübel nicht die Anforderungen an Steifigkeit und Duktilität in hochfesten Betonen erfüllen, kommen zunehmend aufgeschweißte oder in den Steg eines Stahlprofils geschnittene Verbunddübelleisten zur Anwendung. Diese werden bereits im Fertigteilwerk in die UHPC-Elemente einbetoniert. Eine Verbindung zu anderen Bauelementen erfolgt dann mittels Verschweißen, Verschrauben oder mit einem Stecksystem. Verbunddübelleisten weisen darüber hinaus auch fertigungstechnische und wirtschaftliche Vorteile auf, da sie direkt in das Stegblech geschnitten oder gebrannt werden können, weshalb der zeit- und energieaufwändige Schweißvorgang entfällt.

Frühere Untersuchungen zu Verbunddübelleisten in UHPC-Platten („stehende“ Anordnung“, Abb. 2) zeigten, dass Verbunddübelleisten in Ultrahochleistungsbeton neben hohen Tragfähigkeiten auch ein ausgezeichnetes Verformungsvermögen aufweisen [1]. Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Verbunddübelleisten in dünnen UHPC-Wandelementen mit nur wenigen Zentimetern seitlicher Betondeckung („liegende“ Anordnung, Abb. 2) wurden bisher jedoch noch nicht durchgeführt.

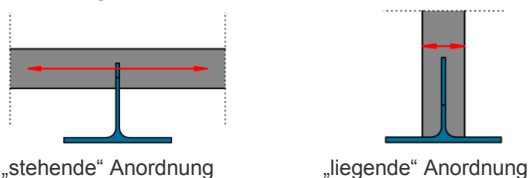


Abb. 2: Wirkungsweise von Verbunddübelleisten

Um das Trag- und Verformungsverhalten von „liegenden“ Verbunddübelleisten mit Klothoidenform in dünnen Betonelementen aus UHPC mit sehr geringer seitlicher Betondeckung zu prüfen, wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen in Form von Push-Out Versuchen (Abscherversuche, Abb. 3) durchgeführt.

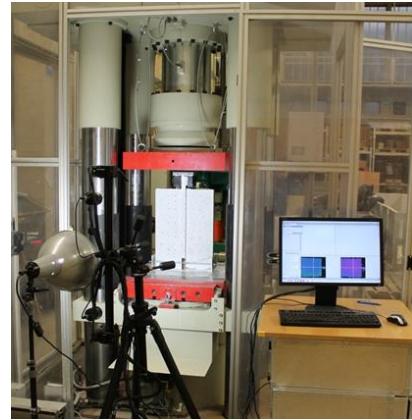


Abb. 3: Versuchsstand der Push-Out Versuche am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München

Das Ziel der Master's Thesis bestand darin, ein zutreffendes numerisches Modell auf der Grundlage der experimentell durchgeführten Push-Out-Versuche mit dem Programmpaket ABAQUS zu entwickeln. Im Anschluss an die Kalibrierung des Modells wurden anhand von Parameterstudien zahlreiche Einflüsse untersucht, wie beispielsweise die Beton-/ Stahlfestigkeiten, Blech- oder Betonscheibendicke sowie der Einfluss einer Bewehrung auf das Trag- und Verformungsverhalten. Die Ergebnisse der Parameterstudie in Kombination mit aus der Literatur bekannten Ansätzen ermöglichten schließlich, ein Bemessungskonzept für liegende Verbunddübelleisten in UHPC-Scheiben abzuleiten.

Werkstoff Ultrahochleistungsbeton

Der Werkstoff Ultrahochleistungsbeton besitzt eine besonders dichte, hydraulisch gebundene sehr feine Matrix, welche neben Druckfestigkeiten über 150 N/mm^2 eine sehr hohe Widerstandsfähigkeit gegen mechanische und chemische Angriffe aufweist. Außerdem kennzeichnen ihn Zugfestigkeiten von bis zu 10 N/mm^2 und ein enorm sprödes Nachbruchverhalten. Um trotz dieser hohen Festigkeiten und dem dichten Gefüge dennoch ein duktiles Versagen gewährleisten zu können, werden zumeist 2,0–2,5 Vol.-% Faserbewehrung zugegeben. Hierbei beeinflusst sowohl die Menge, die Verteilung als auch die Orientierung der verwendeten Stahlfasern die mechanischen

Eigenschaften bei Zug- und Druckbeanspruchung. [2]

Materialmodell und Modellierungsaspekte der Push-Out Versuche

Das enorm spröde Verhalten im Nachbruchbereich sowie die klothoidenförmige Geometrie der Verbunddübelleisten führen zu einer hochgradig geometrisch und materiell nicht-linearen Problemstellung. Die Qualität der Ergebnisse einer derartig nichtlinearen numerischen Berechnung wird maßgeblich von den gewählten Materialmodellen beeinflusst. In diesem Zusammenhang spielt insbesondere die korrekte Abbildung des sehr spröden Nachbruchverhaltens von UHPC bei Zug- und Druckbeanspruchung unter Berücksichtigung der Schädigung des Betons eine entscheidende Rolle.

ABAQUS bietet zur korrekten Erfassung des Betonverhaltens das auf der klassischen Plastizitätstheorie beruhende Schädigungsmodell „Concrete Damaged Plasticity“. Anhand einer aufwändigen Kalibrierung konnte dieses an das spröde Verhalten des UHPC's angepasst werden.

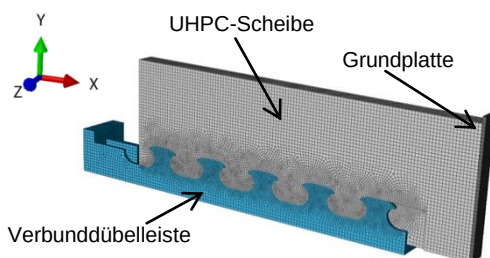


Abb. 4: Numerisches Modell des Push-Out Versuchs

Das verwendete FE-Modell setzt sich aus 3 Bestandteilen zusammen: die Verbunddübelleiste, die UHPC-Scheibe sowie die Grundplatte (vgl. Abb. 4). Die Diskretisierung erfolgte mit achtknotigen, isoparametrischen Kontinuums-elementen mit reduzierter Integration. Die Doppelsymmetrie des Versuchsaufbaus ermöglichte es, lediglich ein Viertelmodell unter Berücksichtigung der entsprechenden Symmetriebedingungen abzubilden, was zu einer

erheblichen Reduktion der Rechenzeit führte. Normalkraft- und Reibungskontaktbedingungen gewährleisteten die Interaktion zwischen diesen drei Elementen.

Auswertung der FE-Berechnungen

Das Ziel bestand darin, nach Möglichkeit alle aus dem Versuchsprogramm ausgewählten Push-Out Versuche mit einer einheitlichen Parameterkonfiguration numerisch abzubilden. Der gesuchte Parametersatz sollte im Mittel über alle Versuche zu der besten Übereinstimmung der Last-Verformungskurve zwischen den tatsächlich durchgeführten Push-Out Versuchen und den Ergebnissen der FE-Berechnung führen. Dies gelang nach zahlreichen Berechnungen sehr zufriedenstellend (vgl. bspw. Abb. 5 bzw. 6).

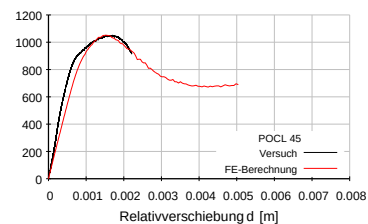


Abb. 5: Last-Verformungskurve eines Körpers mit Betonversagen aus Versuch und FE-Berechnung

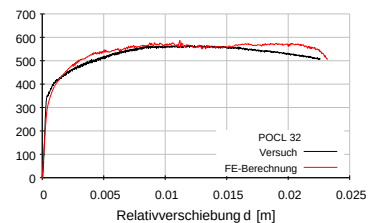


Abb. 6: Last-Verformungskurve eines Körpers mit Stahlversagen aus Versuch und FE-Berechnung

In den durchgeführten Push-Out Versuchen zeigten sich im Allgemeinen drei Versagensmechanismen. Diese gliederten sich in ein Betonversagen, welches sich durch ein Spalten der UHPC-Scheibe in Längsrichtung oder durch ein Abscheren der UHPC-Scheibe äußerte (Abb. 7), und ein Stahlversagen. Das Stahlversagen trat infolge eines Fließens der Verbunddübelleiste im Dübelfußbereich ein. Eine Variation der Materialfestigkeiten des Betons und der Verbunddübelleiste erlaubte eine gezielte Steuerung des Versagensmechanismus. Das entwickelte nu-

merische Modell ermöglicht es, alle drei Versagensarten zutreffend abzubilden: Dies führt zu einem vertieften Verständnis über das Trag- und Verformungsverhalten (vgl. Abb. 7).

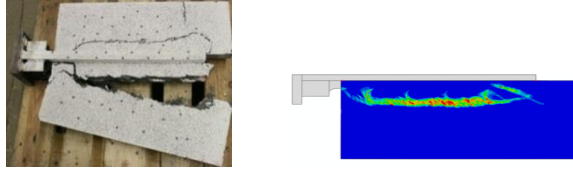


Abb. 7: Vergleich der Schädigung im Versuch und der FE-Berechnung bei einem Abscheren der UHPC-Scheibe

Ableitung von Bemessungsansätzen

Nachdem gezeigt werden konnte, dass das entwickelte Modell das Tragverhalten der Push-Out Versuche zutreffend widerspiegelt, wurden Parameterstudien zur Variation der Materialfestigkeiten sowie der geometrischen Abmessungen vorgenommen, um deren Einfluss auf das Tragverhalten zu erfassen. Anhand der daraus gewonnenen Erkenntnisse sowie Ansätzen aus der Literatur [1], [3] konnte letztendlich für alle drei Versagensarten ein mechanisch begründbarer, halbempirischer Bemessungsansatz hergeleitet werden, der eine zutreffende Abschätzung der Traglast der Verbunddübelstreife in schlanken UHPC-Scheiben ermöglicht. Es ergaben sich folgende drei Bemessungsgleichungen zur Abschätzung der Traglast.

Abscheren:
$$P_{sh} = \eta \cdot ((n + 0.4) \cdot e_x \cdot t_c \cdot f_{ct} - 0.238 \cdot n \cdot t_s \cdot e_x) \cdot f_{ct}$$

Spalten:
$$P_{sp} = \frac{1}{0.25} \cdot \frac{0.18 \cdot e_x^2 + 0.21 \cdot t_c^2}{1 - t_s/t_c} \cdot \omega \cdot f_{ct}$$

Stahlversagen:
$$P_{pl} = A_{ult,k} \cdot \alpha \cdot e_x \cdot t_w \cdot f_y$$

Die Gültigkeit und Qualität der gewonnenen Bemessungsansätze zeigt sich durch einen Vergleich der aus den FE-Berechnungen und den Versuchen gewonnenen Traglasten r_e mit den theoretischen Werten r_t der Bemessungsansätze in einem r_t/r_e -Diagramm (Abb. 6). Es ist klar ersichtlich, dass die experimentell und numerisch ermittelten Traglasten sehr zutreffend durch die

Berechnungsansätze abgeschätzt und wiedergegeben werden können.

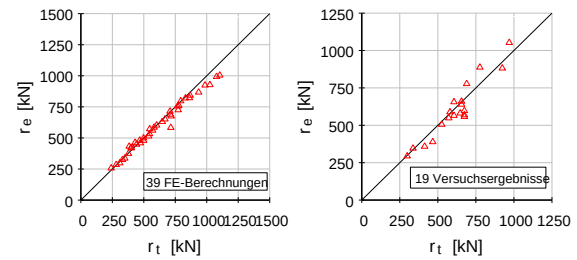


Abb. 8: Korrelation der numerischen Traglasten (li.) und der experimentellen Traglasten (re.) zu den theoretischen Lasten

Tendenziell überschätzen die theoretischen Werte die experimentellen Traglasten (Abb. 8 rechts), da ein Großteil der Versuchswerte unterhalb der Äquivalenzlinie ($r_t = r_e$) liegen. Sie liegen daher etwas auf der unsicheren Seite. Da es sich bei den ermittelten Werten um charakteristische Größen handelt, die in einem weiteren Schritt anhand einer statistischen Auswertung an das erforderliche Sicherheitsniveau angepasst werden müssen, kann diese geringe Abweichung in Kauf genommen werden.

Zusammenfassung und Fazit

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte FE-Modell ermöglicht eine zutreffende Abbildung des Tragverhaltens von Verbunddübelstreifen in schlanken UHPC-Scheiben und führt darüber hinaus zu einem vertieften Verständnis über das Trag- und Verformungsverhalten derartiger Konstruktionen. Die entwickelten Bemessungsansätze können, nach der Sicherstellung des erforderlichen Sicherheitsniveaus, die Grundlage für eine zukünftige allgemeine bauaufsichtliche Zulassung darstellen. Letztendlich lässt sich festhalten, dass zukünftig mit derartigen Fügetechniken der praxisrelevante Einsatz von Ultrahochleistungsbeton verstärkt ermöglicht wird. Durch die Kombination von schlanken Wandscheiben mit Verbunddübelstreifen als Verbindungselemente mit einer Skelettkonstruktion aus beispielsweise Stahl, lässt sich eine modulare Bauweise entwickeln. Die einzelnen Bauteile können dabei durch Schweißen, Schrauben oder Klemmen beliebig miteinander kombiniert werden.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Heinemeyer, S.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern aus ultrahochfestem Beton mit Verbundleisten, Dissertation, RWTH Aachen, 2011.
- [2]: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Sachstandsbericht: Ultrahochfester Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 561, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [3]: Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für Verbunddübelleisten, Zulassungsnummer Nr. Z-26.4-56, Berlin, 13.05.2013

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- 1. Feenstra, P. H.; De Borst, R.: A Composite Plasticity Model For Concrete. International Journal of Solids and Structures, Vol. 33, No. 5, pp. 707-730, 1996
- 2. Lubliner, J.: A Plastic-Damage Model For Concrete. International Journal of Solids and Structures, Vol. 25, no. 3, pp. 299-326, 1989
- 3. Seidl, G.: Verhalten und Tragfähigkeit von Verbunddübeln in Stahlbetonverbundträgern, Dissertation, Technische Universität Breslau, 2009
- 4. Speck, K.: Beton unter mehraxialer Beanspruchung: Ein Materialgesetz für Hochleistungsbetone unter Kurzzeitbelastung. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2007.



Autor

Herr Josef Landler, geb. 1988 in Traunstein, studierte nach seiner Ausbildung zum Bauzeichner in der Fachrichtung Ingenieurbau von 2008 bis 2014 Bauingenieurwesen an der Hochschule München sowie an der Technischen Universität München, welche er als Master of Science verließ. Seit 2014 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer, Betreuer Dipl.-Ing. Thomas Lechner

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

MODELL ZUR STRATEGIEENTWICKLUNG UND LEISTUNGSTIEFENOPTIMIERUNG VON BAUUNTERNEHMEN

Masterarbeit

Fabian Schiebel

In kleinen und mittelständischen Unternehmen wird die langfristige Planung der Unternehmensentwicklung oft vernachlässigt. Um Bauunternehmen dabei zu unterstützen, wird in dieser Arbeit ein praxistaugliches Modell zur Strategiefindung und -umsetzung auf Basis der aktuellen Forschung entwickelt. Schrittweise wird der Anwender durch die Entwicklung einer Strategie bis zur Umsetzung derer geführt. Der Schwerpunkt liegt auf der Leistungstiefenoptimierung, also der Entscheidung zwischen den möglichen Beschaffungsformen. Dafür wird grundsätzlich zwischen der Optimierung auf Gewerke- und der Leistungsebene unterschieden. Je höher der Anteil des Gewerkes am Umsatz des Unternehmens (strategische Bedeutung) und je höher die markttypische Leistungstiefe (Komplexität des Versorgungsmarktes) in dem jeweiligen Gewerk ist, desto eher soll das Gewerk im eigenen Unternehmen ausgeführt werden. In einem zweiten Schritt wird mithilfe einer Kombination einer Kostenvergleichsrechnung und Transaktionskostenanalyse geprüft, ob eine Rückwärtsintegration oder die Reduzierung der Leistungstiefe innerhalb der Gewerke Sinn macht. Anhand des beschriebenen Modells wird eine Strategiefindung und -umsetzung am Beispiel der Schiebel Bauunternehmung GmbH durchgeführt.

Keywords: Strategieentwicklung, Leistungstiefe, Leistungstiefenoptimierung, Kostenvergleichsrechnung, Transaktionskosten, Spezifität, strategische Bedeutung, Kooperationsform

Bedeutung von Strategie

Gemäß einer aktuellen Studie wurde der hohe Einfluss von Strategien auf den Erfolg eines Unternehmens erkannt. Dennoch wird diese langfristige Planung der Unternehmensentwicklung in kleinen und mittelständischen Unternehmen oft vernachlässigt. Ziel dieser

Arbeit war es, ein Modell zur Strategieentwicklung und Leistungstiefenoptimierung für Bauunternehmen zu entwickeln, mit dessen Hilfe ein Teil der Insolvenzen Bauhauptgewerbe verhindert und die Unternehmensziele umgesetzt werden können. Ein besonderer Schwerpunkt des Modells liegt auf der Leistungstiefenoptimierung, also der

Entscheidung zwischen den möglichen Beschaffungsformen.

Nach der Definition der Strategieentwicklung als Sammelbegriff für alle Prozesse, die zur Erstellung und der Fortschreibung der Strategie notwendig sind, wird das Bauhauptgewerbe als Anwendungsbereich des Modells festgelegt. Der Fokus liegt auf den kleinen und mittelständischen Betrieben, die in der stark gegliederten Branche über 99,9% der Unternehmen darstellen und eine für den Zweck der Arbeit eine weitgehend homogene Gruppe darstellen, ohne dass eine starke Eingrenzung vorgenommen werden muss. Für die Messung der Leistungstiefe, die die Strategie wesentlich beeinflusst, werden verschiedene wissenschaftliche Ansätze vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Leistungstiefe als der Quotient aus interner Wertschöpfung und Gesamtleistung des Unternehmens definiert. Die kritische Betrachtung ergibt, dass aus der Leistungstiefe auf Unternehmensebene, wegen der Vielzahl an möglichen Einflussfaktoren, keine Entscheidungen abgeleitet werden können.

Stand der Forschung

Als Grundlage der Arbeit werden Theorien und Methoden aus der Volkswirtschaftslehre, Betriebswirtschaftslehre, Betriebswissenschaft, Fertigungstechnik und Verfahrens-/Prozesstechnik beschrieben, die im Zusammenhang der Strategieentwicklung und Leistungstiefenoptimierung beachtenswert sind und deren Verknüpfung zur Themenstellung hergestellt.

Im Anschluss an die Aufbereitung der wissenschaftlichen Grundlagen werden die später verwendeten Strategiebegriffe erläutert und zueinander in Beziehung gesetzt. Schließlich werden Werkzeuge vorgestellt, die bei der Analyse des Umfelds, der Unternehmensanalyse und der Implementierung der Strategie eingesetzt werden können.

Daraufhin werden die in der Literatur vorhandenen Methoden zum Vergleich von

Leistungstiefen vorgestellt und kritisch beleuchtet. Die Kostenvergleichsrechnung stellt die Fremdbezugskosten den Kosten der Eigenfertigung gegenüber. Mit der Transaktionskostenanalyse werden die Transaktionskosten für strukturelle Entscheidungen aus den Eigenschaften der Leistungen abgeleitet und für die Feinplanung aus der Prozesskostenrechnung ermittelt. Checklisten bzw. Vor- und Nachteilsbilanzen ermöglichen die Berücksichtigung von qualitativen Einflussfaktoren ohne diese zu bewerten. Nutzwertanalysen dienen zur systematischen Bewertung von qualitativen Kriterien, scheitern allerdings an der Festlegung der Gewichtung und Teilnutzen der Kriterien. Schließlich ist es möglich Kennzahlen aus der Praxis durch die Analyse von Projekten zu gewinnen und zu interpretieren.

Entwicklung eines Modells

Da diese Ansätze in der aufgezeigten Form kein taugliches Werkzeug zur Optimierung der Leistungstiefe in der Praxis darstellen, soll ein möglichst transparentes und allgemein anwendbares Modell entwickelt werden. Dafür wird grundsätzlich zwischen der Optimierung auf Gewerke- und der Leistungsebene unterschieden. Zur Ermittlung der idealen Beschaffungsform der Gewerke, werden diese in einer Strategie-Spezifitäts-Matrix aufgetragen. Jedoch lassen sich die Dimensionen strategische Bedeutung, Spezifität, Häufigkeit und Unsicherheit des Gewerks nicht objektiv quantifizieren oder aus bisherigen Untersuchungen ableiten. Deswegen wird das Beschaffungsportfolio nach Kraljic herangezogen. Die Dimension des Ergebniseinflusses bzw. der strategischen Bedeutung wird durch den Anteil des Gewerkes am Umsatz des Unternehmens und die Dimension der Komplexität des Versorgungsmarktes wird durch die typische Leistungstiefe in dem jeweiligen Gewerk quantifiziert.

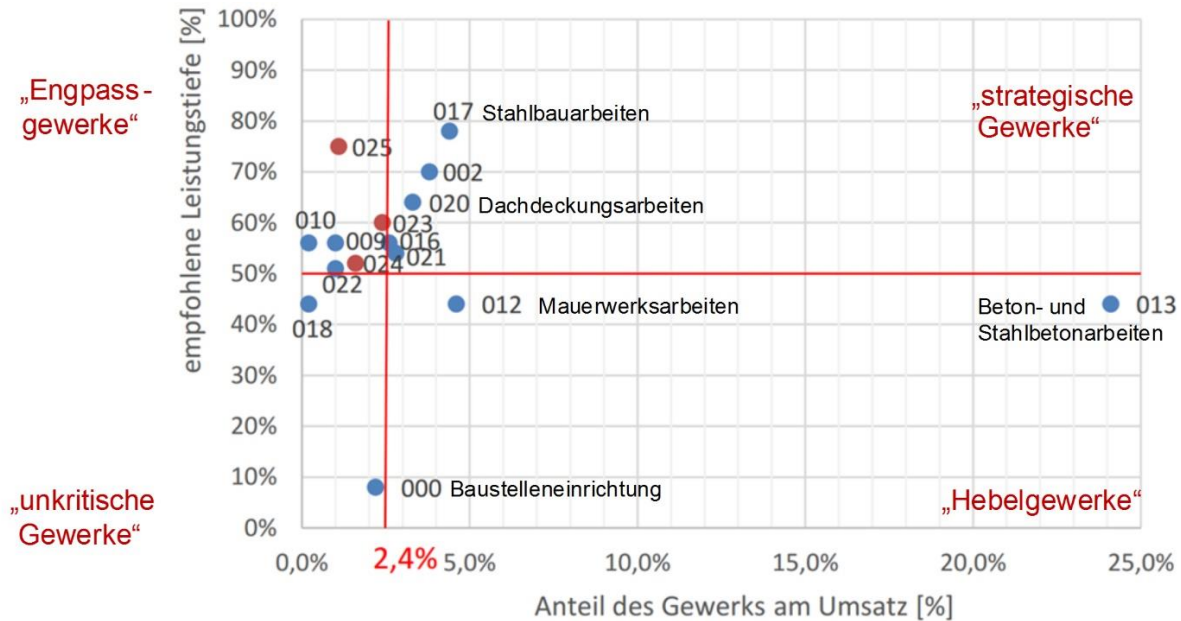


Abb. 1: Matrix zur Entscheidung der Beschaffungsform der Gewerke

Zur Ermittlung dieser typischen Leistungstiefe wurden die Wertschöpfungsketten ausgewählter Gewerke im Roh- und Ausbau in die einzelnen Ressourcen und Leistungen soweit aufgegliedert, bis aufgrund der Break-Even-Menge die Leistung oder das Produkt üblicherweise fremdbeschafft wird. Die Ressourcen und Leistungen werden mit Kosten bewertet und daraus die Leistungstiefe berechnet. Aus der Lage des Gewerks im Beschaffungsportfolio kann eine Normstrategie zur Beschaffung abgeleitet werden.

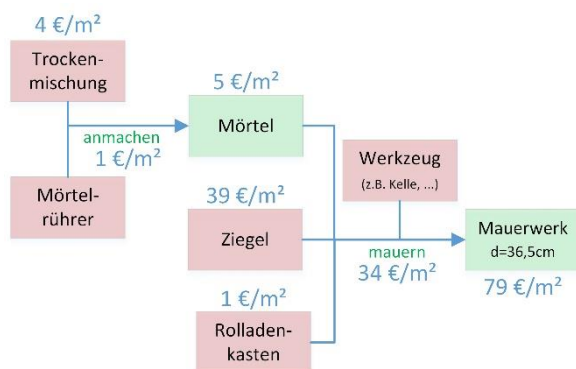


Abb. 2: Wertschöpfungskette des Gewerks „Mauererarbeiten“

Im zweiten Schritt wird mithilfe einer Kombination aus Kostenvergleichsrechnung und Transaktionskostenanalyse geprüft, ob eine Rückwärtsintegration oder die Reduzierung der Leistungstiefe innerhalb der Gewerke sinnvoll ist.

Dabei werden zu den Fremdbezugskosten die in einer für die Nachunternehmervergabe standardisierten Prozesskostenrechnung ermittelten Transaktionskosten addiert und den variablen Eigenerstellungskosten gegenübergestellt.

Im Anschluss wird ein Modell zur Strategieentwicklung in Einzelschritten hergeleitet. Im Schritt 1 werden die Vision und das Leitbild des Unternehmens festgelegt und daraus quantitativ messbare Unternehmensziele abgeleitet. Schritt 2 befasst sich mit der Analyse des Umfelds auf der Ebene des Makroumfelds, der Branche und des Marktes. Für die Analyse des Makroumfelds eignet sich die PESTEL Analyse und das Entwerfen von möglichen Zukunftsszenarien. Auf Branchenebene werden die Wettbewerbskräfte nach Porter analysiert und eine dynamische Branchenstrukturanalyse erstellt. Zur Beurteilung des Marktes wird das Mikroumfeld unter die Lupe genommen und das Marktvolumen bestimmt. Im Schritt 3 werden die strategischen Geschäftsfelder identifiziert und die strategischen Geschäftseinheiten gebildet. Anschließend werden die strategischen Geschäftsfelder in einer Marktwachstums-/Marktanteils-Matrix aufgetragen und der Anteil der Geschäftsfelder am Umsatz und EBIT und

deren Beitrag zum Ergebnis ausgewertet. Eine Notwendigkeit der Gliederung des Umsatzes nach weiteren Markmalen ist im Einzelfall zu entscheiden. Anhand der in den Analysen gewonnenen Informationen wird die Unternehmensstrategie gewählt. Schritt 4 beinhaltet ein Benchmarking zur Enthüllung von Verbesserungspotentialen und eine SWOT-Analyse zur Generierung von Strategiealternativen. Zur Entscheidung für eine Strategie wird eine Nutzwertanalyse herangezogen, mit der sowohl quantitative als auch qualitative Kriterien berücksichtigt werden können. In Schritt 5 wird die gewählte Strategie konsequent für die Funktionsbereiche Produktion, Kooperation und Beschaffung, Marketing, Forschung und Entwicklung, Finanzierung und Personal abgeleitet. Die zuvor entwickelte Methode zur Optimierung der Leistungstiefe wird zur Entwicklung der Kooperations- und Beschaffungsstrategie eingesetzt. Um die Strategie konsequent umzusetzen ist oft eine Reorganisation der Unternehmensstruktur notwendig (Schritt 6). Im letzten Schritt wird eine Balanced Scorecard entwickelt, die zur Implementierung und Kontrolle der Strategie eingesetzt wird.

Strategiefindung und -umsetzung an einem realen Bauunternehmen

Das beschriebene Modell wird schließlich für die Strategiefindung und -umsetzung am Beispiel der Schiebel Bauunternehmung GmbH eingesetzt. Da die Unternehmensziele gut damit vereinbar sind und aus der Analyse des Umfelds und des Unternehmens keine Gründe dagegen sprechen, wird für das Unternehmen eine Wachstumsstrategie festgelegt. Mit Hilfe des Benchmarking und der SWOT-Analyse werden Handlungsalternativen für die einzige Geschäftseinheit herausgearbeitet. In der Nutzwertanalyse stellt sich die Vorteilhaftigkeit der Strategie heraus, die eine Umsatzsteigerung aus der Zunahme des Marktvolumens und einer Marktdurchdringung vorsieht und verstärkt auf Kernkompetenzen und Beziehungen zu

Nachunternehmern setzt. Schließlich wird aus der gewählten Strategie eine konkrete Gestaltung der Funktionsbereiche abgeleitet. Beispielsweise die Beschaffungs- und Kooperationsstrategie sieht vor, dass lediglich die Gewerke Erdarbeiten, Betonarbeiten, Straßen/Wege/Plätze und Stundenlohnarbeiten im Unternehmen ausgeführt werden und die übrigen Gewerke von Nachunternehmern bezogen werden. Innerhalb des Gewerks der Betonarbeiten sollte die Leistungstiefe reduziert werden, indem die Bewehrungsarbeiten ausgelagert werden. Da die neue Strategie eine prozessorientierte Durchführung voraussetzt, wird der Aufbau des Unternehmens reorganisiert. Die individuell für das Unternehmen entwickelte Balanced Scorecard stellt eine Hilfe zur Umsetzung und Kontrolle der Strategie dar.

Die empirische Validierung zeigt, dass die in dem Modell nahegelegte Kooperation mit Nachunternehmern auch in der Praxis zunimmt und bestätigt somit die Plausibilität des Modells. Da die vorgestellte Beschaffungsmatrix bei Gewerken mit niedriger Leistungstiefe nicht immer eine praxistaugliche Erstellungsform zugeordnet werden kann, wird eine modifizierte Beschaffungsmatrix empfohlen, die bei sehr hoher strategischer Bedeutung trotz geringer Leistungstiefe die Eigenfertigung bevorzugt.

Somit kann das Modell als Hilfsmittel zur systematischen Strategieentwicklung für mittelständische Bauunternehmen eingesetzt werden und die für das Unternehmen attraktiven Wertschöpfungsbereiche identifiziert werden. Gemäß dem deutschen Militärstrategen und preußischen General Carl von Clausewitz hat jedoch „nur derjenige Erfolg, der auf strategische Prinzipien setzt, diese aber flexibel in der Praxis anwendet, also weder doktrinär noch rezepthaft oder stur vorgeht“ [1]. Dieses Zitat bekräftigt die Erkenntnis dieser Arbeit, dass es kein Rezept für die optimale Strategie geben kann. Analog zu den „strategischen Prinzipien“, von denen

Clausewitz spricht, tauchen in dieser Arbeit drei Prinzipien immer wieder auf:

- Konzentration auf Kernkompetenzen,
- Ausrichtung auf die Vision und nicht rein auf Umsatz und Rentabilitätskennzahlen,
- Nutzung von Kooperationen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Schleuss, R.: Handbuch der Strategien: 220 Konzepte der weltbesten Vordenker. Frankfurt am Main 2008, S. 54.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Girmscheid, Gerhard: Strategisches Bauunternehmensmanagement: Prozessorientiertes integriertes Management für Unternehmen in der Bauwirtschaft. 2. Auflage. Springer-Verlag, Heidelberg 2010.
2. Johnson, Gerry; Scholes, Kevan; Whittington, Richard: Strategisches Management eine Einführung. 9. Auflage. Pearson Studium, München u.a. 2011.
3. Männel, W.: Die Wahl zwischen Eigenfertigung und Fremdbezug: theoretische Grundlagen, praktische Fälle. 1. Auflage. Poeschel, Stuttgart 1981.
4. Picot, Arnold: Ein neuer Ansatz zur Gestaltung der Leistungstiefe. In: Zfbf Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, Heft 12-1991, S. 336-357.
5. Wildemann, Horst: Leistungstiefentscheidung und -gestaltung bei KMU der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie. 1. Auflage. TCW Transfer-Centrum, München 2005.



Autor

Fabian Schiebel, geboren am 08.03.1989 in Ingolstadt, studierte Master of Science Bauingenieurwesen an der Technischen Universität München und an der University of British Columbia, Vancouver. Parallel dazu schloss er einen Master of Science im Wirtschaftsingenieurwesen an der Technischen Universität München ab.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, Ingenieur fakultät Bau Umwelt Geo an der TU München, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Zimmermann, Betreuer Dipl.-Ing. Christoph Gottanka.

Die Arbeit wurde mit dem 1. Preis ausgezeichnet.

GRINDING – EINE LÄRMARME BETONTEXTUR

Bachelorarbeit

Maria Schmidmayer

Aufgrund stark anwachsender Verkehrsbelastungen wird derzeit an einer Optimierung von Fahrbahntexturen gearbeitet. Das Ziel dieser Arbeit ist, das Grinding-Verfahren ausführlich zu beschreiben, welches in Längsrichtung ausgeführt einen erheblichen Beitrag zur Lärmreduzierung leisten kann. Eine Grinding-Oberfläche wird durch Abschleifen bereits erhärteter Betondecken mittels Diamantschleifscheiben hergestellt. Durch diesen Vorgang wird vor allem eine hohe Lärminderung und Griffigkeit erzeugt. Ein Vergleich mit der derzeitigen Regelbauweise Waschbeton zeigte, dass Grinding kostengünstiger und einfacher in der Herstellung ist. Zudem wurde auf einer 2009 in Geseke errichteten Grinding-Oberfläche eine Verringerung des Lärmpegels um -2 dB(A) gegenüber einer Waschbetontextur erzielt. In Zukunft kann durch weitere Optimierungen der Grinding-Textur eine Lärminderung bis zu -5 dB(A) erreicht werden [1].

Keywords: Grinding, Betontextur, Fahrbahntexturen, Lärmreduzierung, Lärminderung, Waschbeton, Betondecken

Bedeutung von Grinding

Stark anwachsende Verkehrsbelastungen stellen große Anforderungen an die Lärmreduzierung einer Straße. Zur Minderung des Verkehrspegels wurde in Deutschland 2006 die Waschbetontextur mit einem D_{Stro} -Wert von -2 dB(A) als Regelbauweise für lärmreduzierende Betondecken eingeführt. Um eine weitere Verringerung des Lärmpegels zu erreichen wird an einer Optimierung der Fahrbahntextur hinsichtlich Form und Geometrie gearbeitet. Das Grinding-Verfahren kann einen erheblichen Beitrag zur Problematik der Lärmreduzierung

leisten. Mit dieser Methode wird es in Zukunft möglich sein durch exakte Bearbeitung der Oberfläche eine Lärminderung bis zu -5 dB(A) zu erzielen [1].

Herkunft und technische Ausführung

Grinding stammt ursprünglich aus den USA und wurde dort zum ersten Mal 1965 vermutlich zur Verbesserung der Rutschfestigkeit und Ebenheit einer Betondecke eingesetzt. In den vergangenen Jahren wurden in verschiedenen Forschungsprojekten ausgezeichnete schallmin-

dernde Eigenschaften bei längstexturierten Grinding-Oberflächen herausgefunden.

Eine Grinding-Fahrbahndecke wird über ein abtragendes Schleifverfahren auf erhärteten Betondecken hergestellt. Dabei werden auf einer sich drehenden Welle befestigte Diamantschleifscheiben eingesetzt. Diese Schleifscheiben setzen sich aus einem 2,7 mm dicken Blattkern und 2,5 bis 3,2 mm dicken Schleifsegmenten zusammen (Abbildung 1). Mittels Distanzscheiben zwischen jedem Paar von Schleifscheiben wird deren Abstand zueinander bestimmt [1] [2].

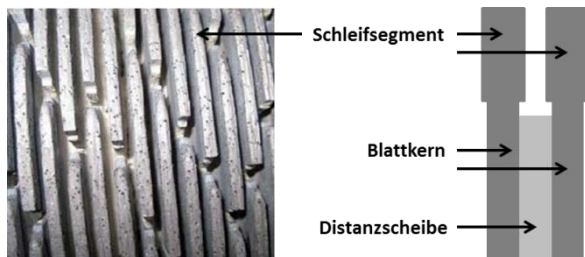


Abbildung 1: links: Grindingwelle; rechts: schematischer Aufbau einer Schleifscheibe mit Distanzscheiben als Abstandhalter [2]

Die Oberflächengestalt einer Grinding-Texturierung setzt sich aus Stegen und Rillen zusammen, die gemeinsam betrachtet die Textur der Fahrbahndecke bilden. Die Rillenbreite wird dabei vor allem durch die Dicke der Distanzscheibe, die Stegbreite durch die Dicke der Diamantscheiben festgelegt [2].



Abbildung 2: Grinding-Textur [1]

Vor- und Nachteile des Verfahrens

Eine Grinding-Textur zeichnet sich vor allem durch eine hohe Lärminderung über die gesamte Nutzungszeit aus. Bei optimierter Ausführung soll der Schallpegel zukünftig um –5 dB(A) reduziert werden können. Darüber hinaus

weisen Oberflächen, die mit dem Grinding-Verfahren bearbeitet wurden, eine sehr gute Griffigkeit auf. Zudem können mit diesem Schleifverfahren sehr ebene Oberflächen mit guter Fahrdynamik, angenehmem Fahrkomfort und guter Drainagewirkung erzeugt werden. Außerdem ist der Herstellungsprozess einfach, preisgünstig und witterungsunabhängig [1].

Vorteile einer Grinding-Oberfläche:

- Lärminderung bei optimierter Ausführung bis zu –5 dB(A)
- Sehr gute Griffigkeit
- Ausgezeichnete Ebenheit durch zielgerichtetes Abschleifen und somit gute Fahrdynamik und angenehmer Fahrkomfort
- Gute Drainagewirkung und dadurch hohe Verkehrssicherheit
- Einfache, preiswerte und witterungsunabhängige Herstellung

Ein Nachteil ist, dass teilweise ein unkontrolliertes Brechen der Stege auftritt, das sich negativ auf das Rollgeräusch auswirkt [1].

Vergleich mit anderen Betontexturen

Grinding stellt eine bedeutsame Alternative zu bisher eingesetzten Betontexturen dar. Daher wird ein Vergleich mit einer Waschbeton-, Jutetuch- und Kunstrasentexturierung besonders hinsichtlich Lärmreduzierung und Griffigkeit hergestellt.

Waschbeton ist mit einem D_{Stro} -Wert von –2 dB(A) zur Reduzierung des Rollgeräuschs vorteilhaft und ist derzeit als Regelbauweise für lärmarme Oberflächentexturen aus Beton festgelegt. Auf einer Versuchsstrecke zur Erforschung der Grinding-Textur in Geseke/Deutschland wurde eine

Lärmreduzierung von –2 dB(A) gegenüber Waschbeton erreicht. Eine Grinding-Oberfläche weist somit bei gleich guter Griffigkeit eine höhere Lärminderung als Waschbeton auf [1]. Eine Jutetuch-Textur war bis 2006 mit einem Wert von –2 dB(A) als Regelbauweise zur Lärminderung von Betondecken festgelegt, wurde

aber wegen schlechter Griffigkeit durch den Waschbeton ersetzt. Eine Jutetuch-Oberfläche ist nicht zur Lärminderung und nicht für Verkehrsflächen mit hoher Griffigkeitsanforderung geeignet. Daher ist das Grinding-Verfahren deutlich vorteilhaft gegenüber dem Jutetuch-Verfahren [3] [4].

Bei einer Kunstrasen-Textur steigt das Rollgeräusch mit der Zeit an und die Griffigkeit nimmt ab. Deshalb ist eine Grinding-Textur gegenüber einer Oberfläche aus Kunstrasen zu bevorzugen [4]. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht dieses Vergleichs.

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Texturierungen

Textur	Lärmreduzierung	Griffigkeit
Grinding	Sehr gut	Sehr gut
Waschbeton	Gut	Sehr gut
Jutetuch	Schlecht	Schlecht
Kunstrasen	Zu Beginn gut, dann schlechter werdend	Zu Beginn gut, dann schlechter werdend

Messverfahren zur Bestimmung des Lärmpegels

Bei den Messverfahren zur Bestimmung des Lärmpegels wird zwischen der Fernfeldmethode SPB sowie den Nahfeldmethoden CPX und OBSI unterschieden. Bei der statistischen Vorbeifahrtmethode SPB wird für eine hinreichend große Anzahl an Fahrzeugen unterschiedlicher Kategorien der Maximalwert zusammen mit der gefahrenen Geschwindigkeit gemessen. Aus diesen Messwerten lässt sich über eine lineare Regression der mittlere Vorbeifahrtpegel bestimmen. Bei einer Nahfeldmessung wird durch an Messreifen montierte Mikrofone alle 20 m der durch den Reifen/Fahrbahn-Kontakt entstehende mittlere Schallpegel bestimmt [5].

Praxisbeispiele

Die im Folgenden aufgeführten Praxisbeispiele in Deutschland (Geseke, A 94), in den USA und in Australien (New South Wales, Sydney) können aufgrund der unterschiedlichen Messverfahren nicht direkt miteinander verglichen werden.

Auf der Erschließungsstrecke Geseke der Heidelberg Cement AG wurde 2009 erstmalig in Deutschland eine Betondecke mit dem Grinding-Verfahren bearbeitet. Das Ziel war, eine Grinding-Texturierung auf einer neugebauten Strecke hinsichtlich ihres Potentials zur Lärminderung bei gleichzeitiger Betrachtung der Rutschfestigkeit zu erproben. Dazu wurde die Versuchsstrecke in zwei Abschnitte mit jeweils verschiedenen Stegbreiten (2 mm und 3 mm) gegliedert. Die Schleifscheibenbreite betrug dabei 3,2 mm und die Schleiftiefe 3 mm (Abbildung 3).

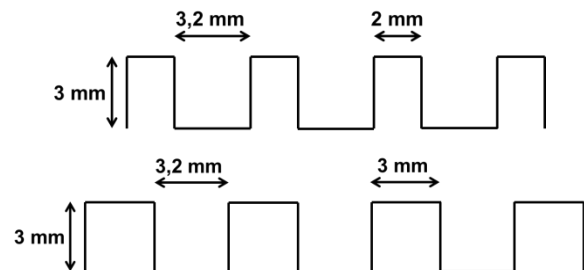


Abbildung 3: Grinding-Textur in Geseke schematisch

Der CPX-Messwert der 2 mm-Textur war um $-5,6 \text{ dB(A)}$, der Wert der 3 mm-Textur um $-4,1 \text{ dB(A)}$ geringer als der CPX_{PKW} -Referenzwert von $100,5 \text{ dB(A)}$. Durch eine sehr homogene Textur und einen stetigen Stegbruch wies die 2 mm-Textur niedrigere Lärmemissionen als die 3 mm-Textur auf [1] [6]. Auf der A 94 in Forstinning bei München erfolgte aufgrund der positiven Erfahrungen in Geseke die Herstellung einer weiteren Grinding-Oberfläche. Ein je 2 km langer Abschnitt wurde in Fahrtrichtung Passau mit einer Breite der Schleifscheiben von 2,8 mm und in Fahrtrichtung München mit einer Breite von 3,2 mm bearbeitet. Im Vergleich zu Geseke wurde auf der A 94 bei gleichbleibendem Scheibenabstand von 2,2 mm die Scheibenbreite verändert. Dabei betrug die

durchschnittliche Abtragtiefe 4 mm. Das Ziel dieses Bauabschnittes war, die Lärminderungseigenschaften der Grinding-Textur zu ermitteln. Aufgrund der durchgeführten CPX-Messungen zeigte sich, dass die 3,2 mm-Textur einen höheren Schalldruckpegel als jene mit 2,8 mm Scheibenbreite erzeugte. Nach 7 Monaten gingen die Lärmemissionen aufgrund der durch den Verkehr geglätteten Oberfläche zurück [1] [7].

Zur Optimierung einer Grinding-Oberfläche bezüglich der Lärmemissionen wurde in den USA von 2005 bis 2008 ein Forschungsprojekt der Purdue University durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass ein unkontrolliertes Brechen der Stege das Rollgeräusch deutlich verstärkte. Infolgedessen wurde eine mit speziellen geometrischen Abmessungen ausgeführte Textur entwickelt, bei der sich kein unkontrolliertes Brechen einstellt. Diese sogenannte Next Generation Concrete Surface (NGCS) wird durch eine Stegbreite von 12,5 mm definiert. Auf die Oberfläche der Stege werden sehr feine Rillen geschliffen (Abbildung 3).

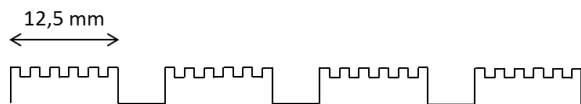


Abbildung 4: NGCS in den USA schematisch

Im Anschluss wurde die NGCS auf dem Forschungsgelände MnROAD des Departements of Transportation in Minnesota mit anderen Grinding-Texturen verglichen. Es zeigte sich, dass die NGCS um -3 dB(A) weniger Lärm als eine herkömmliche Grinding-Textur erzeugte. Zudem waren die Lärmpegel der NGCS auf einer Teststrecke mit in Kansas um ca. -1 dB(A) geringer als bei einer konventionellen Grinding-Oberfläche [2].

Als letztes Praxisbeispiel werden Teststrecken in Australien erläutert. Für den Schleifprozess wurden eine Walzengröße von 1,27 m mit 220 Schleifscheiben und ein durchschnittlicher Blattabstand von 5,8 mm verwendet. Das Ziel war, einen Vergleich der akustischen

Eigenschaften einer quertexturierten mit einer mittels Diamantschleifscheiben längstexturierten Betondecke herzustellen. Es konnte dort nicht festgestellt werden, ob eine der beiden Texturierungen grundsätzlich das Potential hat, bessere Lärminderungseigenschaften aufzuweisen als die andere. Ein Grund dafür könnte die relativ große Stegbreite von im Schnitt 5,8 mm sein. Außerdem wurde die Längstextur in diesem Beispiel auf einer bereits bestehenden und zuvor quertexturierten Strecke errichtet, wodurch sich die Wirkung der Längstextur vermindert haben könnte [8].

Fazit

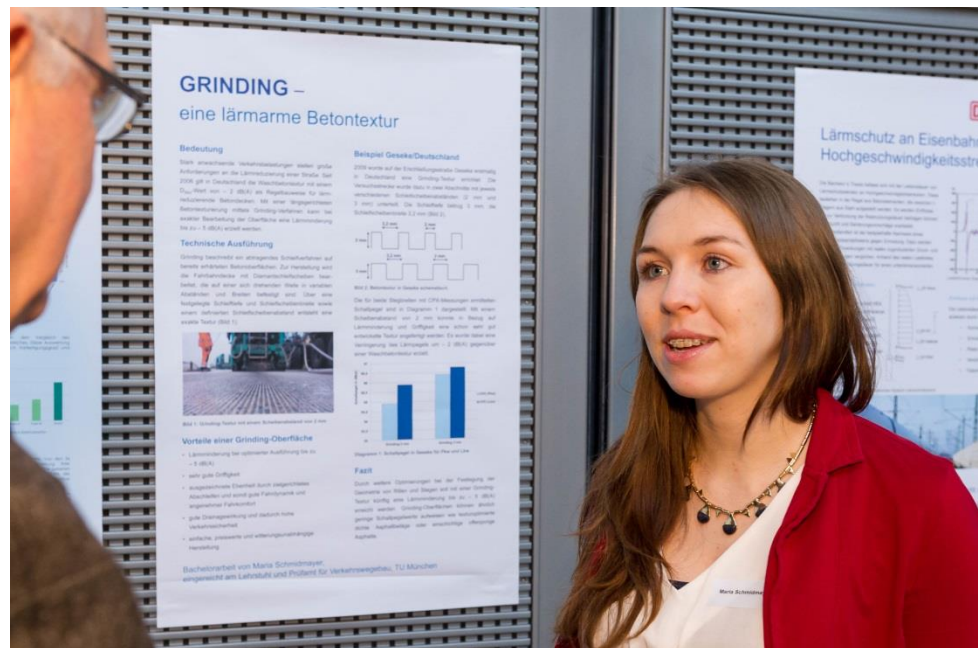
Auf einigen Teststrecken konnten sehr erfolgreich Betonoberflächen mit einer Grinding-Textur zur Lärminderung errichtet werden. In Geseke wurde mit einer Rillenbreite von 2 mm eine Reduzierung des Lärmpegels von -2 dB(A) gegenüber der derzeitigen Regelbauweise Waschbeton erreicht. Durch weitere Optimierungen, zum Beispiel bei der Festlegung der Geometrie der Textur, soll mit einer Grinding-Oberfläche künftig eine Minderung des Lärmpegels bis zu -5 dB(A) erzielt werden können. In den USA wurde mit der bereits gut optimierten NGCS eine Lärminderung von -3 dB(A) gegenüber einer herkömmlichen Grinding-Texturierung erreicht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es in Zukunft möglich sein wird mit dem Grinding-Verfahren ohne großen baulichen und finanziellen Aufwand akustisch günstige, rutschfeste und dauerhafte Betondecken zu erzeugen. Zudem können Grinding-Texturen bei zielsicherer Herstellung ähnlich geringe Schallpegelwerte erreichen wie texturoptimierte dichte Asphaltbeläge oder einschichtige offenporige Asphalte [1] [2].

Literaturverzeichnis

Im Text und in der Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [1]: Riffel, Siegfried (2011): Grinding – eine lärmarme und griffige Textur. Verkehrsflächen aus Beton. In: *Sonderdruck aus Straßen- und Tiefbau* (12).
- [2]: Skarabis, Jens (2013): Betonstraßenbau im Ausland – Bericht des Preisträgers 2011. Grinding und Grooving in den USA. FGSV. Karlsruhe, 19.09.2013.
- [3]: Peschel, Ulrich; Reichart, Urs (2014): Lärmindernde Fahrbahnbeläge. Ein Überblick über den Stand der Technik. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (Texte, 20).
- [4]: Wenzl, Patrick (2009): Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Verkehrsflächen aus Beton. M OB. Hg. v. FGSV. Arbeitsgruppe Betonbauweisen. Köln.
- [5]: Bartholomaeus, Wolfram (2013): Arbeitspapier. Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken. Hg. v. FGSV. Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement. Köln.
- [6]: Riffel, Siegfried (2012): Erprobung neuer, innovativer Betonbauweisen und Oberflächentexturen beim Bau der Erschließungsstraße in Geseke. In: *Straße und Autobahn* (9), S. 598–605
- [7]: Schmerbeck, Rupert; Höller, Stefan (2013): Bewehrte Betondecke, Blacktopping und Grinding – Versuchsstrecke BAB A 9. In: *Straße und Autobahn* (5), S. 321–329
- [8]: Samuels, Stephen (2011): The acoustic effects of diamond grinding Portland Cement Concrete pavement surfaces. In: *Road & Transport Research* 20 (4), S. 42–55



Autor

Name:	Maria Schmidmayer	
Geburtsdatum:	17.03.1992	
Ausbildung:	1998-2002	Grundschule Söchtenau
	2002-2011	Ignaz-Günther-Gymnasium Rosenheim
	2011-2015	Studentin Bachelor Umweltingenieurwesen an der TU München

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl und Prüfam für Verkehrswegebau der TU München,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein
Betreuung: Dipl.-Ing. Sonja Xalter

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNGEN ZUR ZEITLICH VERÄNDERLICHEN WASSERAUFNAHME VON RECYCLINGBAUSTOFFEN

Bachelorarbeit

Ferdinand Schülen

Rezyklierte Gesteinskörnungen aus Bauschutt besitzen aufgrund ihrer Porosität ein hohes Wasseraufnahmevermögen. Um Baustoffe besser verdichten zu können, wird in der Praxis zur Reduktion der Reibung zwischen den Körnern häufig Wasser zugegeben. Ein Teil dessen dringt aufgrund der Porosität mit der Zeit in den Porenraum ein und steht somit nicht mehr für die Reibungsreduktion zur Verfügung. Im Proctorversuch zur Bestimmung des für die Verdichtung optimalen Wassergehalts resultiert daraus, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der erreichten Trockendichte und dem optimalen Verdichtungswassergehalt erkennbar ist. In der vorliegenden Arbeit werden bisher zu Rohdichte und Wasseraufnahmevermögen von rezyklierten Gesteinskörnungen erzielte Forschungsergebnisse mit eigenen Versuchsergebnissen verglichen und im Hinblick auf die Problematik im Proctorversuch bewertet. Die gegenübergestellten Ergebnisse stimmen im Allgemeinen gut überein. Es konnte gezeigt werden, dass Recyclingbaustoffe über mehrere Tage teils hohe Wassermengen aufnehmen.

Keywords: Recyclingbaustoffe, rezyklierte Gesteinskörnung, Wasseraufnahme, Rohdichte, Stoffliche Zusammensetzung

Hintergrund der Arbeit

Recycling von Bauschutt spielt im Bauwesen heutzutage eine wichtige Rolle. Gestiegene Erwartungen und Anforderungen an einen umweltbewussten und ressourcenschonenden Umgang mit Baustoffen machen eine effiziente Wieder- bzw. Weiterverwertung von Bauschutt unumgänglich. Bis 2020 wird für nicht gefährliche Bau- und Abbruchabfälle eine Verwertungsquote von 70 Gewichtsprozent angestrebt, was auch in

der aktuellen Fassung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes verankert ist [1]. 51,7 % der Recycling-Baustoffe werden im Straßenbau eingesetzt werden, im Erdbau sind es 20,2 % [2].

Sie müssen zur Erfüllung ihrer Anforderungen (z.B. Tragfähigkeit, Lastabtrag) oft verdichtet werden und dabei strenge Vorgaben einhalten. Der Verdichtungserfolg hängt wesentlich vom Wassergehalt des Materials ab, da das Wasser

die Reibung zwischen den Körnern herabsetzt und somit bei gleichbleibender Verdichtungsenergie bis zu einem gewissen Wassergehalt eine höhere Lagerungsdichte ermöglicht. Bei rezyklierten Gesteinskörnungen dringt aufgrund ihrer geringeren Rohdichte und höheren Porosität mit der Zeit ein Teil des Wassers in den vorhandenen Porenraum ein und steht damit nicht mehr wirksam für die Verdichtung zur Verfügung. Im Proctorversuch stellen sich folglich unabhängig vom Wassergehalt annähernd konstante Trockendichten ein, anstatt dass sich ein deutliches Proctoroptimum ausbildet. Dies ist insofern von Relevanz, da sich die Verdichtungsanforderungen in der Erdbaupraxis häufig auf diesen Wert beziehen und die Baustoffe möglichst bis zu dem zugehörigen optimalen Wassergehalt befeuchtet werden.

Ziel der Untersuchungen war es, für ausgewählte Recycling-Baustoffe herauszufinden, welche zeitabhängige Entwicklung ihre Wassergehalte zeigen und welche Rohdichten sie aufweisen. Dafür wurde zuerst eine Literaturstudie durchgeführt, um bisherige Forschungsergebnisse aufzuzeigen. Anschließend erfolgten eigene Versuche an ausgewählten RC-Gesteinskörnungen, die die bisherigen Erkenntnisse erweitern und die Bedeutung der zeitlichen Wasseraufnahme für die Verdichtbarkeit der Baustoffe aufzeigen sollen.

Bisherige Forschungsergebnisse

Der Zusammenhang zwischen der stofflichen Zusammensetzung, der Rohdichte und dem zeitabhängigen Wasseraufnahmevermögen von rezyklierten Gesteinskörnungen wurde bisher vor allem für deren Einsatz in Recyclingbeton und Recyclingmörtel untersucht [3]. Für solche, die im Erdbau verwendet werden, wurde dieser Zusammenhang bisher nicht betrachtet. Die vorgestellten Ergebnisse kommen daher überwiegend aus der Betontechnologie und dem

Straßenbau. Die Untersuchungen erfolgten nicht einheitlich, sodass der Untersuchungszeitraum und die Korngruppenzusammensetzung variieren können.

Die stoffliche Zusammensetzung von rezyklierten Gesteinskörnungen unterliegt zum Teil erheblichen Schwankungen. Am größten sind sie bei gemischtem Bauschutt, da hier viele verschiedene stoffliche Komponenten vorliegen können. Die Zusammensetzung kann regional unterschiedlich sein und von der Art des Rückbaus abhängen [4].

Bei bisher untersuchten Betonbruchkörnungen liegt die Kornrohichte zwischen 2,05 und 2,6 g/cm³, sie nahmen zwischen 1,5 und 10 M.-% Wasser auf. Mauerwerk- und Ziegelbruchkörnungen wiesen mit 1,5 und 2,45 g/cm³ eine große Streuung der Kornrohichten auf, damit im Zusammenhang variiert auch die Wasseraufnahme, sie lag zwischen 2 - 26 M.-%. Die Schwankungen sind durch die verschiedenen Ziegelarten (hartgebrannt, weichgebrannt) und die daraus resultierenden unterschiedlichen Eigenschaften bedingt. Bei untersuchten RC-Körnungen aus gemischtem Bauschutt lag die Kornrohichte zwischen 1,9 und 2,3 g/cm³, sie nahmen zwischen 4,5 und 11 M.-% Wasser auf.

Ausführliche Versuche zur zeitabhängigen Wasseraufnahme von rezyklierten Gesteinskörnungen wurden bisher nur von Diedrich et al. [5] durchgeführt. Sie konnten zeigen, dass die RC-Körnungen über sieben Tage lang Wasser aufnehmen.

Insgesamt konnte festgestellt werden, dass nicht immer ein linearer Zusammenhang zwischen Korngröße, Rohdichte und Wasseraufnahme besteht. Der Grad der Wassersättigung hängt insbesondere von der betrachteten Zeit ab.

Eigene Versuchsergebnisse

Im Rahmen der eigenen Versuche wurden folgende rezyklierte Gesteinskörnungen untersucht: Ein RC-Beton 0/32, ein RC-Ziegel 0/32 und ein RC-Mix 0/32, der sich aus natürlicher Gesteinskörnung, Betonbruch, Ziegel und Mörtel zusammensetzte. Diese wurden in die vier Korngruppen 0/4, 4/8, 8/16 und 16/32 aufgeteilt und jede einzeln untersucht. Für die Korngruppen ohne Feinanteil wurde in einer Unterwasserwägung die Rohdichte ermittelt und über einen Zeitraum von sieben Tagen die Wasseraufnahme beobachtet. Die Rohdichte der Korngruppe 0/4 wurde durch einen Vakuumversuch bestimmt, die zeitabhängige Wasseraufnahme zu bestimmen war hier jedoch nicht zufriedenstellend möglich. Um die ermittelten Rohdichten zu überprüfen und um einen möglichen Einfluss der Versuchsart zu identifizieren wurden zusätzlich Versuche im Luft- und Gaspyknometer durchgeführt. Um die Wasseraufnahme der Feinbestandteile 0/0,4 mm beobachten zu können, wurde das Wasseraufnahmevermögen nach Enslin-Neff bestimmt.

Durch den Versuch der Unterwasserwägung konnte gezeigt werden, dass alle untersuchten Proben über den gesamten Untersuchungszeitraum von sieben Tagen

Wasser aufnehmen, wie in Abb. 12 zu sehen ist. Bei Betrachtung aller Versuche nahm der RC-Beton je nach Korngruppe 3,5 – 6,5 M.-% Wasser auf, er besitzt damit von allen untersuchten RC-Körnungen das geringste Wasseraufnahmevermögen. Beim RC-Mix lagen die Werte zwischen 6,0 und 9,3 M.-%, der RC-Ziegel erreichte mit 10,9 - 14 M.-% die höchsten Werte. Abbildung verdeutlicht auch, dass die betrachteten Körnungen ein unterschiedliches Saugverhalten zeigen. Der RC-Ziegel zeigt im Vergleich zu den anderen RC-Körnungen ein trägeres Wasseraufnahmeverhalten, da er nach 24 Stunden nochmals deutlich Wasser aufnimmt. Nach etwa 10 Minuten haben RC-Beton und RC-Mix 70 – 75 % ihrer Wassersättigung nach sieben Tagen erreicht, eine Ausnahme stellt jedoch die RC-Beton-Fraktion 4/8 dar, die zu diesem Zeitpunkt erst zu 57 % gesättigt war. Nach 24 Stunden erreichten RC-Beton und RC-Mix eine Sättigung von über 90%. Ebenso erkennbar ist, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Korngröße und Wasseraufnahmevermögen besteht. Die Korngruppe 16/32 beispielsweise nahm beim RC-Ziegel deutlich weniger Wasser auf als die übrigen Korngruppen 4/8 und 8/16, beim RC-Beton dagegen besaß sie den größten Wasseraufnahmewert.

Bei der Korngruppe 0/4 konnte kein zeitabhängiger Verlauf der Wasseraufnahme

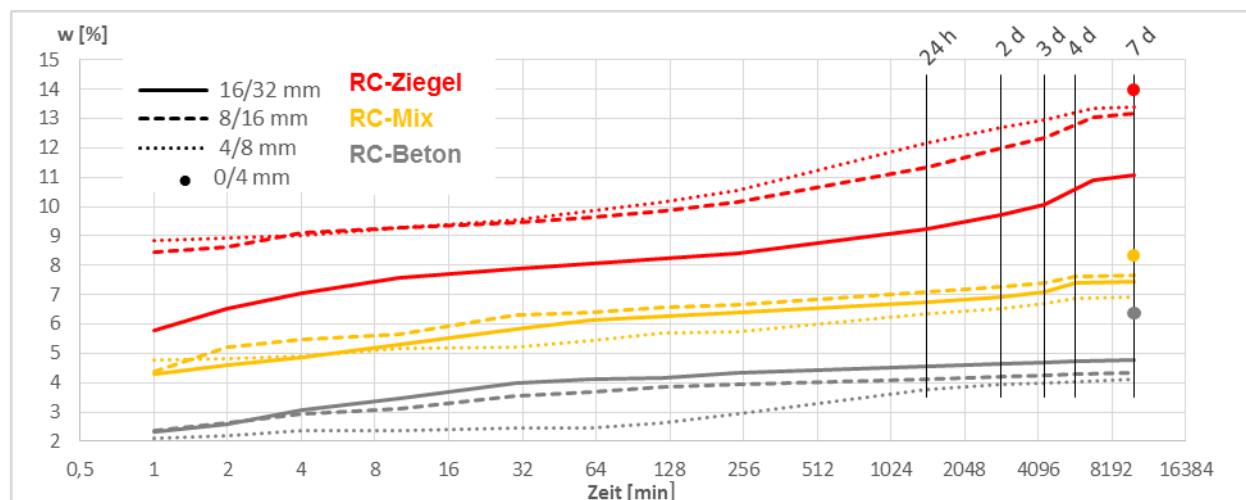


Abbildung 1: Zeitabhängige Wasseraufnahme der untersuchten rezyklierten Gesteinskörnungen

bestimmt werden, da sich die Proben – bedingt durch puzzolanische Reaktionen des (Alt-) Zementanteils – verfestigten und daher nicht von alleine Wasser aufnehmen. Durch Entlüftung der Proben konnte die Wasseraufnahme nach sieben Tagen bestimmt werden, sie nahm bei allen RC-Körnungen jeweils den höchsten Wasseraufnahmewert an. An den Feinbestandteilen 0/0,4 war im Versuch nach Enslin-Neff ein Wasseraufnahmevermögen zwischen 39 und 47 M.-% zu erkennen, wobei der RC-Ziegel am wenigsten Wasser saugte und am schnellsten gesättigt war, während der RC-Mix das langsamste Saugverhalten zeigte (siehe Abbildung). Das höhere Wasseraufnahmevermögen von RC-Mix und RC-Beton sind auf den feingemahlten Zement zurückzuführen.

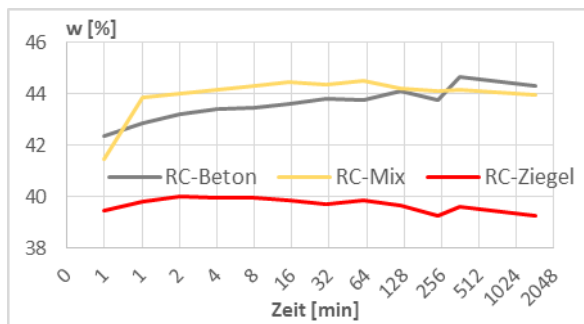


Abbildung 2: Wasseraufnahme der Feinbestandteile 0/0,4 mm

Im Zusammenhang mit der Wasseraufnahme wurde die Kornrohichte der RC-Körnungen untersucht. In mehreren Versuchen konnte festgestellt werden, dass die Kornrohichte des RC-Betons mit 2,28 – 2,47 g/cm³ am höchsten ist: Der RC-Mix weist Werte zwischen 2,09 und 2,33 g/cm³ auf, der RC-Ziegel Werte zwischen 1,92 und 2,03 g/cm³. Die Korngruppen 0/4 und 16/32 besitzen gegenüber den dazwischenliegenden Korngruppen beim RC-Beton und RC-Mix kleinere Rohdichten, beim RC-Ziegel lag sie bei allen Kornfraktionen in etwa gleichauf. Beim RC-Mix wurden bei den Korngruppen zwischen 4 und 32 mm die größten Unterschiede der Kornrohichte und der Wasseraufnahme innerhalb einer Korngruppe festgestellt, was auf die heterogene stoffliche Zusammensetzung zurückzuführen ist.

Vergleich und Interpretation der Ergebnisse

Die eigenen Versuchsergebnisse stimmen mit den bisher erzielten Forschungsergebnissen gut überein, jedoch müssen Unterschiede in den Versuchsdurchführungen berücksichtigt werden.

DIN 18127 schreibt für die Bestimmung des optimalen Wassergehalts im Proctorversuch eine Homogenisierungszeit des Baustoffs im Wasser von zehn Minuten vor. Die untersuchten RC-Baustoffe waren zu diesem Zeitpunkt bezogen auf ihren Wasseraufnahmewert nach sieben Tagen erst zu rund 70 - 75 % wassergesättigt und nahmen im Anschluss weiter Wasser auf.

Die Untersuchungen ergaben, dass der optimale Verdichtungswassergehalt mithilfe des Proctorversuchs bei den Korngruppen 4/8 und 8/16 des RC-Beton und des RC-Mix durch ihre im Vergleich geringe Wasseraufnahme von max. 4,5 M.-% bzw. 7,7 M.-% am ehesten bestimmt werden kann. Die Korngruppe 16/32 wies bei beiden Baustoffen eine größere Rohdichte und eine höhere Wasseraufnahme auf, daher ist hier die Bestimmung des optimalen Wassergehalts schwieriger. Beim RC-Ziegel ist die Abschätzung des optimalen Wassergehalts am schwierigsten, da sich die Wasseraufnahme von über 10 M.-% über mehrere Tage vollzog und eine Sättigung von über 90 % erst nach zwei bis drei Tagen eintrat.

Innerhalb eines RC-Baustoffes können Rohdichte und zeitabhängiges Wasseraufnahmevermögen zwischen einzelnen Korngrößen ebenso schwanken wie zwischen verschiedenen RC-Baustoffen. Allen Baustoffen ist gemeinsam, dass die Ermittlung des optimalen Wassergehalts im Proctorversuch nur unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Wasseraufnahmepotentials erfolgen kann.

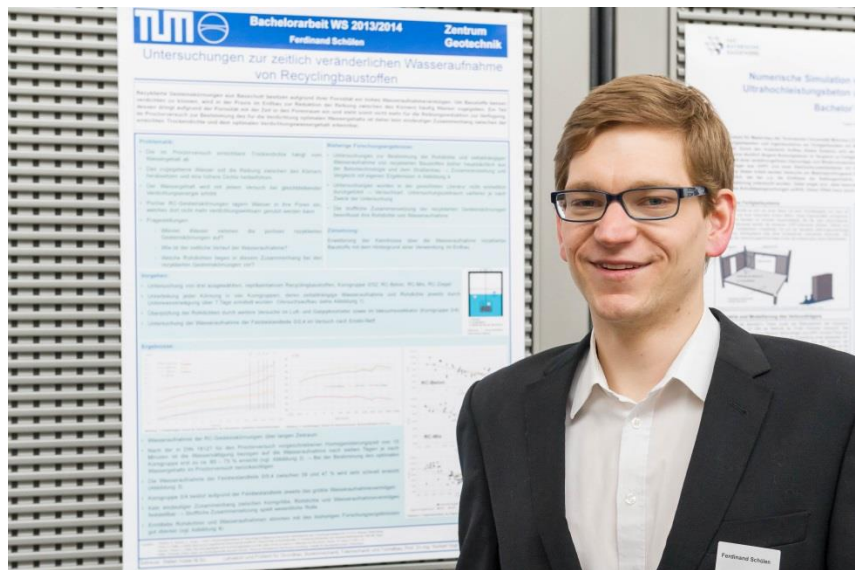
Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Bundesministerium der Justiz (2012): *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz KrWG)*, S. 17.
- [2] Kreislaufwirtschaft Bau (2015): *Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2012*, Berlin
- [3] Düser, Olaf (1999): *Verwertung von aus Bauschutt aufbereitetem Recyclingmaterial in mineralischen Dichtungssystemen*, Hannover: Universität, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen, Dissertation, erschienen im Eigenverlag.
- [4] Krass, K.; Kollar, J (2004) *Eignung von ziegelreichen Recycling-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel*, in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 884, Bonn
- [5] Diedrich, R.; Brauch, A., Kropp, J. (2001): *Rückenstützenbetone mit Recyclingzuschlägen aus Bauschutt*, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF 11414 N, Bremen: RWB Verlag

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Diedrich, R.; Brauch, A., Kropp, J. (2001): *Rückenstützenbetone mit Recyclingzuschlägen aus Bauschutt*, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF 11414 N, Bremen: RWB Verlag
2. Krass, K.; Kollar, J (2004) *Eignung von ziegelreichen Recycling-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel*, in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 884, Bonn
3. Hansen, Torben C. (1986): *Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. State of the art report*, in: Materials and Structures, Volume 19, Issue 3, S.201 – 246
4. Müller, Christoph (2000): *Beton als kreislaufgerechter Baustoff*, Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Fakultät für Bauingenieurwesen, Dissertation



Autor

Ferdinand Schülen

Geburtsdatum & -ort: 01.09.1988, München

Ausbildung:

2009

Abitur am Dante-Gymnasium München

2010 – 2014

Bachelorstudium Bauingenieurwesen Bachelor an der TU München

seit 2014

Masterstudium Bauingenieurwesen an der TU München

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München, Professor Dr.-Ing. Norbert Vogt, Betreuer Stefan Huber M.Sc.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

FEINSTAUBPARTIKEL UNTERSUCHUNG UND BEURTEILUNG DER LUFTREINHEIT IN WOHNRÄUMEN UND AN ARBEITSPLÄTZEN ANHAND DER KONZENTRATION LUFTGETRAGENER PARTIKEL

Bachelorarbeit

Stefan Sellner

Die gesundheitlichen Auswirkungen erhöhter Feinstaubpartikelkonzentrationen in der Atemluft stehen in den letzten Jahren verstärkt in der öffentlichen Diskussion; dennoch fehlt es an praktikablen Richtwerten zur Einordnung der Partikelkonzentrationen auf Grundlage partikelzählender Messverfahren. Diese Arbeit ermöglicht durch umfassende Untersuchungen eine Wertung und Einordnung gemessener Partikelkonzentrationen. Darüber hinaus wurden stark belastete Arbeitsbereiche aufgespürt und individuelle Konzepte zur Feinstaubminimierung erarbeitet. Hierbei fiel unter anderem die Personenreinigung mit Druckluft auf, die ein hohes Gefährdungspotential darstellt. Die Belastung erstreckt sich hier hauptsächlich im unsichtbaren und gesundheitlich besonders relevanten Bereich der feinen, lungengängigen Partikelgrößen.

Keywords: Feinstaub, Partikelkonzentration, Partikelzähler, A-Staub, E-Staub, Arbeitsplatzgrenzwert, Gesundheit und Gesundheitsvorsorge, Gesundes Wohnklima, Arbeitsschutz, Arbeitssicherheit

Aufgabenstellung und Zielsetzung

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung und Beurteilung der Luftreinheit anhand der Partikelkonzentration. Als Pionier des ökologischen Bauens legt das Unternehmen Baufritz aus dem Allgäu nicht nur großen Wert auf ein gesundes Wohnumfeld in Kundenhäusern sondern auch auf ein gesundes Arbeitsumfeld und eine Reduzierung der gesundheitlichen Belastung für die Mitarbeiter.

Untersuchte Bereiche sind im Wesentlichen die Außenluft, Musterhäuser sowie Büro- und Produktionsarbeitsplätze der Firma Baufritz. Im Bereich der Produktion wird die allgemeine Feinstaubbelastung ermittelt und gewertet, darüber hinaus sollen stark belastete Sektionen aufgespürt und individuelle Konzepte zur Feinstaubminimierung erarbeitet werden. Als zentrale Aufgabe liegt außerdem das Erstellen einer praktikablen Betriebsanweisung für das vorhandene Messgerät und die Ausarbeitung

einer Strategie zur Erfassung und Auswertung der Partikelkonzentration für die im Unternehmen relevanten Zwecke zugrunde.

Messverfahren und Messgerät

Für die genannten Aufgaben und die Bewertung der Luftreinheit wird lediglich Bezug auf die gemessenen Partikelkonzentrationen in verschiedenen Größenfraktionen genommen. Die erfassten Partikelgrößenfraktionen liegen im Bereich von $0,3\ \mu\text{m}$ bis $10,0\ \mu\text{m}$ Durchmesser. Mit dem zur Verfügung stehenden Messgerät (Partikelzähler PC200 der Firma Trotec; siehe Abb. 1) wurden Messungen mit einer Messdauer von 21 Sekunden durchgeführt. In dieser Zeit wird genau 1 Liter Luft eingesaugt und die gemessene Partikelanzahl entspricht damit der Partikelkonzentration pro Liter Luft.



Abb. 1: Partikelzähler Trotec PC200

Es handelt sich hierbei um stichprobenartige Messungen, die nur in ausreichender Anzahl Rückschlüsse auf das gesamte Raumvolumen zulassen. Weitere Eigenschaften und Einflussfaktoren des Feinstaubes, eine umfassende Wertung des gesundheitlichen Risikos sowie eine detaillierte Untersuchung und Analyse aller Komplexitäten kann nicht erfolgen. Die Erforschung der Feinstaubbelastung versteht sich auch heute noch in weiten Teilen und gerade im Bereich der Partikelkonzentrationen nach Partikelanzahl als Pionierarbeit. Ein Bezug zur Fachliteratur und eine Einordnung in Richtwerte sind deshalb nicht immer möglich.

Partikel und Feinstaub

Unter einem „Partikel“ versteht man ganz allgemein ein kleines Teil Materie mit physikalisch definierten Abgrenzungen [1] oder ein „festes oder flüssiges Teilchen, welches sich für Klassifizierungszwecke der Partikelreinheit der Luft in einer Summenhäufigkeitsverteilung zwischen den kritischen Partikelgrößen $0,1\ \mu\text{m}$ und $5\ \mu\text{m}$ bewegt“ [2]. Partikel, die nicht mehr absinken, sondern dauernd in der Luft schweben, beginnen unter $1\ \mu\text{m}$ Größe. Eine Faser ist als Partikel, mit einem Verhältnis Länge zu Breite von 10 oder größer, definiert [2]. Im luftgetragenen Zustand wird Staub als Schwebstaub bezeichnet [3]. Dieser besteht aus Partikeln unterschiedlicher Größe und Form, chemischer und biologischer Zusammensetzung sowie unterschiedlicher Aggregatzustände. [4]

Für den Begriff Feinstaub gibt es keine eindeutig festgelegte Definition. Im Allgemeinen versteht man darunter die kleineren Partikelgrößenfraktionen des Schwebstaubs ab einer Größe von etwa $10\ \mu\text{m}$. Der Durchmesser von Schwebstaubpartikeln liegt in einem Bereich von $< 0,005\ \mu\text{m}$ (Milliardstel Meter) bis ca. $100\ \mu\text{m}$ (Millionstel Meter); das heißt, dass sich der Bereich über ca. vier Zehnerpotenzen erstreckt. Diese Verteilung entspräche, in eine andere Größenordnung transportiert, einem Kugeldurchmesser von 1 mm bis 10 m.

Dieser Vergleich macht deutlich, dass die Eigenschaften von Schwebstaub, allein aufgrund des breiten Spektrums, sehr unterschiedlich sein müssen. Partikel der Größe $0,3\ \mu\text{m}$ sind 300-mal kleiner als der Durchmesser eines menschlichen Haares. (Siehe hierzu Abb. 2)

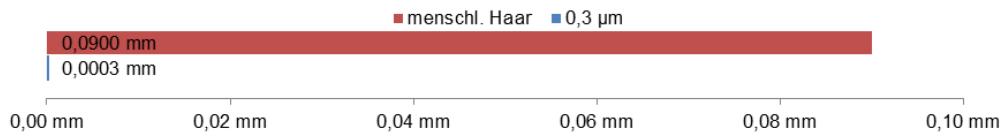


Abb. 2: Größenvergleich Feinstaubpartikel mit menschlichem Haar

Gesundheitliche Relevanz

In Bezug auf die Gesundheitsgefährdung unterscheidet man anhand der Teilchengröße die sich absetzenden Partikel (Grobstaub) von der einatembaren Fraktion (E-Staub) und einer alveolengängigen Fraktion (A-Staub), welche bis tief in die Lungenbläschen vordringt. Auch nach [3] wird in einatembare, extrathorakale, thorakale, tracheobronchiale und alveolengängige Fraktionen unterschieden. Als einatembare werden alle Partikel bezeichnet, die durch Mund und Nase eingeatmet werden. Die thorakale Fraktion gelangt dabei über den Kehlkopf hinaus, die extrathorakale Fraktion nicht. Abb. 3 zeigt die Einteilung der Partikelgrößen entsprechend nach Angriffsort.

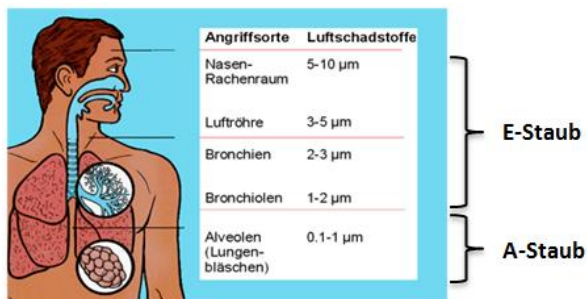


Abb. 3: Feinstaubpartikel im menschlichen Atemtrakt [5]

Darstellung der Partikelkonzentration

In Tabelle 1 ist die Auswertung der gemessenen Partikelkonzentrationen in der Außenluft abgebildet. Zu den Partikelgrößenfraktionen sind die gemessene Partikelanzahl und gleichzeitig die Partikelkonzentration in Partikel/Liter angegeben.

Darüber hinaus ist die Einordnung bezüglich der Gesundheitsgefährdung dargelegt, indem die entsprechenden Größenklassifikationen den gemessenen Partikelgrößenfraktionen zugeordnet sind. Die Größenfraktionen 2,5 bis 10 µm zählen zum E-Staub, dem einatembaren, aber nicht alveolengängigen Feinstaub. Die linke Hälfte der Tabelle (0,3 bis 1,0 µm) zählt zum A-Staub, dem alveolengängigen Feinstaub. Dieser dringt bis in die feinen Lungenbläschen vor und ist für die Bewertung der Gesundheitsgefährdung besonders relevant.

Bei der Untersuchung der Außenluft stellte sich heraus, dass die Messwerte von den Witterungsverhältnissen abhängig sind und bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit und insbesondere bei Nebel zu extrem hohen Partikelkonzentrationen führen. Wassertropfchen werden verfahrensbedingt mitgezählt. Solche hohen Messwerte sind separat zu behandeln. Der Mittelwert aller gemessenen Außenluftkonzentrationen (ohne Witterungseinflüsse) liegt bei 34.523 Partikeln / Liter. 95 % aller Messwerte liegen dabei unter 99.954 Partikeln/Liter.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde durch weitere 150 Einzelmessungen ein Normalpegel in der Produktion ermittelt, der die Grundbelastung durch Feinstaub im untersuchten Zeitraum widerspiegelt. Besonders auffällige Arbeiten und Arbeitsbereiche sind separat behandelt. Der Normalpegel liegt im Mittel bei 111.537 Partikeln/Liter. In 95 % der Fälle wird eine Konzentration von 306.620 Partikeln/Liter unterschritten.

Gesamt-partikel	0.3 µm	0.5 µm	1.0 µm	2.5 µm	5.0 µm	10 µm	
105.774	90.251	14.252	1.985	236	86	91	Maximalwert
2.239	1.735	363	91	2	0	0	Minimalwert
34.523	29.150	4.608	668	67	20	11	Mittelwert (mittlere Partikelkonzentration)
27.309	22.742	4.135	593	52	14	7	Median / 50%-Perzentil
99.954	84.621	13.024	1.557	151	53	25	95%-Perzentil (95% aller Werte sind kleiner)
Einatembare Fraktion							
Thorakale Fraktion							
Tracheobronchiale Fraktion							
Alveolengängige Fraktion							
A-Staub				E-Staub			

Tabelle 1: Auswertung Messwerte Außenluft

Auswertung und Interpretation der Partikelkonzentration

Abb. 4 zeigt einen Vergleich der Mittelwerte der Partikelkonzentrationen in der Produktion („Normalpegel Produktion“) mit der Außenluft („Referenz Außenluft“).

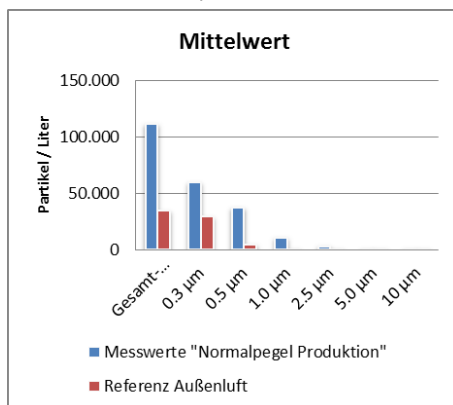


Abb. 4: Vergleich Außenluft und Normalpegel Produktion

Es wird deutlich, dass sich die meisten Partikel im Bereich des alveolengängigen Feinstaubes bewegen. Hier ist die Partikelzahl im Mittel knapp 30-mal so hoch wie in den Partikelfractionen > 2,5 µm (E-Staub). Die Anzahl der Gesamt-partikel im Bereich des A-Staubes in der Produktion ist etwa 3-mal so groß wie in der Außenluft. Die groben, im sichtbaren Bereich liegenden Partikel, werden vom menschlichen Atemtrakt gefiltert, wohingegen die nicht sichtbaren Feinanteile am Immunsystem vorbei, direkt in die Lungenbläschen und damit in die Blutbahn gelangen.

Eine unerwartet auffällige Feinstaubbelastung zeigte bei den Untersuchungen in der Produktion des Unternehmens die Personenreinigung mit Druckluft (vgl. Abb. 5)

Hier waren gerade bei leicht verschmutzter Kleidung und kaum sichtbarer Staubaufwirbelung extreme Partikelkonzentrationen im lungen- und alveolengängigen Bereich nachweisbar. Diese sind etwa 13-mal so hoch wie der Normalpegel in der Produktion.

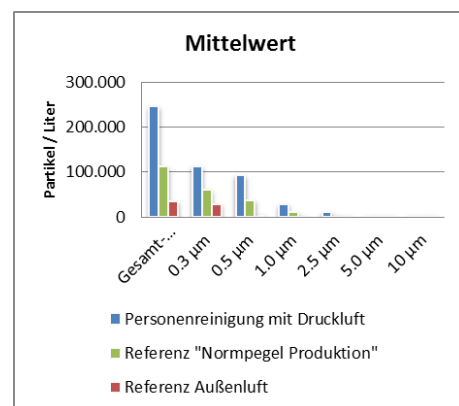


Abb. 5: Vergleich Personenreinigung Druckluft mit Außenluft und Normpegel Produktion

Zur Reduktion dieser Belastung wurden Alternativen erörtert und auf die Bedürfnisse des Unternehmens Baufritz zugeschnitten erarbeitet. Eine Personenreinigungs-kabine mit Gebläse-lufteinheit bietet eine maximal mögliche Reduktion der Feinstaubbelastung bei optimalem Reinigungsergebnis.

Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Datenlage und die daraus errechneten Referenzpegel in der Produktion und in der Außenluft bieten eine Grundlage für die Einordnung und Wertung weiterer Messungen. Zudem lässt sich dieser Datensatz bezüglich einzelner Stellen auswerten. Erörterte Maßnahmen zur Feinstaubreduktion lassen sich nach Umsetzung hinsichtlich ihrer Wirksamkeit durch weitere Messungen analysieren.

Schlussendlich ist diese Arbeit als Grundlagenforschung zu verstehen. Aufgrund der Fülle und Breite der untersuchten Messpunkte und Rahmenbedingungen und der Komplexität verschiedener Eigenschaften des Feinstaubes sind hier ausgewählte Bereiche detailliert dargestellt, ausgewertet und interpretiert. Eine eingehende Untersuchung weiterer Bereiche kann sich auf Basis dieser Arbeit und der zugrundeliegenden Partikelmessungen anschließen.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN ISO 14644-1. 2014-11 Entwurf. *Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche*: Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [2]: DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN ISO 14644-1. 1999-07. *Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche*: Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [3]: DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN ISO 7708. 1996-01. *Luftbeschaffenheit - Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die gesundheitsbezogene Schwebstaubprobenahme*: Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [4]: GERD ZWIENER UND FRANK-MICHAEL LANGE: *Handbuch Gebäude-Schadstoffe und gesunde Innenraumluft*. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2012
- [5]: BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ: *Was versteht man unter Feinstaub?* - Überprüfungsdatum 17.01.2015
<http://www.stmuv.bayern.de/umwelt/luftreinhaltung/verunreinigungen/feinstaub/index.htm>

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- 1. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN ISO 14644-1. 1999-07. *Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche*: Beuth Verlag GmbH. Berlin
- 2. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN ISO 7708. 1996-01. *Luftbeschaffenheit - Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die gesundheitsbezogene Schwebstaubprobenahme*: Beuth Verlag GmbH. Berlin
- 3. GERD ZWIENER UND FRANK-MICHAEL LANGE: *Handbuch Gebäude-Schadstoffe und gesunde Innenraumluft*. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2012
- 4. MAES, Wolfgang: *Stress durch Strom und Strahlung : Elektromog, Radioaktivität, Raumklima, Wohngifte, Partikel, Pilze*. 3. Aufl. Neubeuern: IBN, 1998 (Schriftenreihe gesundes Wohnen).
- 5. INSTITUT FÜR BAUBIOLOGIE + NACHHALTIGKEIT IBN: *Fernlehrgang Baubiologie - 13 Luft und Schadstoffe*. Neubeuern, 07.2014.



Autor

Stefan Sellner

Abitur in Calw, danach Freiwilliges Soziales Jahr im Sport (BSJ) am Spitzingsee. Ausbildung zum Zimmerer und Studium Bauingenieurwesen an der Hochschule München. Ehrenamtliches Engagement als Regionalnetzwerkleiter im Festo Bildungsfonds. Weiterbildung zum Baubiologen (IBN).

Betreuer

Diese Arbeit wurde an der Hochschule München, Fachbereich 02 Bauingenieurwesen in Zusammenarbeit mit der Firma Bau-Fritz GmbH & Co. KG angefertigt und durch Prof. Dr. Andrea Kustermann (Hochschule München) und durch Karlheinz Müller und Stefan Schindele (Baufritz) betreut.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

NUMERISCHE SIMULATION VON VERBUNDTRÄGERN MIT ULTRAHOCHLEISTUNGSBETON UND VERBUNDDÜBELLEISTEN

Bachelor's Thesis

Katrin Stahl B.Sc.

Am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München wird derzeit in Kooperation mit verschiedenen bayerischen Baufirmen und Ingenieurbüro ein innovatives und modulares Fertigteilssystem (Wände, Stützen und Balken) aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC) in Stahlverbundbauweise entwickelt. Durch die Kombination von UHPC und Verbunddübelleisten entstehen dabei sehr filigrane, dauerhafte und zugleich hochtragfähige Elemente, die im Vergleich zu konventionellen Fertigteilen deutliche Vorteile bieten. Im Rahmen der Bachelor's Thesis wurde das Tragverhalten der Verbundträger des modularen Fertigteilsystems numerisch mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente untersucht. Die FE-Berechnungen dienten in erster Linie der detaillierten Planung der experimentellen Untersuchungen. Hierzu wurde eine Parameterstudie durchgeführt, bei der u.a. die Einflüsse der Balkengeometrie, der Dicke und Stahlgüte der Verbunddübelleiste sowie der Schubbewehrung nachgewiesen werden konnten. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden dann Empfehlungen für die Versuchsplanung ausgesprochen.

Keywords: Verbundträger, Ultrahochleistungsbeton, Verbunddübelleiste, modulares Fertigteilssystem

Aufgabenbeschreibung / Einleitung

In Kooperation mit den Baufirmen und Fertigteilherstellern Max Bögl GmbH und Rohrdorfer Betonwerke GmbH sowie den Ingenieurbüros SSF Ingenieure AG und Büchting + Streit AG entwickelt der Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München (TUM) derzeit ressourcenschonende, modulare und leichte Betonkonstruktionen mit tragenden Bauelementen aus Ultrahoch-

leistungsbeton (engl. Ultra-High Performance Concrete, UHPC). Diese Fertigteilssysteme können aufgrund der Vielzahl der positiven Eigenschaften neue Märkte für die Bauwirtschaft erschließen. Durch die frühzeitige Einbindung der Industriepartner, die bei der Versuchskörperherstellung und Versuchsplanung unterstützend tätig waren bzw. sind, soll ein möglichst schneller und reibungsfreier

Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis erfolgen.

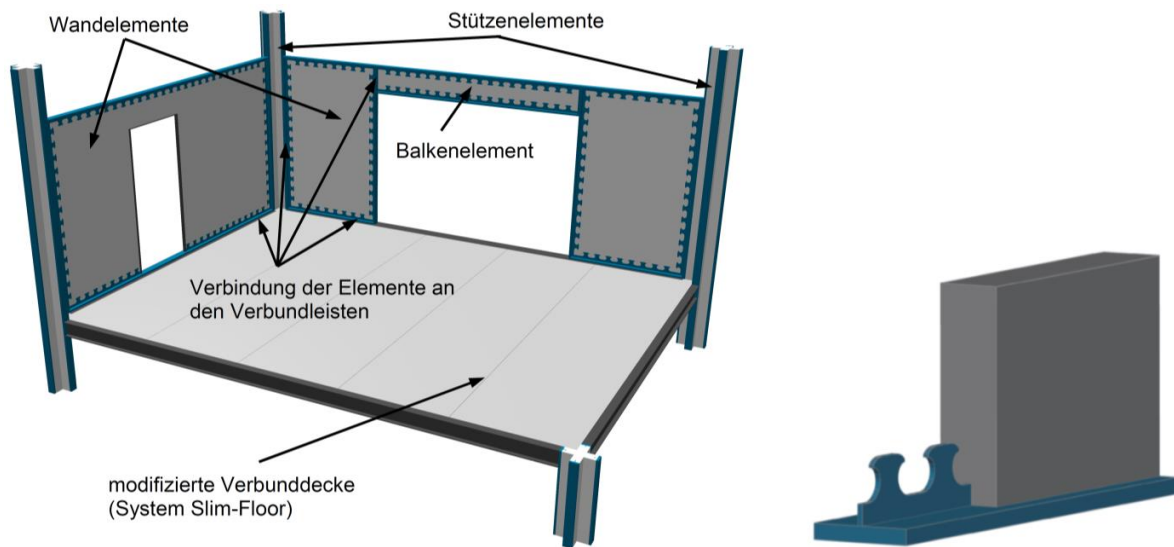


Abb. 1: Modulares Leichtbausystem aus UHPC-Elementen (links); Detail einer in Beton eingebetteten Verbunddübelleiste (rechts)

Mit Hilfe des innovativen Werkstoffs UHPC, der Druckfestigkeiten von mehr als 150 N/mm^2 aufweist, können der Materialverbrauch und die Bauzeit von Gebäuden reduziert werden, während sich gleichzeitig die Nutzungsdauer, die Flexibilität und die Recyclingfähigkeit erhöhen. Bei der angestrebten Bauweise, die einem „Baukastensystem“ ähnelt (vgl. Abbildung 1, links), werden die einzelnen UHPC-Elemente (Stützen, Wände und Balken) im Fertigteilwerk vorgefertigt und auf der Baustelle z.B. mittels eines Stecksystems oder einer Schweißnaht mit den anderen Bauteilen verbunden. Die Grundlage der Verbindungstechnik bildet immer die einbetonierte Verbunddübelleiste (vgl. Abbildung 1, rechts). Neben dem Vorteil einer witterungsunabhängigen Montage lassen sich die einzelnen Elemente auch wieder leicht und ohne Beschädigung trennen, wodurch sich die Flexibilität sowie die Nachhaltigkeit dieser Gebäude deutlich verbessert. Zudem führt die hohe Dauerhaftigkeit von UHPC zu stark reduzierten Lebenszykluskosten.

Im Rahmen der Bachelor's Thesis wurde das Balkenelement des modularen Leichtbausystems mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente untersucht. Das geplante Balkenelement ist ein filigraner Verbundträger aus UHPC mit einer maximalen Dicke von nur 6 cm, bei dem eine

Verbunddübelleiste aus Stahl anstelle von Kopfbolzendübeln zur Schubkraftübertragung verwendet wird.

Da keine belastbaren Erfahrungswerte zur Tragfähigkeit des Verbundträgers aus UHPC in Kombination mit der Verbunddübelleiste vorliegen, dienen die FE-Berechnungen zur detaillierten Versuchsplanung. Es sollte geklärt werden, bei welcher Last ein Versagen der Verbundträger zu erwarten ist und mit welchem Versagensfall zu rechnen ist. Um dies abschätzen zu können, waren Berechnungen mit verschiedenen Parameterkombinationen gefordert. Zusätzlich sollte geklärt werden, ob die Verbundträger ohne konventionelle Schubbewehrung ausgeführt werden können.

Stand der Technik

Bei UHPC handelt es sich um einen innovativen Beton mit einer Druckfestigkeit von mehr als 150 N/mm^2 . Diese wird durch einen hohen Zementanteil und eine möglichst hohlraumarme Kornpackung erreicht. Um ein duktilen Bauteilversagen zu gewährleisten sowie zur Erhöhung der Zug- und Biegezugfestigkeit, werden dem UHPC in der Regel Stahlfasern beigemischt [1]. Durch diese Eigenschaften ermöglicht UHPC bei vielen Bauteilen eine deutliche Reduktion der Abmessungen und des

verwendeten Materials. Bei Balken ergeben sich weit größere Schlankheiten und ein geringeres Eigengewicht, was wiederum zu einer verbesserten CO₂-Bilanz des Bauwerks führt. Die große Packungsdichte des UHPC sorgt für einen hohen Widerstand gegen chemische und mechanische Beanspruchungen [1]. Dies ermöglicht besonders langlebige und unterhaltsarme Bauwerke. Insgesamt kann mit Ultrahochleistungsbeton also deutlich effizienter, umweltfreundlicher und zugleich wirtschaftlicher gebaut werden.

Die Verbunddübelleiste ersetzt im UHPC die üblicherweise im Verbundbau verwendeten Kopfbolzendübel, da diese in UHPC nur eine geringe Duktilität aufweisen. Mit Hilfe der Verbunddübelleiste erfolgt die Verbindung der verschiedenen UHPC-Elemente des modularen Fertigteilsystems. Beim Verbundträger dient der Flansch der Verbunddübelleiste zusätzlich noch als externe Bewehrung für den UHPC-Träger [2].

Numerische Untersuchungen

Im Rahmen der Bachelor's Thesis wurde das FE-Programm ABAQUS zur Simulation verwendet. Der eingebaute Gleichungslöser ABAQUS/Explicit, der ein dynamisches Gleichgewicht bildet, eignet sich besonders gut zur Analyse des nichtlinearen Materialverhaltens des UHPC, der Rissbildung und Schädigung sowie zur Modellierung komplexer Kontaktbedingungen. Die FE-Berechnungen erfolgten mit zwei unterschiedlichen Querschnitten. Einerseits wurde ein Balken mit einer Breite von 6 cm und einer variablen Höhe von 30, 40 oder 50 cm, andererseits ein Plattenbalken mit einer Steg- und Flanschdicke von je 6 cm und einer Höhe von 46 cm untersucht. Der Stahlflansch besitzt immer eine Breite von 12 cm und eine Höhe von 2 cm. Die Dicke der Verbunddübelleiste variiert. Sie beträgt entweder 3, 5 oder 10 mm. Die effektive Stützweite liegt bei 3,0 m. Bei allen Verbundträgern soll ein 4-Punkt-Biegeversuch mit Belastung in den Drittelpunkten durchgeführt werden.

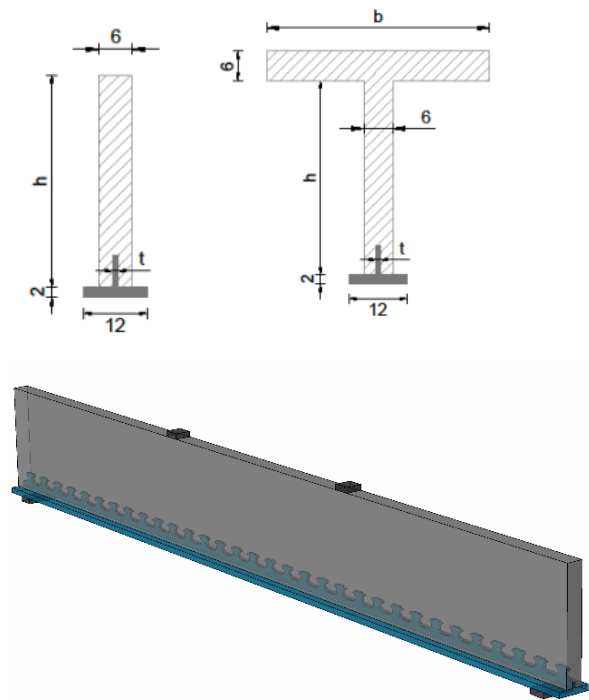


Abb. 2: Querschnittsvarianten (oben) und FE-Modell des Verbundträgers mit Lasteinleitungsplatten (unten)

Die Stahlgüten der Verbunddübelleisten wurden zusätzlich in Abhängigkeit von der Dicke angepasst, um unterschiedliche Versagensformen simulieren zu können. Es war geplant die Verbundträger soweit möglich ohne konventionelle Betonstahlbewehrung auszuführen.

Im Rahmen der Modelloptimierung mit dem Ziel der Rechenzeit- und Datenmengenreduktion wurde die doppelte Symmetrie der Verbundträger ausgenutzt, sodass zumeist nur ein Viertel des Trägers berechnet wurde. Ein Einfluss dieser Vereinfachung auf die Ergebnisse wurde untersucht und ausgeschlossen. Weiterhin wurde die Elementgröße optimiert. Im Bereich der Verbunddübelleiste, wo mit hohen lokalen Spannungen und großen Relativverschiebungen zu rechnen war, wurde ein Knotenabstand von 2,5 mm gewählt, während im restlichen Verbundträger eine größere Netzweite von 5 mm ausreichend war. Zudem wurden verschiedene Modellierungen des Auflagers untersucht, mit dem Ziel ein möglichst realitätsnahes, flächiges und gelenkiges Auflager zu erhalten.

Numerische Ergebnisse

Im Rahmen der numerischen Parameterstudie wurden die Einflüsse aus der Balkengeometrie, der Dicke und der Güte der Verbunddübelleiste sowie der Verwendung von Bewehrung auf die Steifigkeit, die Höchstlast und das Versagensverhalten untersucht. Zudem wurden die FE-Ergebnisse mit den Werten aus einer überschlägigen Handrechnung verglichen und Abweichungen erläutert.

Es zeigte sich, dass bei allen unbewehrten Trägern die Höchstlasten aus der Handrechnung nicht erreicht werden konnten. Die Modelle versagten vorher durch eine zu hohe Schubbeanspruchung. Diese konnte in der

Handrechnung nicht berücksichtigt werden, da derzeit keine einheitlichen Bemessungsansätze für die Querkrafttragfähigkeit von UHPC vorliegen. Bei den FE-Modellen mit Querkraftbewehrung kann die Querkraft im Beton hochgehängt und so zum Auflager transportiert werden. Die Zugschädigungen treten dann weniger konzentriert und erst bei einem höheren Lastniveau auf. Dadurch wird eine 20 % - 30 % höhere Maximallast erreicht. Die folgenden Abbildungen verdeutlichen das unterschiedliche Trag- und Versagensverhalten. Zur besseren Übersichtlichkeit ist jeweils nur eine Hälfte des Trägers dargestellt (Auflager jeweils links).

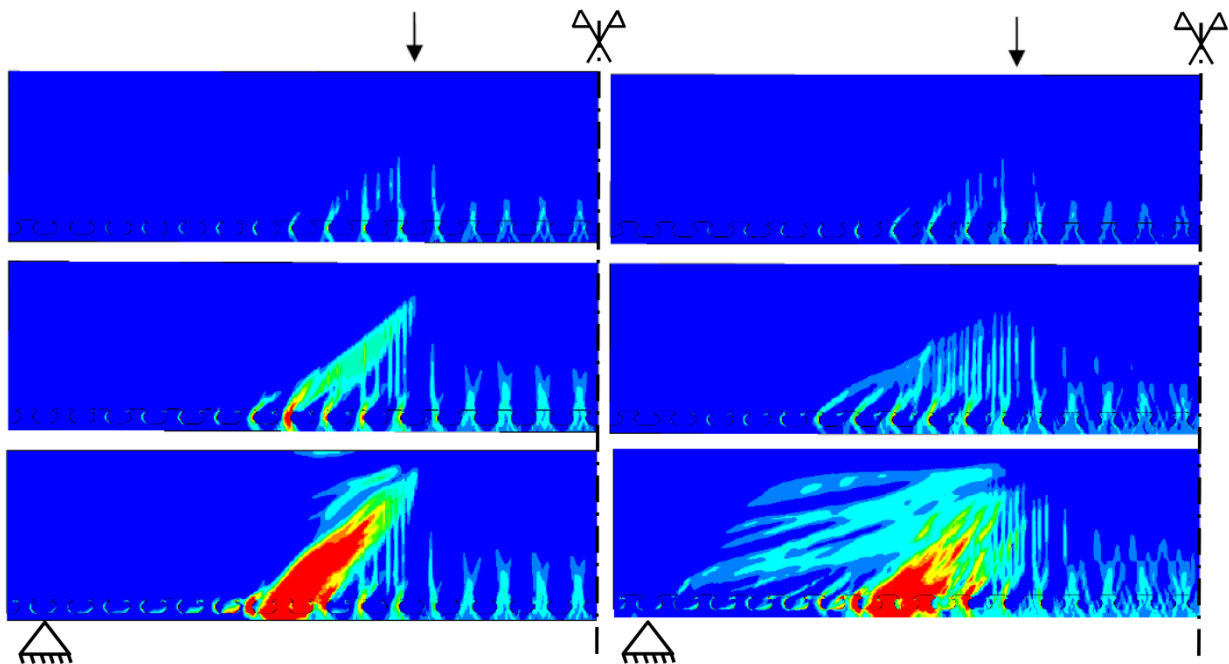


Abb. 3: Betonzugschädigung ohne (links) bzw. mit Bewehrung (rechts) bei von oben nach unten zunehmender Belastung

Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die untersuchten Versuchsträger mit UHPC und Verbunddübelleisten eine sehr hohe Tragfähigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht besitzen. Ein Einsatz in einem modularen Leichtbausystem – oder auch als Einzelelement – erscheint nach den vorliegenden Ergebnissen zunächst möglich. Bei den folgenden experimentellen Untersuchungen sollte der Schwerpunkt auf den Plattenbalken liegen, da diese weniger kippgefährdet sind als die Balken,

aber die Tragwirkung ansonsten gleich ist, und die Ergebnisse daher auf die Balken übertragen werden können. Aufgrund der FE-Ergebnisse wird empfohlen die Versuchsträger mit 3 mm und 5 mm dicken Verbunddübelleisten zusätzlich mit konventioneller Betonstahlbewehrung zu versehen. Hierdurch kann ein vorzeitiges Querkraftversagen des Ultrahochleistungsbetons vermieden werden.

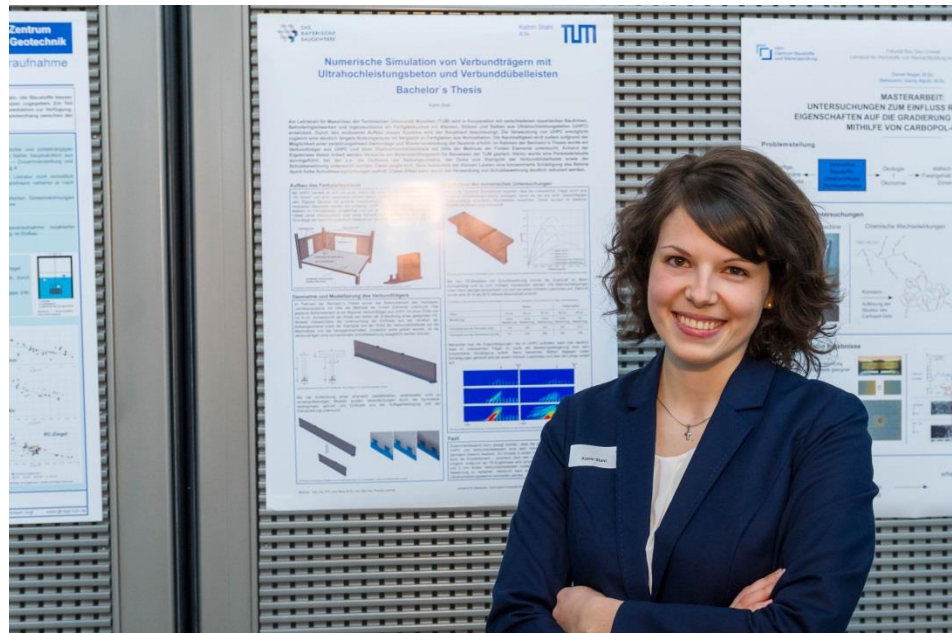
Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Fehling, E., Schmidt, M., Teichmann, T., Bunje, K., Bornemann, R., Middendorf, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht DFG FE 497/1-1. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau. Heft 1, Kassel, 2005
- [2]: Berthelémy, J., Lorenc, W.; Mensinger, M.; Rauscher, G.; Seidl, G.: Zum Tragverhalten von Verbunddübeln – Teil 1: Tragverhalten unter statischer Belastung. Stahlbau 80 (2011), Heft 3, S. 172-184.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- 1. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Heft 561 - Ultrahochfester Beton (Sachstandsbericht). Beuth-Verlag, Berlin, 2008.
- 2. Design Guide. Prefabricated Enduring Composite Beams based on innovative Shear Transmission. RFCS RFS2 – CT – 2011 – 00026 Preco+, 2013
- 3. Wurzer, O.: Zur Tragfähigkeit von Betondübeln. Universität der Bundeswehr München. Dissertation. München, 1997



Autor

Frau Katrin Stahl, geboren am 28. November 1988 in Altenstadt a. d. Waldnaab
seit 2014 Masterstudiengang Bauingenieurwesen an der Technischen Universität München
2014 Bachelor of Science im Bereich Bauingenieurwesen
2011 Dipl.-Finanzwirt (FH)
2008 Allgemeine Hochschulreife

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer.
Betreuer: Dipl.-Ing. (FH) Julia Sauer M.Sc. und Dipl.-Ing. Thomas Lechner

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

NUMERISCHE MODELLIERUNG EINER STÜTZKONSTRUKTION IN HANGLAGE

Verformungsprognose eines Bohrpfahlschachtes unter visko-hypoplastischen Bedingungen

Masterarbeit

Daniel Steinbauer

Große Bodenverformungen und mögliche Schäden an der benachbarten Bebauung gleich zu Beginn einer Bauphase sind eine ernsthafte Angelegenheit. Daher müssen Maßnahmen getroffen werden, um die Handstabilität beim weiteren Baufortschritt zu gewährleisten. Mit konventionellen Mitteln kann die Gesamtheit der Stützkonstruktion sowie die Interaktion der verschiedenen Rückverankerungen in allen Richtungen nicht ausreichend genau betrachtet werden. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines praxisgerechten, einheitlichen numerischen Rechenmodells, das zum einen die Eigenschaften der Bauwerksstruktur erfasst, zum anderen das Bodenverhalten realitätsnahe beschreibt. Die Verwendung des visko-hypoplastischen Stoffgesetzes mit intergranularer Dehnung erlaubt eine realistische Modellierung der Boden-Konstruktion-Wechselwirkung unter statischen Beanspruchungen. Um genaue Verformungsprognosen im Bereich der Bohrpfahlwand und dem umliegenden Gelände treffen zu können, wurde eine 3D-FEM Simulation mit ABAQUS durchgeführt. Wenn es um Sicherheit und dauerhaften Schutz geht, spielen die Prognose und die verifizierten sowie validierten Ergebnisse spätestens bei der Planung konstruktiver Maßnahmen und der Bauausführung eine entscheidende Rolle.

Projektvorstellung – Neubau der Wohnanlage Lindau Wannental

Im Stadtgebiet Lindau an der Wannentalstraße 37, entstehen drei Wohnanlagen mit im Gelände einbindenden Tiefgaragen und Hanggeschossen. Die Neigung steigt in Nord-Süd Richtung mit bis zu 30°. Um den resultierenden horizontalen

Erddruck des Hangs auf der Nordseite der neuen Bauwerke aufnehmen zu können und um bei den beengten Platzverhältnissen zu den Nachbarbebauungen die Hangstabilität zu gewährleisten, soll eine kreisförmige, schachtartige, überschnittene Bohrpfahlwand erstellt werden. Für die temporäre Hangstabilität im Bauzustand sorgen zusätzlich eine Steife, Durchmesser 90

cm quer über den Schacht (25,2 m lang) und eine Kombination aus freikragenden aufgelösten Bohrpfahlwänden und Böschungen, sowie rückverankerte Nagelwände im nördlichen Abschnitt (hangseitig). Es wurden sehr komplexe Baugrundverhältnisse angetroffen. Die anstehenden sogenannten Beckensedimente sind mit wasserführenden Sandlinsen in verschiedenen Lagen durchsetzt. Ein Kontakt der schluffigen Sedimente mit Wasser führt zum Verlust der Festigkeit. Dies hat insbesondere in der Bau- und Aushubphase mögliche große Verformungen und die Gefahr für die Hangstabilität (Nachbarn) zur Folge. Daher ist eine umfassende Stützkonstruktion unabdingbar.

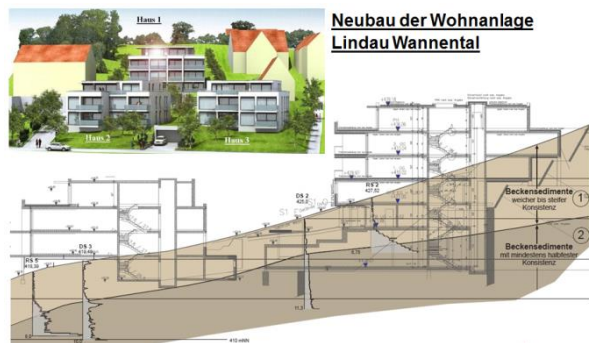


Abb. 1 Geologischer Geländeschnitt, Lindau Wannental

Motivation

Erste große Verformungen des Bodens im Bauzustand wurden dokumentiert, obwohl der Hauptteil des Aushubs noch bevorstand. So zeigten sich an den Nagelwänden Verformungen von bis zu 10 cm und erste Risse an den Spritzbetonwänden. Ein nachträglicher Schutz der Böschungen sowie der benachbarten Bebauung vor weiteren Verformungen wurde errichtet. Eine nicht unerhebliche Verzögerung des Bauablaufs war die Folge. Die Fragen waren, wo und in welcher Größenordnung werden die Verformungen noch zunehmen und ob die Stabilität des Hanges gewährleistet wird? Zur Klärung dieser Fragestellungen wurden zwei Berechnungszustände analysiert:

- Bauzustand – schrittweiser Aushub – Beobachtung und Auswertung der Verformungen in wichtigen Bauabschnitten.

- Endzustand – aufbringen von Gebäude- und Aufschüttungslasten - Prognose der Endverformungen.

Geotechnische Verbundkonstruktionen werden häufig vereinfachend als zweidimensionale Modelle (plain strain) abgebildet¹. Relevante Effekte, wie die kreisrunde Geometrie des Bohrpfahlschachtes und die damit verbundene Gewölbewirkung, die unsymmetrische Wandfläche der Nagelwände oder die Belastungen aus den seitlichen Böschungszuständen bleiben dabei unberücksichtigt. Um genauere Verformungsprognosen im Bereich der Bohrpfahlwand und dem umliegenden Gelände treffen zu können, wurde eine 3D-Simulation mit der FEM-Software ABAQUS durchgeführt.

Überblick

Im Vergleich zu Baustoffen, wie etwa Stahl und Beton weist der Boden ein viel komplizierteres Materialverhalten auf. Stoffgesetze für Böden dienen zur mathematischen Beschreibung des komplexen mechanischen Bodenverhaltens. Aus vielen Materialmodellen sind nur wenige in der Lage die Effekte, wie Druck- und Dichte- oder Zeitabhängigkeit (Kriechen, Relaxation), insbesondere für bindige Böden, korrekt wiederzugeben. Daher wurde hier das visko-hypoplastische Stoffgesetz angewendet.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines praxisgerechten, einheitlichen numerischen Rechenmodells, das zum einen die Eigenschaften der Bauwerksstruktur erfasst, zum anderen das Bodenverhalten realitätsnahe anhand der visko-Hypoplastizität beschreibt. Letztendlich soll die Möglichkeit geschaffen werden, eine Verformungsprognose des geplanten Bauwerks infolge der Boden-Stützkonstruktion-Interaktion erstellen zu können. Wobei das Rechenmodell beispielsweise durch Vergleiche mit Messungen vor Ort validiert wird.

Umsetzung und Durchführung

Zuerst wurden die Aufgaben wie Geometrie, Randbedingungen, Beziehungen und Netzgenerierung nacheinander bearbeitet. Dabei war das Ziel, eine realitätsgetreue Nachbildung der Umgebung von Lindau-Wannental zu modellieren. Das Gelände, Aushübe und weitere Details sollten genau beachtet und in das FEM-Modell eingearbeitet werden, beispielhaft in Abb. 2 links dargestellt. Der zweite Block (Abb. 2 Mitte) behandelte die Laborversuche. Im Grundbaulabor der Hochschule München wurden Bodenproben vom Bauvorhaben Lindau Wannental analysiert und erzielte Ergebnisse ausgewertet, um damit an die benötigten Daten zur Ermittlung der visko-hypoplastischen Materialparameter zu gelangen. Die Ergebnisse wurden anschließend in einem axialsymmetrischen FEM-Modell übernommen, um eine Durchführung des Kompressionsversuchs nachzurechnen. Mit dem Ziel, dass sich am Ende der Berechnung nahezu die gleichen Kompressionskurven ergeben sollten und sich damit ein „realistisches“ Bodenverhalten einstellt. Anschließend wurden die Werte aus der Parameterstudie je Bodenschicht in das eigentlich konstruierte ABAQUS-Modell Projekt Lindau-Wannental in eine Stoffgesetzs subroutine umat_lindau importiert. Die Simulation konnte beginnen.

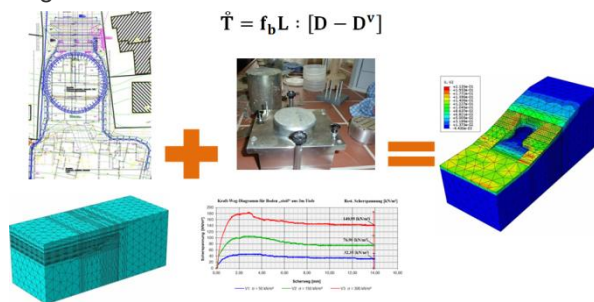


Abb. 2: Umsetzung und Vorgehensweise der 3D-Simulation

3D-Simulation

Alle wesentlichen Bauzustände wurden im Sinne einer Step-by-Step Analyse in der Simulation nachgebildet. Der Grund für den Aufwand zur

Darstellung der Simulationsschritte ist die Abhängigkeit des Bodenverhaltens vom Spannungszustand und der Belastungsgeschichte. Die im Zuge des Bauablaufs auftretenden Spannungszustände mussten in ihrer zeitlichen Reihenfolge, möglichst wirklichkeitsnah abgebildet werden.



Abb. 3: Bohrfahrling und Nagelwände

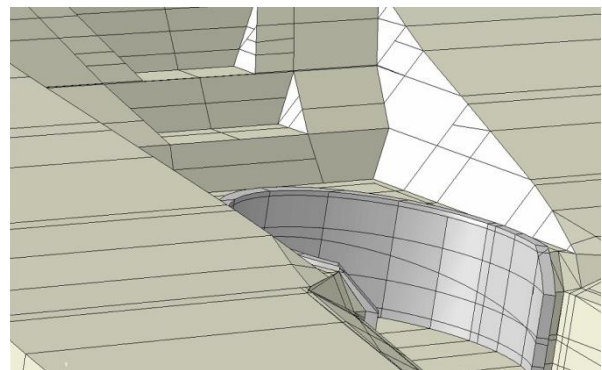


Abb. 4: Bohrfahrling und Nagelwände- Simulation

Ergebnisse – Validierung

Für eine erste Analyse der Ergebnisse aus der Simulation, sowie zur Beurteilung über deren Qualität, diente die Verifizierung der Materialparameter durch die Nachrechnung des Kompressionsversuchs (s. Abb. 5).

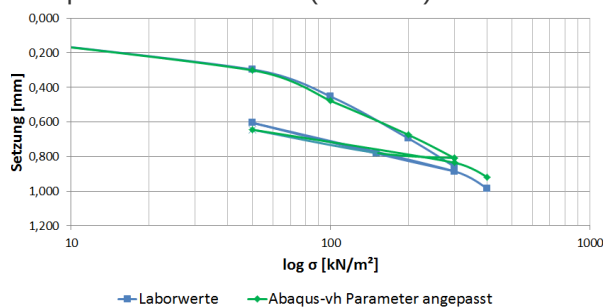
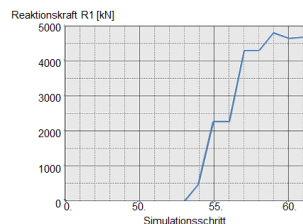


Abb. 5: Verifizierung der Materialparameter

Weiter halfen die durchgeführten Nullmessungen vor Ort. Dabei wurden an charakteristischen Punkten der Nagelwände und Bohrpfähle, Vermessungen im Zuge des Bauvorhabens in verschiedenen Intervallen ausgeführt und mit denen der Simulation verglichen. Die Ergebnisse stimmten qualitativ überein. Damit wurde bestätigt, dass die gelieferten Ergebnisse der FEM-Simulation als Prognose herangezogen werden konnten. Ferner wurden die Steifenkraft und der Erddruck auf den Bohrfahrling betrachtet (s. Abb. 6).

Steifenkraft

- Aktivierung der Steife
- Zunahme der **Steifenkraft** mit der Fortsetzung des Aushubs
- Plausibles Ergebnis durch Nachweis des Druckstabes nach EC3



Erddruck

- Erfahrungsnahe Verteilung
- Erfassung des Übergangs vom Materialbereich (Schichtenverlauf)

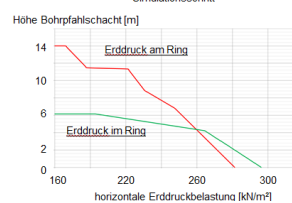


Abb. 6: Validierung Steifenkraft und Erddruck

Erkenntnisse

- ABAQUS lieferte plausible Ergebnisse. Dies spiegelt und bestätigt die in der Literatur oft zitierte „realistische Wiedergabe des Bodenverhaltens“ anhand der Verwendung der Hypo- und visko-hypoplastischen Stoffmodelle wieder.
- Die Ergebnisse der FEM-Berechnung zeigten eindeutig die Wirkungsweise des Bohrfahlschachtes und damit seine Existenzberechtigung. Mit Hilfe dieser Stützkonstruktion werden die Verformungen rund um den Bohrfahlschacht auf ein Minimum zurückgefahren. Die Stabilität des Hanges ist gewährleistet.
- Geringe Verformungen des Bohrfahrlinges von wenigen Millimetern.
- Kaum feststellbare Unterschiede im Verformungsbetrag von Bau- zu Endzustand.

- Keine Eingeständnisse auf fehlende Geometrie, Belastungs- oder Festhaltungsbedingungen dank der nahezu 1:1 Übernahme der Daten aus den Plänen.

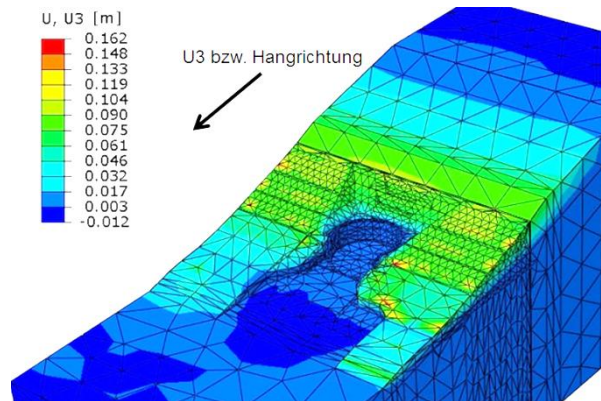


Abb. 7: Verformungen am Gesamtmodell über die komplette Simulation

Die Qualität der Berechnungen einer Simulation steht und fällt mit der Wahl des richtigen Materialgesetzes. Das visko-hypoplastische Stoffgesetz mag im ersten Moment anspruchsvoll erscheinen, zeigt bei der Ermittlung aber an wenigen Parametern eine einfache Kalibrierungsweise und verzichtet auf Schalt- oder Potentialfunktionen². So ist eine Implementierung in Computercodes relativ einfach. Die visko-Hypoplastizität ermöglicht eine genaue Beschreibung des Bodenverhaltens und seiner Merkmale. Barotropie, Pyknotropie, Entfestigung, zyklische Belastungen oder beispielsweise volumetrisches Verhalten sind bereits in der Formel eingebunden. Dadurch kann ein realistisches Bodenverhalten wiedergegeben werden, was für die Erstellung und das Aufsetzen einer Prognose von unschätzbarem Wert ist.

Fazit

Aufgrund der plausiblen Werte, wie der Reaktionskraft der Steife, den Erddruckbelastungen, sowie dem Vergleich mit den Vermessungsergebnissen vor Ort, kann die 3D-FEM-Simulation zur Erstellung einer belastbaren Prognose der Entwicklungen der Stützkonstruktionen bezüglich der Größenordnung der Belastung (Erddruck), der Verformungen und der

Schnittkräfte herangezogen werden. Der entscheidende Vorteil gegenüber einer 2D-Analyse liegt in der anschließenden Auswertung der Simulation. Jeder interessante Bereich oder Punkt des Modells kann ohne Umrechnung, Vereinfachung oder Abschätzung schnell und wirklichkeitstreu ausgewertet werden. Dadurch eröffnen sich trotz eines etwas erhöhten Design-Aufwands diverse Optimierungspotentiale, die zu monetären Ersparnissen führen können. Darüber hinaus können Risiken bei Projekten, die durch Grundbau geprägt sind, eingeschränkt

bzw. besser eingeschätzt werden. Dies kann auch zum Vorteil für mittelständische Unternehmen führen, wie es im behandelten Projekt der Fall war. Abschließend soll festgestellt werden, dass trotz repräsentativer Vorteile immer noch Verbesserungen des Rechenmodells möglich sind. Zum Beispiel durch Monitoring der Konstruktionsverformungen, im Sinne der Beobachtungsmethode, könnte eine Verifizierung der Prognose auch in Hinblick auf Kriechverformungen durchgeführt werden.

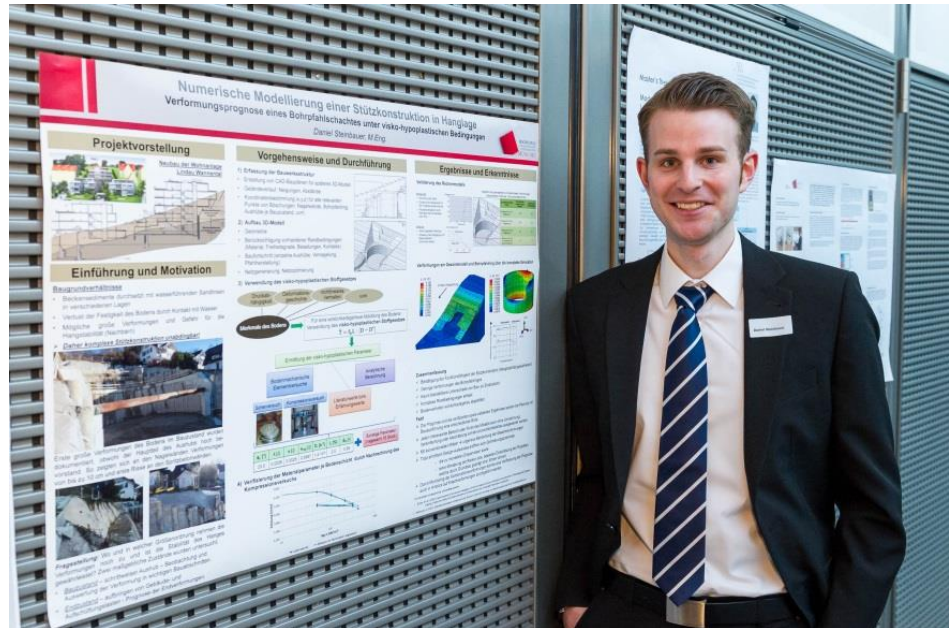
Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1] Bernecker O., Ries S. (2012): *2D oder 3D? – Vergleichende Finite Elemente Berechnungen für komplexe Gründungssysteme*, Stuttgart (Bernecker Ingenieur GmbH & Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik). S. 1.
- [2] Punlor, A. (2004): *Numerical Modelling of the Visco-Plastic Behaviour of Soft Soils*, Karlsruhe (Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe). S. 98 ff.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [01] Bühler, M.-M. (2006): *Experimental and Numerical Investigation of Soil-Foundation-Structure Interaction during Monotonic, Alternating and Dynamic Loading*, Karlsruhe (Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe).
- [02] Niemunis, A. (2003): *Extended hypoplastic models for soils*, Bochum (Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum).



Autor

Nach seinem Abitur im Jahr 2006 am Luitpold Gymnasium absolvierte Herr Daniel Steinbauer ein Freiwilliges Soziales Jahr im Krankenhaus Harlaching. Anschließend studierte er Bauingenieurwesen und erlangte den Bachelor sowie den Master of Engineering mit Schwerpunkt „Konstruktiver Ingenieurbau“ an der Hochschule München. Als Werkstudent bei Drees&Sommer und bausteinberatung sammelte er wertvolle Erfahrungen rund um Gutachten und Projektsteuerung. Seit Anfang 2015 ist er bei der TÜV SÜD Industrie Service GmbH als Experte für die Bereiche Fliegende Bauten sowie Hebezeuge und Krane tätig. In seiner Funktion unterstützt er hauptsächlich das technische Projektteam für das Dubai-I Projekt und kann so seiner Affinität rund um FE-Simulationen und statische Berechnungen voll und ganz nachgehen.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Geotechnik und Grundbau, Fachbereich der Hochschule München, bei Herrn Professor Dr.-Ing. Cezary Slominski.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS RHEOLOGISCHER EIGENSCHAFTEN AUF DIE GRADIERUNG VON STAHLFASERN MITHILFE VON CARBOPOL-GELEN

Master's Thesis

Daniel Weger, M.Sc.

Mit innovativen Baustoffen wie ultrahochfestem Stahlfaserbeton können neuartige, leichte und filigrane Schalenträgerwerke erstellt werden. Aus ökologischen und ökonomischen Gründen sollte der Stahlfasergehalt so gering wie möglich sein. Deshalb ist es wünschenswert, die Fasern im noch plastischen Beton hin zu den für die Kraftübertragung relevanten Zonen zu befördern, um den Fasergehalt auf ein Minimum zu reduzieren. Es konnte gezeigt werden, dass die Rotation als mögliche Technik für die Gradierung von Stahlfasern in dünnwandigen Fertigteilen anwendungsabhängig angewendet werden kann. Des Weiteren wurde eine Möglichkeit gefunden, die Faserverteilung bei einer festgelegten Rotationsgeschwindigkeit abhängig vom eingesetzten Beton und der Faserart zu berechnen, um bei einer Praxisanwendung auf aufwendige Vorversuche verzichten zu können. Um eindeutige Aussagen über die Faserverteilung während und nach der Rotation treffen zu können, wurden alle Untersuchungen mit transparenten Carbopol-Gelen durchgeführt. Carbopol weist ähnliche rheologische Eigenschaften wie Beton auf.

Keywords: Gradierung, Stahlfaser, ultrahochfester Beton, UHPC, Carbopol, Gel, Ultrez 21, Fertigteile, Schalenträgerwerk, Rheologie, Fließeigenschaften, Rotation

Aufbau der Arbeit

Zunächst wurde ein Überblick über die Eigenschaften von Ultrahochfestem Beton (UHFB) / Ultra High Performance Concrete (UHPC), Faserbeton, Begriffe der Rheologie und das Verfahren der Rotationsgradierung gegeben. Anschließend wurden die Eigenschaften der

Polyakrylsäure und dem verwendeten Polymer Carbopol Ultrez 21, sowie dessen Anwendung in der Forschung dargelegt. Zu Beginn des Praxisteils der Arbeit wurden Voruntersuchungen an den verwendeten Carbopol-Gelen durchgeführt. Nach einer Beschreibung der Herstellung der verwendeten Gele folgten die Untersuchung möglicher chemischer Wechsel-



Abb. 1: Rotationsmaschine

wirkungen der Stahlfasern mit der Carbopol-Matrix und die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften der hergestellten Gele. Anschließend wurde auf die Konzeption, Entwicklung, Bau und Bedienung der für diese Arbeit erstellten Rotationsmaschine (Abb.1) eingegangen. Im letzten Teil der Arbeit wurden Rotationsversuche durchgeführt, um obere und untere dynamische Stabilitätskriterien und Grenzen für eine Berechnung der Faserverteilung zu bestimmen. Abschließend erfolgte eine Bewertung der Faserbewegung und der Eignung des Rotationsverfahrens für die Herstellung gradierter Bauteile.

Untersuchte Gele

Um den Einfluss der Fließfähigkeit auf die Gradierung der Fasern zu untersuchen, wurden Carbopol-Gele mit drei verschiedenen Fließgrenzen hergestellt. Eine Faserbewegung findet erst statt, wenn die auf die Faser wirkende Scherkraft groß genug ist, um die Fließgrenze der Matrix zu überwinden, also die Kraft auf die Faser größer ist als der Scherwiderstand des Gels. Der Gehalt der Mikrostauffasern

(0,19 mm x 6 mm) betrug 0,5 Vol.-%. Die Fließgrenzen der Gele sowie der Gehalt und die Abmessungen der verwendeten Fasern orientierten sich an in der Praxis bereits hergestellten und bewährten Betonen.

Chemische Voruntersuchungen

In Vorversuchen wurde unter anderem untersucht, ob es zu einer Beeinflussung der Fließeigenschaften des Gels durch eine chemische Reaktion der Stahlfasern mit dem leicht alkalischen Milieu ($\sim \text{pH } 8$) des Gels kommen kann. Die Untersuchungen ergaben, dass ein enges Zeitfenster für die Versuche eingehalten werden sollte, um gleichbleibende Eigenschaften des Gels sicher zu stellen. Im Gel findet trotz der leicht alkalischen Umgebung eine Korrosion der Stahlfasern statt, bei der eine große Menge an Fe^{2+} -Ionen freigesetzt wird. Diese Ionen zerstören die Strukturen der Carbopol-Polymere, was wiederum zu einer Verflüssigung des Gels führt. Diese Korrosion ist nach einer Lagerungsdauer von drei Monaten deutlich unter einem Lichtmikroskop sichtbar (Abb. 2 und Abb. 3). Eine ausführliche Diskussion der chemischen Reaktionen findet sich in der vollständigen Masterarbeit.

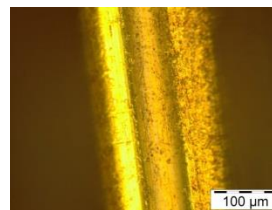


Abb. 2: Referenzfaser bei 200-facher Vergrößerung

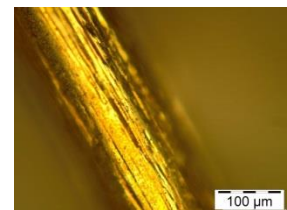


Abb. 3: Faser in pH 8 Lösung bei 200-facher Vergrößerung nach drei Monaten

Berechnung der Faserverteilung

Mit Hilfe des folgenden Versuchsprogramms konnte eine Methode entwickelt werden, um fließgrenzenabhängig Faserbewegungen vom Rotationsmittelpunkt aus zu berechnen. Die stauffaserhaltigen Gele wurden in eine

transparente Prismenschalung gefüllt und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten rotiert (Abb. 4 und 5). Nach jeder Geschwindigkeitsstufe wurden Aufnahmen des Gradierungsfortschritts gemacht und anschließend die Umdrehungsgeschwindigkeit der Maschine erhöht. Die Bilder wurden photogrammetrisch in Matlab ausgewertet. Der entwickelte Matlab-Algorithmus analysiert das Bild über seine Breite und berechnet Grauwertkurven, die Aussagen über die Faserverteilung in der Schalung ermöglichen (Abb. 4). Mit diesen Kurven konnten Stabilitätskriterien bestimmt werden (Gleichung 1).

Mit diesen Kriterien kann abhängig von der Fließgrenze der Matrix berechnet werden, ab welchem Abstand vom Rotationsmittelpunkt Faserbewegungen stattfinden und ab welchem Abstand keine Fasern mehr in der Matrix vorhanden sind. Somit genügt die Kenntnis über die Fließgrenze der Matrix, um ohne weitere Versuche die Ausdehnung des gradierten Bereiches im Bauteil zu ermitteln.

Anwendung in der Praxis

Bei Betrachtung der Faserverteilung zeigte sich, dass die Rotationsgradierung (mit einer einzelnen Faserart) wahrscheinlich nicht zur Produktion von Schalen in Schalentragsystemen geeignet ist. Der dort gewünschte Zustand mit einem vom Rotationszentrum hin zu den Außenrändern gleichmäßig zunehmendem Fasergehalt, kann mit der Rotationsgradierung vermutlich nicht erreicht werden. Durch die auf die Fasern wirkende Zentripetalkraft, die quadratisch mit zunehmendem Radius der Schalung ansteigt, bewegen sich die Fasern umso schneller vom Rotationszentrum weg, je weiter sie vom Rotationsmittelpunkt entfernt sind. Dies erzeugt in der Schalung eine genau entgegengesetzte Faserverteilung als benötigt. Ebenso entsteht im Rotationszentrum ein

Gleichung 2: Berechnung des Stabilitätskriteriums [1, 2, 3, 4]

$$Y_{ud/od} = \frac{\tau_0 r_{ud/od}}{\left(\frac{6V}{\pi}\right)^{1/3} \Delta \rho v^2}$$

$Y_{ud/od}$: dynamisches Stabilitätskriterium [-]

$r_{ud/od}$: dynamischer Radius [m]

τ_0 : Fließgrenze [Pa]

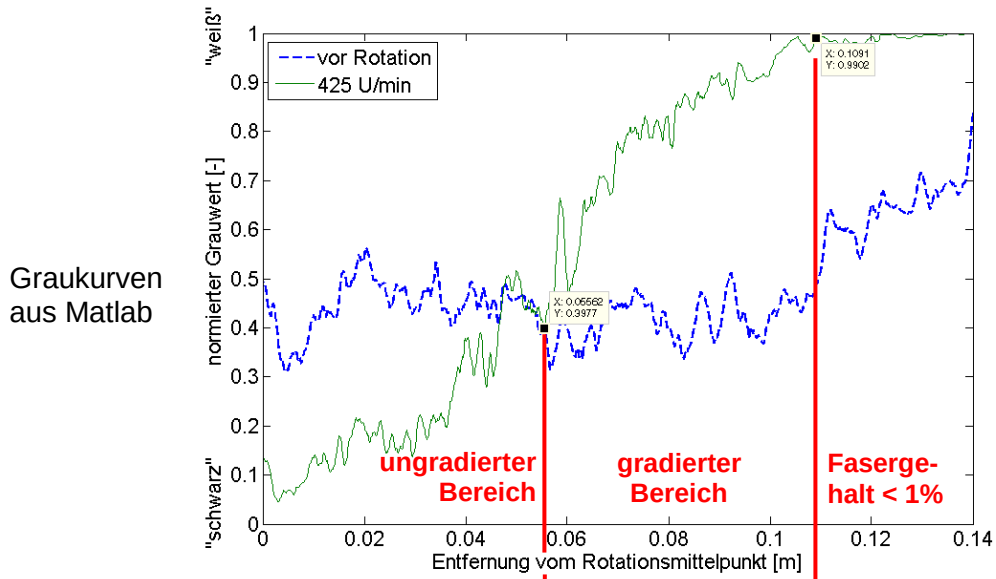
V : Volumen der Stahlfaser [m³]

$\Delta \rho$: Dichtedifferenz zwischen Stahlfaser und Matrix [kg/m³]

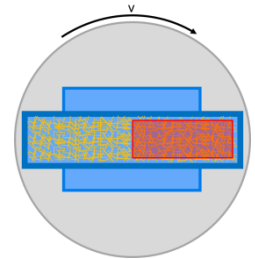
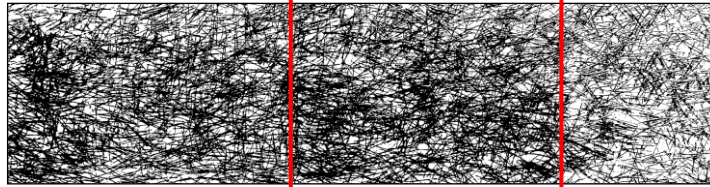
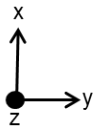
v : Umdrehungsgeschwindigkeit [m/s]

ungradierten Bereich, der von der Umdrehungsgeschwindigkeit und der Fließgrenze abhängig ist (Abb. 4 und 5). Dieser kann bei gleichbleibender Fließgrenze nur mit höheren Geschwindigkeiten verkleinert werden. Diese beiden Effekte verstärken sich negativ. Je kleiner der ungradierte Bereich im Mittelpunkt der Rotationsachse durch eine höhere Geschwindigkeit ist, desto kleiner wird der gradierte Bereich, bis keine Fasern mehr in der Matrix vorhanden sind.

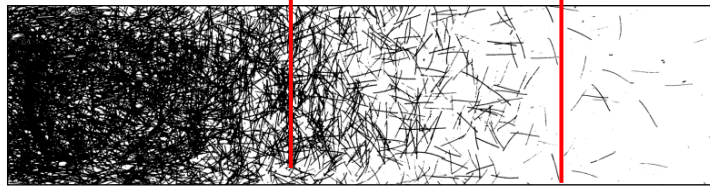
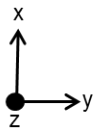
Das Verfahren kann aber sinnvoll zur Produktion anderer Bauteile eingesetzt werden. Es ist möglich, modulare Bauteile mit faserverstärkter Koppelfuge und Bauteile für Punktlasten in Platten- oder Balkenmitte (Abb. 6 und 7) herzustellen, da genau dort ein großer Fasergehalt in der Bauteilmitte erforderlich ist. Verwendet man verschiedene Fasergrößen in einem Bauteil, kann auch die Lastübertragungsfähigkeit zwischen Schalen in Schalentragsystemen erhöht werden, da eine selektive Verteilung durch den Gewichtsunterschied der Fasern möglich ist.



Vor Rotation



Nach Rotation bei 425 U / min



[cm] 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

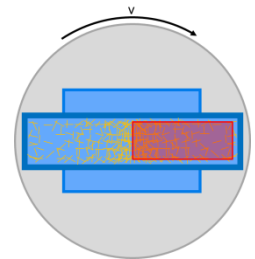


Abb. 4: Photogrammetrische Auswertung des Fasergehalts (s/w – Bilder entsprechen dem roten Ausschnitt der rechts davon dargestellten Schalung)

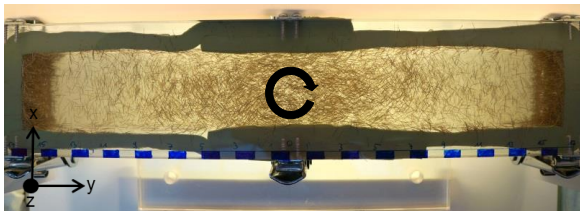


Abb. 5: bei 500 U/min rotiertes Gel, Ansicht von oben

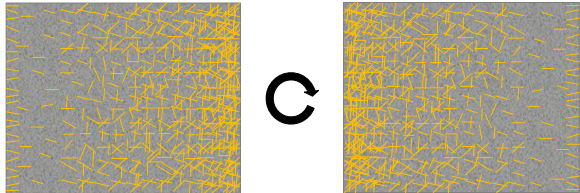


Abb. 6: Bauteile mit faserverstärkter Koppelfuge

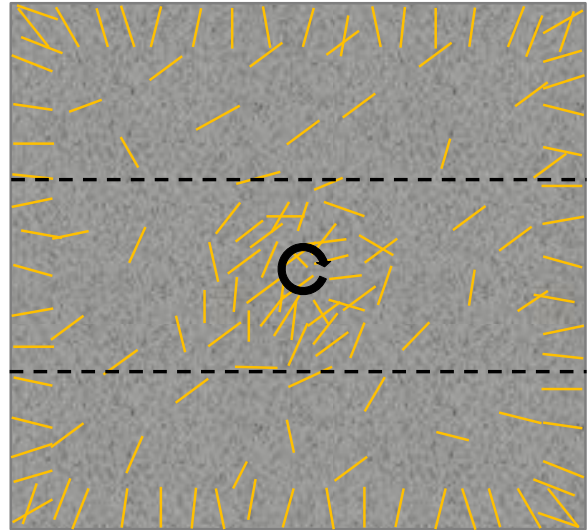


Abb. 7: Bauteile für Punktlasten in Platten oder Balkenmitte

Fazit

Den Ergebnissen nach ist die Rotation als Technik zur Gradierung von Stahlfasern in Fertigteilen je nach Verwendungszweck einsetzbar und stellt durch die Möglichkeit zur Berechnung der Faserverteilung eine Herstellungsmethode mit großem ökonomischem und ökologischem Potential dar.

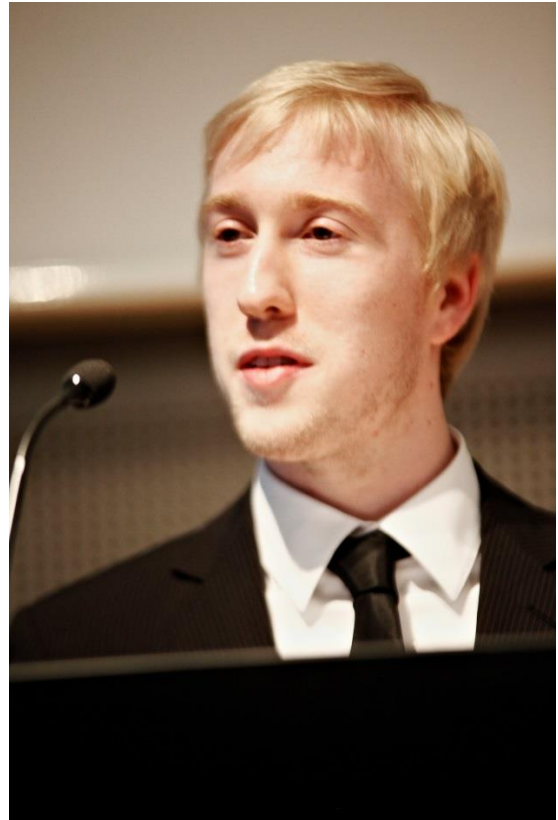
Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Jossic, L., Magnin, A.: Drag and Stability of Objects in a Yield Stress Fluid: AlchE Journal 47, S. 2666–2672.
- [2]: Lowke, D.: Sedimentationsverhalten & Robustheit Selbstverdichtender Betone - Optimierung auf Basis der Modellierung interpartikulärer Wechselwirkungen. Doktorandensymposium 2010 des DAfStb am 11. und 12. November an der TU Kaiserslautern.
- [3]: Lowke, D.: Sedimentationsverhalten & Robustheit Selbstverdichtender Betone - Optimierung auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen. Dissertation 24.06.2013.
- [4]: Roussel, N.: A theoretical frame to study stability of fresh concrete: Materials and Structures 39, S. 81–91.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- 1. Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., Amziane, S.: Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material: Construction and Building Materials 24, S. 1664–1671.
- 2. Jossic, L., Magnin, A.: Drag and Stability of Objects in a Yield Stress Fluid: AlchE Journal 47, S. 2666–2672.
- 3. Lowke, D.: Sedimentationsverhalten & Robustheit Selbstverdichtender Betone - Optimierung auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen. Dissertation 24.06.2013.
- 4. Mezger, T.: Das Rheologie-Handbuch. Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern. Hannover: Vincentz Network 2006.
- 5. Roussel, N.: A theoretical frame to study stability of fresh concrete: Materials and Structures 39, S. 81–91.



Autor

Herr Daniel Weger, geboren am 09.12.1988 in Landshut. 1999 - 2008 Besuch des Hans-Carossa-Gymnasium in Landshut, Abschluss Abitur. 2008 - 2011 Bachelorstudium des Bauingenieurwesens an der TUM, Abschluss B.Sc. 2011 bis Januar 2014 Masterstudium im Bereich Baustoffe, Bauchemie und Instandsetzung an der TUM, Abschluss M.Sc. Seit Januar 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TUM, cbm - Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Lehrstuhl Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen, AG Betontechnologie.

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl Werkstoff und Werkstoffprüfung im Bauwesen der Technischen Universität München (TUM), Professor Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Betreuerin: Sandy Illguth, M.Sc.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.