

F 2720

Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz





Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 2720

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2009

ISBN 978-3-8167-8053-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00 Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz

Ein Gemeinschaftsprojekt deutscher Forschungseinrichtungen







Universität Karlsruhe (TH) Forschungsuniversität • gegründet 1825

JNIVERSITÄT LEIPZIG

TECHNISCHE

UNIVERSITÄT DARMSTADT Institut für Massivbau und Baustofftechnologie

Fachgebiet

Massivbau

Institut für Bauforschung

Institut für Mineralogie, Kristallographie und Materialwissenschaft

Lehrstuhl für Massivbau

Institut für Baubetrieb

Schlussbericht vom 30.11.2008

Gefördert durch







Forschungsbericht

Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz

von

Carl-Alexander Graubner Harald Beitzel Marc Beitzel Carsten Bohnemann Erik Boska Wolfgang Brameshuber Frank Dehn Andreas König Jan Lingemann Christoph Motzko Harald S. Müller Klaus Pistol Tilo Proske Christian Stettner Konrad Zilch

| Projekt: | Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz |
|----------------------|--|
| Berichtnummer: | F09-7-2008 (Nr. TU Darmstadt Fachgebiet Massivbau) |
| Berichtszeitraum: | November 2007 - November 2008 |
| gefördert durch: | das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung mit Mitteln aus dem Bundeshaushalt für Forschungsprojekte im Rahmen der Forschungsinitiative "Zukunft Bau" Zeichen: Z 6 – 10.08.18.7-07.29/ II 2 – F20-07-022 |
| | Benno Drössler GmbH & Co. Bauunternehmung KG, Bilfinger Berger AG, Max Bögl Bauunternehmen GmbH, ELBA-WERK Maschinen-Gesellschaft mbH, Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig, Güteschutzverband Betonschalungen e.V., RSB Schalungstechnik GmbH & Co, Wayss & Freytag Ingenieurbau AG |
| ausführende Stellen: | Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac), Institut für Bauverfahrens- und Umwelttechnik Trier (IBU), Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Massivbau, Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau, Universität Leipzig, Institut für Mineralogie, Kristallographie und Materialwissenschaft, Technische Universität Darmstadt, Institut für Baubetrieb |
| Koordination: | Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Massivbau, DrIng. Tilo Proske |

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Vorwort

Der vorliegende Forschungsbericht dokumentiert die Ergebnisse eines Verbundforschungsprojektes zur Belastung von Schalungssystemen bei der Verwendung von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz. Verschiedene Wissenschaftler deutscher Forschungseinrichtungen schlossen sich zu einer Forschergruppe zusammen, um die Kompetenzen auf dem Gebiet des Frischbetondrucks zu bündeln. Aufgrund des Umfangs und der Komplexität der zu lösenden Aufgaben wurde das Forschungsvorhaben in fünf Teilprojekte (A bis E) unterteilt, die von den Forschungseinrichtungen entsprechend der jeweiligen Leistungsfähigkeit bearbeitet wurden.

Dieser Bericht enthält die fünf Schlussberichte, welche zu den einzelnen Teilprojekten erstellt wurden. Vorangestellt ist ein zusammenfassender Berichtsteil, der die Zielstellung des Vorhabens, die Vorgehensweise zu Bearbeitung und eine Zusammenfassung der Ergebnisse beinhaltet.

Das Vorhaben wurde insbesondere durch die finanzielle und materielle Unterstützung von Seiten des BMVBS über das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung sowie durch eine Reihe namhafter deutscher und österreichischer Bauunternehmen, Baumaschinen- und Schalungshersteller ermöglicht. Hierfür sei sehr herzlich gedankt. Gedankt sei weiterhin allen Forschungspartnern für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit sowie die zügige und termingerechte Bearbeitung des Forschungsvorhabens. Für die beratende Unterstützung durch Herrn Professor Dr.-Ing. L. Lohaus, Herrn Dipl.-Ing. H. Schuon, Herrn Dipl.-Ing. L. Meyer sowie Herrn Dr.-Ing. M. Brüggemann wird ebenfalls sehr herzlich gedankt.

Darmstadt, November 2008

lat Mar. 16

Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner

Inhaltsverzeichnis

| 1 | Zielsetzung des Gesamtvorhabens | 3 |
|---------|---|-------|
| 1.1 | Ausgangssituation | 3 |
| 1.2 | Zielstellung des Gesamtvorhabens | 4 |
| 2 | Stand des Wissens | 5 |
| 3 | Koordination des Forschungsvorhabens und Projektsitzungen | 6 |
| 4 | Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse | 7 |
| 4.1 | Untersuchungsmethodik des Gesamtvorhabens | 7 |
| 4.2 | Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse der Teilprojekte | 11 |
| 5 | Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und weiterer Forschungsbedarf | 12 |
| 5.1 | Zusammenfassung | 12 |
| 5.2 | Forschungsbedarf | 14 |
| 6 | Literaturverzeichnis | 15 |
| 7 | Danksagung | 17 |
| Schluss | bericht Teilprojekt A | A - 1 |
| Schluss | bericht Teilprojekt B | B - 1 |
| Schluss | bericht Teilprojekt C | C - 1 |
| Schluss | bericht Teilprojekt D | D - 1 |

Schlussbericht Teilprojekt E E - 1

1 Zielsetzung des Gesamtvorhabens

1.1 Ausgangssituation

Der Frischbetondruck stellt die maßgebliche Einwirkung dar, welche bei der Bemessung und Konstruktion von Schalung und Rüstung zu berücksichtigen ist. Die Höhe des Frischbetondrucks beeinflusst signifikant die Materialkosten für die Schalungssysteme und damit die Herstellungskosten. Dies erfordert eine möglichst realitätsnahe Abschätzung dieses Lastfalls.

Die bauausführenden Unternehmen sind in den vergangenen Jahren verstärkt dazu übergegangen sehr fließfähige und Selbstverdichtende Betone (SVB) zu verwenden, um unter anderem die immer schlankeren und dichter bewehrten Betonbauteile fehlerfrei betonieren zu können und um vertragskonforme Oberflächeneigenschaften zu erzielen. Da sich die rheologischen und mechanischen Eigenschaften der hoch fließfähigen Betone von den bisher eingesetzten Betonen signifikant unterscheiden, stellt sich die Frage nach der Höhe des auf die Schalungen einwirkenden Frischbetondrucks.

Dem verstärkten Einsatz fließfähiger Betone wurde durch die Einführung von DIN 1045-2:2001-07 in Verbindung mit DIN EN 206-1:2001-07 Rechnung getragen. Hierin wird der im Betonbau übliche Konsistenzbereich um die Ausbreitmaßklassen F5 und F6 erweitert und der Beton hinsichtlich der allgemeinen Festlegungen, der Definition der Eigenschaften, der Herstellung sowie der Konformität geregelt. Konkrete Angaben zur Berechnung des Frischbetondrucks fehlen in DIN 1045-2:2001-07 jedoch. Für Herstellung und Anwendung Selbstverdichtender Betone (SVB), deren Ausbreitmaß a > 700 mm liegt, gilt seit 2003 die DAfStb-Richtlinie für SVB.

Der maximale Frischbetondruck wird insbesondere von der Betoniergeschwindigkeit, der Ausbreitmaßklasse und dem Erstarrungsverhalten beeinflusst. Zur Ermittlung des Frischbetondrucks auf lotrechte Schalungen ist derzeit DIN 18218:1980-09 anzuwenden. Der Gültigkeitsbereich dieser Norm ist auf ein maximales Ausbreitmaß von a = 600 mmund damit auf die Ausbreitmaßklassen F1 bis F4 nach DIN 1045-2:2001-07 / DIN EN 206-1:2001-07 begrenzt. Für die fließfähigen Betone mit einem Ausbreitmaß von a > 600 mm existieren derzeit keine Regelungen zum anzusetzenden Frischbetondruck auf Schalungen. Aufgrund unzureichender Erkenntnisse zum Frischbetondruck von SVB wird in der DAfStb-Richtlinie für SVB für die Dimensionierung der Schalung lediglich die Aussage getroffen, dass der volle Flüssigkeitsdruck anzusetzen ist, falls keine anderen Nachweise erfolgen. Dieser Ansatz führt jedoch gerade bei hohen Bauteilen zu sehr unwirtschaftlichen Schalungssystemen. Der seit Anfang 2008 vorliegende Entwurf zur Abschätzung der Frischbetondrucks auf lotrechte Schalungen E DIN 18218:2008-01, beeinhaltet erstmals explizite, vom hydrostatischen Ansatz abweichende Berechnungsansätze für Betone mit fließfähiger Konsistenz.

Beim Einsatz fließfähiger Betone vermehrt auftretende Schadensfälle an Schalung und Rüstung zeigten die zwingende Notwendigkeit der raschen Lösung dieser Problemstellung. In diesem Zusammenhang wurde auch die Untersuchung der Arbeitssicherheit beim Vorgang "Betonieren" als besonders notwendig angesehen. Eine genaue Ermittlung des auftretenden Frischbetondrucks ermöglicht zudem die zutreffende Bestimmung der Schalungsverformung und erhöht damit die Ausführungsqualität der Betonbauteile, z. B. hinsichtlich Maßhaltigkeit und Oberflächenbeschaffenheit.

Durch den Abbau der Hemmnisse hinsichtlich des Einsatzes fließfähiger und selbstverdichtender Betone wird nicht nur qualitativ hochwertiges und wirtschaftliches Bauen gefördert, sondern auch der Arbeitsschutz signifikant verbessert. Infolge der Verringerung bzw. dem Wegfall der Vibrationsverdichtung wird die Lärmemission und die individuelle Vibrationseinwirkung durch handgeführte Rüttler an den Arbeitsplätzen deutlich reduziert und somit ein Beitrag zum Gesundheitsschutz geleistet.

Da auch international keine belastbaren Forschungsergebnisse zum Frischbetondruck fließfähiger Betone vorliegen, können die gewonnenen Erkenntnisse zur Verbesserung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der stark exportorientierten Schalungshersteller beitragen. Damit soll das Forschungsvorhaben einen Beitrag zur Beschäftigungssicherung mittelständischer Unternehmen in Deutschland leisten.

1.2 Zielstellung des Gesamtvorhabens

Das Forschungsvorhaben hatte zum Ziel die vordringlich zu lösenden Aufgabenstellungen hinsichtlich des Frischbetondrucks fließfähiger Betone zu behandeln, um bestehende Hemmnisse beim Einsatz dieses innovativen Werkstoffs rasch zu beseitigen. Die Arbeiten konzentrierten sich daher auf die wesentlichen Einsatzgebiete fließfähiger Betone und lotrechte Schalungen.

Als Endergebnis des Forschungsvorhabens sollte ein vereinfachtes Verfahrens zur Berechnung des Frischbetondrucks fließfähiger Rüttelbetone der Konsistenzklassen F5 und F6 sowie Selbstverdichtender Betone vorliegen.

Zunächst war dazu das Materialverhalten des Frischbetons (rheologisches Verhalten, Verformungsverhalten und Reibungswiderstand im Zusammenhang mit dem Ansteif- und Erstarrungsverhalten) zu analysieren. Des Weiteren sollten Großversuche durchgeführt werden, um nachfolgend Berechnungsmodelle zu erarbeiten und zu kalibrieren. Weiterhin waren Aspekte der Arbeitssicherheit und der Qualitätssicherung Forschungsgegenstand. Aufgrund der Aufgabenfülle und der hohen Komplexizität der Problemstellung arbeiten im Forschungsprojekt Vertreter aus verschiedenen deutschen Forschungseinrichtungen entsprechend der jeweiligen Leistungsfähigkeit zusammen.

Mit den Ergebnissen der Forschung wird erhofft, nicht nur die Wirtschaftlichkeit von Schalung und Rüstung zu verbessern und die Herstellungskosten von Bauwerken zu optimieren, sondern auch die Wettbewerbsfähigkeit mittelständischer Schalungshersteller und Bauunternehmen sowie die Arbeitssicherheit zu erhöhen.

2 Stand des Wissens

Erfahrungen im Umgang mit Betonen der Konsistenzklasse F5 und F6 sowie Selbstverdichtenden Betonen und entsprechende systematische Untersuchungen hierzu haben gezeigt, dass die Höhe und Verteilung des Frischbetondrucks von einer Vielzahl von Kenngrößen beeinflusst wird. Teilweise wurden Drücke gemessen, die über den hydrostatischen Frischbetondruck hinausgehen. Demgegenüber wurden bei einer Reihe von Messungen Frischbetondrücke ermittelt, welche wesentlich geringer waren als der hydrostatische Frischbetondruck. Die zum Teil widersprüchlichen Messergebnisse sind mit den unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften der verwendeten Betone und den stark variierenden (meist aber nicht dokumentierten) Randbedingungen zu begründen. Ein geeignetes Verfahren zur Bestimmung des Frischbetondrucks fehlt bisher.

Vor diesem Hintergrund haben sich die Forschungspartner und weitere Partner aus der Industrie und den Verbänden im Jahre 2005 zu der Initiativgruppe "Schalungsdruck" zusammengeschlossen und einen Sachstandsbericht [1] zu der dargelegten Problematik erarbeitet. Dieser stellt die wesentlichen Erkenntnisse auf neuestem Wissensstand dar und zeigt den notwendigen Forschungsbedarf auf.

Als wichtigste Einflussparameter auf den Frischbetondruck wurden die Bauteilabmessungen, die Betoniergeschwindigkeit, die Frischbetoneigenschaften (Viskosität, Fließgrenze) sowie die Randbedingungen beim Betoneinbau identifiziert.

Die bisher verwendeten Modelle zur Berechungen des Frischbetondrucks auf lotrechte Schalungen mit und ohne mechanische Verdichtung versuchen auf zum Teil sehr unterschiedliche Weise das Verhalten des Frischbetons in der Schalung zu beschreiben. Neben Modellen, die auf mechanischen Grundlagen beruhen, existiert eine Reihe auf Basis von Bauteilmessungen empirisch abgeleiteter Rechenverfahren.

Die Berechnung des Frischbetondrucks fließfähiger Betone führt aufgrund der spezifischen Materialkenngrößen des Frischbetons (geringe innere Reibung) bei verschiedenen Ansätzen stets zu quasi-hydrostatischem Druckverhalten und damit zu unwirtschaftlichen Ergebnissen. In weiteren Verfahren [2], [3], [4] ist der Gültigkeitsbereich stark eingeschränkt, sodass die Anwendung für fließfähige Betone nicht möglich ist. Ein Berechnungsverfahren für Selbstverdichtenden Beton wird in [1], [5] vorgestellt. Es fehlen hier jedoch genaue Angaben zu den erforderlichen Materialparametern. Ein vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung des Frischbetondrucks fließfähiger Betone inklusive SVB auf lotrechte Schalungen wurde von Proske/Schuon [1] erarbeitet. Die druckmindernde Reibung zwischen Beton und Schalung bzw. Bewehrung (Silowirkung) wird auf der sicheren Seite liegend nicht angesetzt. Ebenso fehlen Angaben zum Einfluss von Vibrationen und Erschütterungen.

Auf Grundlage des DAfStb-Sachstandberichtes [1] wurde der Normenentwurf E DIN 18218:2008-01 erarbeitet, welcher erstmals explizite, vom hydrostatischen Ansatz abweichende Berechnungsansätze zum Frischbetondruck von Betonen mit fließfähiger Konsistenz beeinhaltet. Eine Berechnung des Frischbetondrucks für geneigte Schalungen ist bisher lediglich für Rüttelbetone der Konsistenzklasse F1 bis F4 möglich. Untersuchungen hierzu liegen von Specht [6] vor.

3 Koordination des Forschungsvorhabens und Projektsitzungen

Das Verbundforschungsvorhaben wurde durch die Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Massivbau koordiniert. Die generelle Abstimmung der Forschungsarbeiten inklusive der Festlegung von allgemein verbindlichen Arbeitsanweisungen und Randbedingungen erfolgte auf den gemeinschaftlichen Projektsitzungen, auf denen sowohl Vertreter aller Forschungsstellen, Mitglieder der Beratergruppe und Vertreter des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung anwesend waren. Die detaillierte Abstimmung der experimentellen Versuche wurde auf Arbeitsebene zwischen den jeweils zuständigen Forschungsstellen vorgenommen.

Die 1. gemeinschaftliche Projektsitzung fand am 06.11.2007 in Darmstadt statt. Auf dieser Sitzung wurden insbesondere die anzustrebenden Kenngrößen (Frischbetoneigenschaften, Erstarrungsverhalten) der zu untersuchenden Betone festgelegt. Des Weiteren wurden die bei den Untersuchungen zum Frischbetondruck durchzuführenden Materialprüfungen und zu dokumentierenden Messgrößen definiert. Ebenfalls erfolgten die detaillierte Festlegung der terminlichen Situation sowie die Klärung des Vorgehens zur Weitergabe der Zuwendungsmittel an die einzelnen Forschungsstellen.

Die 2. gemeinschaftliche Projektsitzung fand am 31.03.2008 in Frankfurt/M. statt. Auf dieser Sitzung wurden von den einzelnen Forschungsbeteiligten die Ergebnisse der bisher durchgeführten Untersuchungen präsentiert und diskutiert. Unter Mitwirkung der Berater Univ.-Prof. Dr.-Ing. L. Lohaus und Dipl.-Ing. H. Schuon wurden die weiteren Arbeiten abgestimmt. Um eine möglichst hohe Kohärenz der Forschergebnisse zu erreichen, wurden weitere einheitliche Randbedingungen definiert. Weiterhin wurden die Forschungsstellen dazu angehalten, die Großversuche derart zu koordinieren, dass gewonnene Erkenntnisse bei der Vorbereitung und Durchführung weiterführender Untersuchungen Berücksichtigung finden können.

Die 3. gemeinschaftliche Projektsitzung fand am 27.08.2008 in Frankfurt/M. statt. Auf Basis der Forschungsergebnisse aller Forschungsstellen wurde insbesondere das Vorgehen zur Entwicklung eines praxisbezogenen analytischen Modells diskutiert.

4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

4.1 Untersuchungsmethodik des Gesamtvorhabens

Um die Parameter, welche den Frischbetondruck maßgeblich beeinflussen, identifizieren und deren Einfluss quantifizieren zu können, ist die Kenntnis des Materialverhaltens des Frischbetons, wie z. B. die zeitliche Entwicklung der rheologischen Eigenschaften, des Verformungsverhaltens und des Reibungswiderstandes, unerlässlich.

Zunächst wurden verschiedene Modellrezepturen für Betone der Konsistenzklassen F5, F6 und SVB entwickelt. Die vier für die Untersuchungen ausgewählten selbstverdichtenden Betone können zum niedrig- und hochviskosen Mehlkorntyp und zum niedrig- und hochviskosen Stabilisierertyp zugeordnet werden. Die Bestimmung verschiedener Frischbetoneigenschaften erfolgte an allen Betonen zu verschiedenen Zeitpunkten nach Mischungsfertigstellung mit standardisierten Prüfverfahren. Zusätzlich wurden an Referenzmörteln rheologische Messungen mit Hilfe von Viskosimetern durchgeführt.

Die entwickelten Modellrezepturen wurden allen Forschungsstellen als Richtrezepturen zu Verfügung gestellt. Bei der Durchführung der Versuche waren entsprechend der lokalen Besonderheiten zum Teil Abweichungen von den Richtrezepturen notwendig. Jedoch mussten die jeweils eingesetzten Betone verschiedene Kriterien hinsichtlich der Frischbetoneigenschaften, wie z. B. das Ausbreitoder Setzfließmaß, die Trichterauslaufzeit, Verarbeitbarkeitszeit und die Erstarrungszeiten, erfüllen. Das Erstarrungsverhalten der Betone wurde mit verschiedenen Prüfverfahren ermittelt und diese hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit bewertet. Des Weiteren wurde der Einfluss von Erschütterungswirkungen auf das Ansteif- und Erstarrungsverhalten des Frischbetons analysiert.

Die Versuche zum Reibungsverhalten des Frischbetons wurden an einer bestehenden Versuchsapparatur durchgeführt, welche aufgrund der speziellen Anforderungen des Vorhabens modifiziert wurde. Im einem mit Frischbeton gefüllten Schalungskörper erfolgte die Simulation verschiedener Spannungszustände. Über die Auszugskraft eines im Frischbeton befindlichen Schalungselementes oder auch von Bewehrungskonstruktionen konnte der zugehörige Reibungswiderstand ermittelt werden. Des Weiteren war mit der Apparatur die Bestimmung des Seitendruckbeiwertes bzw. des inneren Reibungswinkels möglich. Analysiert wurden verschiedene Einflüsse auf das Materialverhalten des Frischbetons, wie zum Beispiel die Frischbetonkonsistenz, das Betonalter, die Belastungshöhe, die Schalungsverformungen und die Intensität von Erschütterungen.

Einen Schwerpukt des Forschungsvorhabens bildeten umfangreiche Bauteilversuche an hohen lotrechten Wandelementen, um die Entwicklung und Kalibrierung von Berechnungsmodellen zu unterstützen. Hierbei wurde insbesondere der Einfluss der Frischbetonkonsistenz bzw. der rheologischen Eigenschaften, der Betoniergeschwindigkeit und von Erschütterungen auf den Frischbetondruck analysiert. Erfasst wurden hierbei unter anderem der absolute Frischbetondruck, die resultierenden Schalungsverformungen sowie die Ausbreitung von Erschütterungen (Beschleunigungen). Die Höhe der betonierten Wandbauteile betrug bis zu 3 m, die Wanddicken ca. 25 cm. Die Wandlängen variierten je nach Untersuchungsgegenstand zwischen 1,88 m und 9,2 m. Der Einbau des Frischbetons erfolgte sowohl durch Befüllen entgegen der Steigrichtung von "oben" als auch durch Pumpen von "unten". An Modellschalungen mit 1,5 m Betonierhöhe konnten durch das Aufbringen von zusätzlichen Auflasten Betonierhöhen von bis zu 6 m abgebildet werden.

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen zum Materialverhalten fließfähiger Betone wurden erste Berechungsansätze zum Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen erarbeitet. Dabei wurden auch baubetriebliche Fragestellungen, wie zum Beispiel die Prozessgestaltung und die Qualitätssicherung bei der Verwendung fließfähiger Betone einbezogen. Bei der Ableitung der Berechnungsmodelle wurde darauf geachtet, dass lediglich solche Parameter explizit in das Modell einfließen, die auch unter Praxisbedingungen ermittelt bzw. kontrolliert werden können. Die Verifizierung der Berechungsmodelle erfolgte auf Grundlage der eigenen und in der Literatur dokumentierten Bauteilmessungen. Um Sicherheitselemente für die Bemessung festlegen zu können, wurden Vorüberlegungen zur Streuung der Modelleingangsgrößen vorgenommen.

Durch den Zusammenschluss verschiedenerer Wissenschaftler zu einer Forschergruppe wurden die Kompetenzen auf dem Gebiet des Frischbetondrucks gebündelt. Des Weiteren wurden die auszuführenden Arbeiten entsprechend der jeweils vorhandenen Leistungsfähigkeit auf die Forschungsstellen aufgeteilt.

Das Gesamtvorhaben untergliedert sich in folgende fünf Teilprojekte.

Teilprojekt A: RWTH Aachen - Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber

- Entwicklung von Modellrezepturen für Betone der Konsistenzklasse F5, F6 und SVB, die definierte Zielkenngrößen hinsichtlich der Frischbetoneigenschaften erreichen
- Ermittlung der wichtigsten rheologischen Kenngrößen der Modellbetone, Bestimmung des zeitlichen Verlaufs dieser Parameter
- Überprüfung des Einflusses der rheologischen Kenngrößen und des Einbauverfahrens (Betonieren von oben und von unten) auf den Frischbetondruck anhand von Druckmessungen an wandartigen Modellbauteilen

Teilprojekt B: UNI Karlsruhe - Prof. Dr.-Ing. H. Müller / ZIW/IBU Trier - Prof. Dr.-Ing. H. Beitzel

- Analyse der zeitlichen Entwicklung des Frischbetondrucks an vertikalen Schalungen durch die Simulation eines Betoniervorgangs an mittelgroßen Proben und Großversuche an Wandschalungssystemen
- Erfassung des Frischbetondrucks sowie resultierender Schalungsverformungen
- Untersuchung des Einflusses auf den Frischbetondruck aus Einbaugeschwindigkeit, Frischbetonkonsistenz, Schalungsoberfläche, Schalungsgeometrie, Einbauart

Teilprojekt C: TU Darmstadt, Fachgebiet Massivbau - Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner

- Experimentelle Untersuchungen zur inneren Reibung (Seitendruck) des Frischbetons, der Reibung zwischen Beton und Schalung und der Reibung zwischen Beton und Bewehrung
- Analyse des Einflusses der Mischungszusammensetzung, der Belastungshöhe, der Verformungsmöglichkeit, des Betonalters, der Vibration, von Erschütterungen und der Probentemperatur
- Entwicklung eines analytischen Modells zur Berechnung des Frischbetondrucks auf lotrechte Schalungen auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse der Forschungspartner sowie eigener Materialuntersuchungen zum Reibungswiderstand des Frischbetons
- Koordination des Vorhabens

Teilprojekt D: TU München - Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Zilch / UNI Leipzig - Prof. Dr. habil. K. Bente, Jun.-Prof. Dr.-Ing. F. Dehn

- Untersuchungen zum Einfluss von Erschütterungen und Vibration auf das Verformungsverhalten des Frischbetons und den Frischbetondruck unter Beachtung der Interaktion zwischen Schalung, Bewehrung und Frischbeton bei mechanischer Anregung
- Untersuchungen zur Beanspruchung rotationssymmetrischer Schalungen durch fließfähige Betone, inklusive Bauteilversuch an einer langen Wandschalung
- Einbeziehung verschiedener Messverfahren zur Bestimmung des Frischbetondrucks sowie verschiedener Methoden zur Bestimmung der Erstarrungszeiten

Teilprojekt E: TU Darmstadt, Institut für Baubetrieb - Prof. Dr.-Ing. C. Motzko

- Empirische Untersuchungen auf der Baustelle sowie theoretische Untersuchungen
- Entwicklung von praktischen Hilfen für die Anfertigung einer Gefährdungsbeurteilung beim Betoniervorgang
- Empfehlungen für die Gestaltung der Prozesse auf der Baustelle mit dem Schwerpunkt im Bereich der Betonierarbeiten
- Entwicklung der Basis für ein Dokumentationssystem für den Betoniervorgang
- Auswahlkriterien für geeignete Schalungen

Nachfolgend ist die Untersuchungsmethodik schematisch dargestellt.



Bild 1: Untersuchungsmethodik des Gesamtvorhabens schematisch

4.2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse der Teilprojekte

Eine detaillierte Beschreibung der von den Forschungsstellen durchgeführten Arbeiten und die wichtigsten Ergebnisse enthalten die zu den einzelnen Teilprojekten erstellten Schlussberichte.

Die beigefügten Schlussberichte der Teilprojekte sind:

Teilprojekt A - Einfluss rheologischer Kenngrößen auf den Frischbetondruck Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac), Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber, Dipl.-Ing. C. Bohnemann

Teilprojekt B – Simulations- und Großversuche Institut für Bauverfahrens- und Umwelttechnik (IBU), Prof. Dr.-Ing. H. Beitzel in Zusammenarbeit mit Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. S. Müller, Dipl.-Ing. M. Beitzel

Teilprojekt C - Materialversuche zur Reibung und zum Verformungsverhalten von frischem Beton sowie Entwicklung eines analytischen Modells zur Bestimmung der Schalungsbelastung

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Massivbau, Univ.-Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner, Dr.-Ing. T. Proske

Teilprojekt D - Einfluss von Erschütterungen auf frischen und jungen selbstverdichtenden Beton (SVB) sowie auf den sich einstellenden Frischbetondruck bei rotationssymmetrischen Schalungen (Rundbehälter)

Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Zilch, Dipl.-Ing. J. Lingemann, Dipl.-Ing. C. Stettner in Zusammenarbeit mit Universität Leipzig, Fakultät für Chemie und Mineralogie, Institut für Mineralogie, Kristallographie und Materialwissenschaft,

Jun.-Prof. Dr.-Ing. F. Dehn, Dipl.-Ing. A. König, Dipl.-Wirtsch.-Ing. K. Pistol

Teilprojekt E - Baubetriebliche Fragestellungen

Technische Universität Darmstadt, Institut für Baubetrieb, Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Motzko, Dipl.-Ing. E. Boska

5 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und weiterer Forschungsbedarf

5.1 Zusammenfassung

Gegenstand des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Untersuchung der Belastung von Schalungen durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz. Um bestehende Hemmnisse beim Einsatz dieses innovativen Werkstoffs rasch zu beseitigen, konzentrierten sich die Arbeiten auf die wesentlichen Einsatzgebiete fließfähiger Betone und lotrechte Schalungen.

Aufgrund des Umfangs und der Komplexität der zu lösenden Aufgaben wurde das Forschungsvorhaben in fünf Teilprojekte (A bis E) unterteilt, die von verschiedenen Forschungseinrichtungen entsprechend der jeweiligen Leistungsfähigkeit bearbeitet wurden. Die Zusammenführung der Forschungsergebnisse erfolgte durch die koordinierende Stelle.

Auf der Grundlage von Referenzmischungen (Teilprojekt A) wurde zunächst das Materialverhalten fließfähiger Frischbetone der Konsistenzklassen F5 und F6 sowie Selbstverdichtender Betone analysiert. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse aller Forschungsstellen sicherzustellen, waren je Betonrezeptur einheitliche Kennwerte der Frischbetoneigenschaften, wie z. B. Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit, einzuhalten. Untersucht wurden am Frischbeton insbesondere die zeitliche Entwicklung der rheologischen Eigenschaften (Teilprojekt A), des Verformungsverhaltens und des Reibungswiderstands (Teilprojekt C). In einer Vielzahl von Kleinköperversuchen wurde die Auswirkung verschiedener Einflussparameter, wie z. B. Mischungszusammensetzung, Erschütterung, Vibration, Bewehrungsgehalt und Frischbetontemperatur, auf die Materialeigenschaften bzw. den Frischbetondruck analysiert (Teilprojekt B, C und D). Es zeigte sich ein signifikanter Einfluss des Erstarrungsverhaltens, der Viskosität und des Leimgehaltes des Betons sowie von Erschütterungen auf die Materialparameter. Die Reibung wurde außerdem signifikant durch die Bewehrung beeinflusst.

Auf Grundlage der Materialversuche erfolgte die Ableitung analytischer Modelle zur Bestimmung des Frischbetondrucks auf lotrechte Schalungen in Abhängigkeit der Konsistenzklasse (Teilprojekt C). Als explizite Eingangsparameter der Modelle sind die Betoniergeschwindigkeit, die Betonwichte und die Erstarrungszeit des Betons zu nennen.

Verifiziert wurden die Berechnungsmodelle durch die an den verschiedenen Forschungsstellen durchgeführten Großversuche (Teilprojekt A, B und D). In Übereinstimmung mit den Materialuntersuchungen, ergab sich ein signifikanter Einfluss der Mischungszusammensetzung bzw. der rheologischen Eigenschaften und von Erschütterungen auf den Frischbetondruck. Des Weiteren bestätigten sich die Auswirkungen infolge der Betoniergeschwindigkeit und der Einbautechnologie. Demgegenüber ist der Einfluss des SVB-Typs (Mehlkorn- oder Stabilisierertyp) als zweitrangig zu bewerten. Insgesamt erwies sich die gute Eignung der entwickelten Modelle zum Frischbetondruck. Unter Einbeziehung der Ergebnisse der Großversuche sowie bereits in der Fachliteratur dokumentierter Messergebnisse wurden im Teilprojekt C die analytischen Modelle in einen Vorschlag für die Bemessung von Schalung und Rüstung bei Verwendung fießfähiger Betone überführt (vgl. Bild 2). Berücksichtigt wurden dabei auch die Anforderungen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Hilfskonstruktionen.



Bild 2: Berechnungsvorschlag für $\sigma_{hk,max}$ und Angaben nach E DIN 18218:2008-01

Der erarbeitete vereinfachte Vorschlag zur Bemessung von Schalung und Rüstung weicht im praxisrelevanten Bereich nicht signifikant von den in E DIN 18218:2008-01 enthaltenen Angaben für fließfähige Betone ab. Um die aus dem Einbauverfahen resultierenden Einflüsse abzudecken. sind jedoch bei sehr geringen Betoniergeschwindigkeiten (kleiner 1 m/h) deutlich höhere Lastansätze als bisher erforderlich. Demgegenüber ergeben sich bei etwas höheren Betoniergeschwindigkeiten zum Teil geringere Frischbetondrücke als nach E DIN 18218:2008-01. Wird mit - oftmals in der Praxis auftretenden - Betoniergeschwindigkeiten von größer 2,5 m/h betoniert, ist für die Bemessung der Schalungssysteme in der Regel hydrostatisches Druckverhalten anzusetzen. Da jedoch der für die Berechnung anzusetzende Frischbetondruck einen oberen Quantilwert darstellt, wird die tatsächlich auftretende Belastung oftmals deutlich geringer ausfallen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden weiterhin Aspekte der Qualitätssicherung Arbeitssicherheit behandelt (Teilprojekt E). Als Ergebnis und der der Forschungsaktivitäten sind unter anderem die Basisstruktur eines Datenbanksystems zur Dokumentation **Betoniervorgangs** und Vorschläge Steuerung des der zur

Betoniergeschwindigkeit zu nennen. Des Weiteren wurden Hilfsmittel zur Gefährdungsbeurteilung für den Vorgang "Betonieren" entwickelt.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Ziele des Forschungsvorhabens erreicht wurden.

Mit den erzielten Ergebnissen wird erhofft, nicht nur die Wirtschaftlichkeit von Schalung und Rüstung zu verbessern und die Herstellungskosten von Bauwerken zu optimieren, sondern auch die Wettbewerbsfähigkeit mittelständischer Schalungshersteller und Bauunternehmen sowie die Arbeitssicherheit zu erhöhen.

Eine umfassendere Zusammenfassung der Ergebnisse differenziert nach den einzelnen Teilprojekten enthalten die Schlussberichte der Teilprojekte A bis E.

5.2 Forschungsbedarf

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Vielzahl der im DAfStb-Sachstandsbericht "Frischbetondruck fließfähiger Betone" [1] identifizierten Problemstellungen einer Lösung zugeführt. Aufgrund der zeitlichen und materiellen Randbedingungen dieses Projektes konnten jedoch nicht alle relevanten Fragestellungen befriedigend beantwortet werden.

Um den Frischbetondruck fließfähiger Betonen noch wirklichkeitsnäher vorherbestimmen zu können, sind weiterführende experimentelle Materialversuche am Frischbeton erforderlich. Insbesondere rheologische Messungen an Frischbeton mit Hilfe von Rheometern, bei denen der Scherwiderstand des Frischbetons unter verschiedenen Normalspannungszuständen ermittelt werden kann bzw. gleichwertige Scherversuche, werden als notwendig erachtet. Nur unter Anwendung entsprechender Verfahren ist eine Analyse des Einflusses der Mischungszusammensetzung bzw. der Konsistenzklasse auf den Frischbetondruck zielführend.

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich des Frischbetondrucks fließfähiger Betone auf Schalungen, die von der lotrechten Ausbildung abweichen. Bei der Dimensionierung derartiger Schalungen muss zusätzlich zum horizontalen Frischbetondruck die Vertikalkomponente berücksichtigt werden. Gesonderte Untersuchungen sind bei gekrümmten Schalungen erforderlich.

Eine Vielzahl von Fragestellungen zur Ausbreitung von lokalen Erschütterungen im Beton konnte aufgrund der zu geringen Anzahl an Versuchen und Messwerten im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht beantwortet werden. Insbesondere der Einfluss der Einbautechnologie (z. B. Verdichtungsvorgang, Unterbrechungen des Arbeitsvorgangs, Einbauart) auf den Frischbetondruck bedarf einer eingehenden Untersuchung.

Zur wirklichkeitsnahen Abschätzung der auf Schalungen mit beliebiger Bauteilgeometrie einwirkenden Belastung ist die Verwendung numerische Verfahren, z. B. Finite-Elemente-Methode, unerlässlich. Voraussetzung ist die Auswahl bzw. die Entwicklung geeigneter Materialgesetze sowie die Kalibrierung des Rechenmodells. In diesem Zusammenhang werden ergänzende Materialversuche zum lastabhängigen und lastunabhängigen Verformungsverhalten des Frischbetons als notwendig angesehen. Weitere Forschungsaktivitäten sind nicht nur auf dem Gebiet der fließfähigen Betone erforderlich. Viele Rüttelbetone mit geringer Fließfähigkeit bzw. der Konsistenzklasse F1 bis F4 sind aus neuartigen Materialien (Betonzusatzmittel und Betonzusatzstoffe) zusammengesetzt und können dadurch insbesondere im jungen Betonalter ein stark verändertes Materialverhalten gegenüber klassischen Rüttelbetonen aufweisen. Dies hat folgerichtig signifikante Auswirkungen auf die Schalungsbelastung. Die bisher vorliegenden normativen Regelungen entsprechen in diesem Fall nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik.

Der Schwerpunkt zukünftiger Forschungsaktivitäten im Bereich Sicherheit und Zuverlässigkeit muss auf der Untersuchung der Streuung der Modelleingangsparameter liegen, wobei insbesondere die Betoniergeschwindigkeit und die Erstarrungszeiten von Relevanz sind. Daneben sollten die Modellunsicherheiten genauer analysiert werden. Notwendig sind hierbei vor allem weitere Messungen des Frischbetondrucks an hohen Bauteilen auf Baustellen bei gleichzeitiger Bestimmung der Modelleingangsparameter. Durch einen Vergleich der geplanten Eingangswerte mit den tatsächlich erzielten Größen die Ableitung statistischer Kenngrößen möglich. Für eine fundierte ist sicherheitstheoretische Betrachtung sollten weiterhin Überlegungen zum angestrebten Sicherheitsniveau vorgenommen werden. Großes Potential enthält weiterhin die mögliche Reduzierung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_F bei hydrostatischem Druckansatz. Durch die Aktivierung von Tragreserven könnte der Einsatzbereich der Schalungssysteme erweitert werden.

Weiterer Forschungsbedarf auf dem Gebiet des Baubetriebs besteht insbesondere zum Thema Gefährdungsbeurteilung, Dokumentation und Steuerung des Betoniervorgangs und Prozessgestaltung. Bei letzterem interessiert unter anderem der Zusammenhang zwischen erreichbaren Aufwandswerten (Arbeitszeitstudien) den den und Betoniergeschwindigkeiten. Aufbauend auf dieser Datengrundlage eine kann wirtschaftliche Optimierung von Schalungssystem und Betonierprozess vorgenommen werden. Bezüglich der Dokumentation des Betoniervorgangs sind verschiedene Messverfahren (Sensoren) zu untersuchen, damit in einer Datenbank die Ist-Werte (Daten) für die dargelegten Soll-Ist-Vergleiche solide erfasst werden können.

6 Literaturverzeichnis

- Graubner, C.-A. et al.: Sachstandsbericht Frischbetondruck fließfähiger Betone. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 567, Beuth Verlag, 2006.
- [2] Vanhove, J., et al.: Study of Self-Compacting Concrete Pressure on Formwork. In: Proceedings of "The Second International Symposium" of Self – Compacting – Concrete, COMS Engineering Corporation, Fukui/ Japan, 2001: 585-594.
- [3] Khayat, K. H.; Assaad, J.: Use of Rheological Properties of SCC to Predict Formwork Pressure. In: Proceedings of the Second North American Conference on

the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago, 2005: 671-678.

- [4] Ovarlez, G.; Roussel, N.: A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork. Materials and Structures, RILEM Publications SARL, Vol. 39, 2006.
- [5] Graubner, C.-A.; Proske, T.: Formwork Pressure A new Concept for the Calculation. Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, ISBN 0-924659-64-5, Chicago, 2005.
- [6] Specht, M.: Die Belastung von Schalung und R
 üstung durch Frischbeton. Werner-Verlag, D
 üsseldorf, 1973.
- [7] Billberg, P.: Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete. In: Proceedings of "The Third International Symposium" of Self – Compacting – Concrete, RILEM Publications S.A.R.L, Reykjavik, Iceland, 2003: 271-280.
- [8] Brameshuber, W.; Brockmann, T.: Electrical Conductivity Measurements to Characterize the Setting and Hardening of Mortars. In: International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, September, 2003.
- [9] Brameshuber, W.; Uebachs, S.: Investigation on the Formwork Pressure Using Self-Compacting Concrete. In: Proceedings of "The Third International Symposium" of Self – Compacting – Concrete, RILEM Publications S.A.R.L, Reykjavik, Iceland, 2003: 281-287.
- [10] Graubner, C.-A.; Proske, T.: Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf das Entlüftungsverhalten sowie den entstehenden Schalungsdruck bei Verwendung von selbstverdichtendem Beton. DAfStb-Forschungsvorhaben, Abschlussbericht, TU Darmstadt, September, 2002.
- [11] GSV: **GSV-Richtlinie** für die Erteilung **GSV-Zeichen** für von Rahmenschalungstafeln für vertikale Bauteile (Wände und Stützen). Güteschutzverband Betonschalungen e.V., Oktober, 2000.
- [12] König, G., Holschemacher, K., Dehn, F. [Hrsg.]: Selbstverdichtender Beton, Innovationen im Bauwesen, Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Bauwerk, Berlin, 2001.
- [13] Proske, T.: Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton. Dissertation. TU Darmstadt, Institut f
 ür Massivbau, Darmstadt, 2007.
- [14] Specht M.: Theorie des Frischbetondrucks gegenwärtiger Stand und ungeklärte Probleme. Bautechnik, Heft 3 (1987), Ernst und Sohn Verlag, 1987: 73-78.

7 Danksagung

Das Forschungsvorhaben wurde in dankenswerter Weise vom BMVBS über das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) aus Mitteln des Bundeshaushaltes gefördert. Des Weiteren danken wir den Unternehmen Bilfinger Berger AG, Benno Drössler GmbH & Co. Bauunternehmung KG, ELBA-WERK Maschinen-Gesellschaft mbH, Max Bögl Bauunternehmen GmbH, RSB Schalungstechnik GmbH & Co, Wayss & Freytag Ingenieurbau AG sowie dem Güteschutzverband Betonschalungen e.V. und der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig für die Ermöglichung des Vorhabens.

Ein besonderer Dank für die fachliche Unterstützung gilt den Mitgliedern des Beratergremiums Herrn Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus (Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe), Herrn Dipl.-Ing. Helmut Schuon (MEVA Schalungssysteme GmbH) und Herrn Dr.-Ing. Lars Meyer (Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E.V.) sowie für die Unterstützung im organisatorischen Bereich Herrn Dr.-Ing. Michael Brüggemann (Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung).

Darmstadt, 30.11.2008,

stellvertretend für die Forschungsbeteiligten

Lal- Mar. /6 Univ.-Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner

Dr.-Ing. Tilo Proske

Teilprojekt A

Einfluss rheologischer Kenngrößen auf den Frischbetondruck

von

Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber Dipl.-Ing. C. Bohnemann RWTH Aachen, Institut für Bauforschung (ibac) (ibac - Berichtnummer F 955)

Inhaltsverzeichnis Schlussbericht Teilprojekt A

| A.1 | Einleitung | A-3 |
|------------|--|------|
| A.1 | .1 Problemstellung zum Teilantrag A | A-3 |
| A.1 | .2 Zielsetzung des Teilantrags A | A-3 |
| A.2 | Ausgangsbasis und Grundlagen für Teilprojekt A | A-4 |
| A.2 | .1 Rheologische Kenngrößen des Frsichbetons | A-4 |
| A.2 | .2 Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen | A-5 |
| A.2 | .3 Berechnungsmodelle für den Frischbetondruck | A-9 |
| A.2 | .4 Normative Bemessungsmodelle für Rüttelbeton | A-12 |
| A.3 | Durchgeführte Arbeiten | A-18 |
| A.3 | .1 Überblick Untersuchungsprogramm | A-18 |
| A.3 | .2 Versuchsaufbau für die modellartigen Wandversuche | A-20 |
| A.3 | .3 Versuchsdurchführung | A-22 |
| A.4 | Ergebnisse | A-24 |
| A.4 | .1 Laboruntersuchungen | A-24 |
| A.4 | .2 Betonagen im Fertigteilwerk | A-25 |
| A.5 | Zusammenfassung | A-31 |
| A.6 | Literaturverzeichnis | A-32 |
| A.7 | A.7 DanksagungA-3 | |
| A.8 | AnlagenA-3 | |

A.1 Einleitung

A.1.1 Problemstellung zum Teilantrag A

Im Zuge der breiteren Anwendung von selbstverdichtenden Betonen (SVB) treten immer mehr praxisrelevante und wirtschaftliche Fragestellungen auf. Dazu gehört auch die Frage nach dem entstehenden Schalungsdruck. In der Literatur finden sich z. T. sehr widersprüchliche Aussagen zum Schalungsdruck bei der Verwendung von SVB. Im Rahmen des beantragten Forschungsprojektes soll ein Verfahren zur allgemeinen Berechnung des auf die Schalung einwirkenden Frischbetondrucks neuartiger, fließfähiger Betone entwickelt werden. Bei den fließfähigen Betonen handelt es sich um selbstverdichtende Betone (SVB) und Rüttelbetone (RB) der Konsistenzklassen F5 und F6.

Ziel des Teilprojekts A ist die Untersuchung des Einflusses der rheologischen Eigenschaften der SVB und der F5/F6-Betone auf den Schalungsdruck. Weiterhin soll der Einfluss der Einbaumethode und der Betoniergeschwindigkeit bestimmt werden.

A.1.2 Zielsetzung des Teilantrags A

Das Teilprojekt A gliedert sich in die zwei Abschnitte: A1 Entwicklung und Untersuchung von Modellrezepturen und A2 Frischbetondruckmessungen an wandartigen Modellbauteilen.

Im ersten Schritt sollen Basisrezepturen entwickelt werden, die den übrigen Forschungspartnern zur Verfügung gestellt werden. Dadurch wird eine Reproduzier- und Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Rahmen des Verbundprojektes erreicht. Es werden neben den F5/F6-Betonen auch zwei Mehlkorntyp-SVB sowie zwei Stabilisierertyp-SVB, die sich jeweils maßgeblich in ihrer Viskosität unterscheiden, entwickelt. Somit werden alle maßgeblichen Fälle hinsichtlich der rheologischen Eigenschaften durch diese fließfähigen Betone abgedeckt.

Im zweiten Schritt werden mit den entwickelten Mischungszusammensetzungen systematische Untersuchungen zum Einfluss der rheologischen Kenngrößen auf den Frischbetondruck an wandartigen Modellwänden durchgeführt. Die Untersuchungen werden in einem Fertigteilwerk durchgeführt, da größere Betonmengen eingebracht werden müssen. Durch die Betonage im Werk ist zusätzlich eine Praxisrelevanz gegeben.

A.2 Ausgangsbasis und Grundlagen für Teilprojekt A

A.2.1 Rheologische Kenngrößen des Frischbetons

Hinsichtlich seiner Rheologie kann Beton als ein komplexes, scherempfindliches "Mehrphasensystem" beschrieben werden, dessen Fließverhalten vorrangig durch die Eigenschaften des Zementleims bzw. –mörtels beeinflusst wird. Außerdem erfolgt die Erhöhung des Scherwiderstandes des Betons durch die grobe Gesteinskörnung. Zurzeit werden in Deutschland hauptsächlich die rheologischen Kenngrößen von Bindemittelleimen und Mörteln mit einem Größtkorn von 2 mm untersucht.

Durch Messung der Scherspannung τ und der Scherrate $\dot{\gamma}$ kann die Scherspannungsfunktion $\tau = f(\dot{\gamma})$ ermittelt werden, deren Umkehrung als Fließgesetz $\dot{\gamma} = f(\tau)$ und deren graphische Darstellung als Fließkurve bezeichnet wird [A-1, A-2]. Der Quotient aus Scherspannung τ und Scherrate $\dot{\gamma}$ wird als Viskosität η bezeichnet mit $\eta = \tau/\dot{\gamma}$ und der Einheit Pa·s = Ns/m². Die Viskosität beschreibt die Zähigkeit der Probe und kann als die innere Reibung während des Fließvorgangs verstanden werden. Je zäher ein Stoff ist, desto größer ist seine Viskosität. Zu beachten ist, dass die Viskosität stark temperaturabhängig ist. Die Angabe eines Viskositätswertes ohne Temperatur ist wenig aussagekräftig. Für Flüssigkeiten gilt: Steigt die Temperatur in der Flüssigkeit, sinkt die Viskosität bei gegebener Schergeschwindigkeit [A-3].

Besteht zwischen der Scherspannung τ und Scherrate $\dot{\gamma}$ ein linearer Zusammenhang, so lässt sich das Modell nach Newton oder nach Bingham anwenden. Nichtlineare Fließkurven lassen sich mit dem allgemeinen Potenzgesetz nach Herschel-Bulkley beschreiben.

$$\tau = \tau_0 + \mathbf{k} \cdot \dot{\gamma}^{n} \tag{A-1}$$

Der Schnittpunkt der Kurve mit der Ordinatenachse liefert die Fließgrenze τ_0 (wie nach Bingham), der Fließindex n und der Konsistenzfaktor k bestimmen den Anstieg der Fließkurve. Die Parameter τ_0 , k und n werden mit Hilfe der nichtlinearen Regression aus den Messwerten berechnet. Durch den Fließindex n ist sowohl strukturviskoses (n < 1) als auch dilatantes (n > 1) Fließverhalten darstellbar. Das Bingham-Modell stellt einen Sonderfall der Herschel-Bulkley-Beziehung mit n = 1 dar.

Um die in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten rheologischen Kennwerte, welche für die Darstellung von Fließkurven notwendig sind, ermitteln zu können, werden Rotationsviskosimeter eingesetzt. Zwei der am meisten verwendeten sind das Couette-Rotationsviskosimeter und der Viskomat NT.

Der Viskomat NT ist ein Rotationsviskosimeter mit Paddelgeometrie. Mit ihm lassen sich Substanzen untersuchen, deren Partikelgröße bis zu 2 mm betragen kann. Dadurch wird die Untersuchung von Mörteln möglich. Das Paddel ist so geformt, dass der Mörtel während der Messung permanent gemischt und somit ein Sedimentieren und Entmischen verhindert wird. Ein Abstreifer verhindert ein Ansetzen des Mörtels an der Behälterwand. Eine Bestimmung der absoluten rheologischen Kenngrößen ist nicht möglich, da aufgrund der im Viskomat NT verwendeten Paddelgeometrie keine abgescherte Fläche definiert und daher das Schergefälle nicht genau bestimmt werden kann. Das Ergebnis der Messung ist ein relatives Maß für das Fließverhalten. Vergleichende Untersuchungen sind dennoch möglich, solange die Randbedingungen dieselben sind (gleiches Paddel, gleiche Temperatur, gleiche Scherrate).

A.2.2 Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen

Zum heutigen Zeitpunkt hat die Erforschung des neuen Werkstoffs SVB zu zahlreichen technischen Fragestellungen schon einen gesicherten Wissensstand erbracht. Dennoch gibt es gegenwärtig bei den Untersuchungen zum Schalungsdruck von SVB und Betonen der Konsistenzklasse F5/F6 immer noch widersprüchliche Messergebnisse. Systematische Untersuchungen zum Einfluss einzelner Parameter haben gezeigt, dass die Höhe und Verteilung des Frischbetondrucks von mehreren Kenngrößen abhängig ist. Nachfolgend ist der Stand der Forschung zum Schalungsdruck, in Abhängigkeit von den maßgeblichen Einflussgrößen, dargestellt.

Einfluss der rheologischen Eigenschaften des SVB

Bisher wurden nur vereinzelt Untersuchungen zum Einfluss der rheologischen Eigenschaften auf den Schalungsdruck bei der Verwendung von SVB durchgeführt.

Die Konsistenz wird für SVB über das Setzfließmaß sm bestimmt. Dieses beschreibt zusammen mit der Setzfließzeit t_{500} die Fließfähigkeit und Viskosität des frischen SVB. Eine Verringerung des Setzfließmaßes bewirkt ebenso wie bei den Rüttelbetonen eine Verminderung des Schalungsdrucks.

Bei einer mit einer Betoniergeschwindigkeit von 25 m/h hergestellten 4 m hohen Stütze verringerte sich durch Reduzierung des Setzfließmaßes von 760 auf 710 mm der maximale Schalungsdruck an der Unterkante der Schalung um etwa 40 % gegenüber dem hydrostatischen Ausgangswert, bei einem Setzfließmaß von 610 mm sogar um 60 %. Für geringere Betoniergeschwindigkeiten sank der Schalungsdruck ebenfalls deutlich ab. Ein nahezu hydrostatischer Druck wurde lediglich bis zu einer Betonierhöhe von etwa 1 m gemessen. Dieser Umstand wird vom Verfasser auf die Wandreibung und die zugehörige Bogenbildung zurückgeführt. Dadurch entwickelt sich eine vollkommene Stützwirkung, die trotz einer weiteren Auflast nicht wieder aufgelöst wird [A-4].

Aufgrund dieser Wirkung kann durch eine Konsistenzverringerung die Einbaugeschwindigkeit deutlich gesteigert werden, ohne den Schalungsdruck spürbar zu erhöhen. Aus einer Reduzierung des Setzfließmaßes von 710 mm auf 550 mm resultierten bei gleichzeitiger Erhöhung der Betoniergeschwindigkeit von 25 m/h auf 60 m/h vergleichbare Betondrücke [A-4].

Zusätzlich wurde festgestellt, dass bei einer Absenkung des Setzfließmaßes der Einfluss der Steiggeschwindigkeit auf die Größe des Schalungsdrucks deutlich größer wird [A-4].

Selbstverdichtender Beton verhält sich im frischen Zustand wie eine thixotrope Flüssigkeit. Unter Thixotropie wird eine durch Scherbeanspruchung verursachte Reduzierung der Viskosität verstanden, wie sie beispielsweise beim Einbringen des Betons in die Schalung vorkommt. Kommt der Beton in der Schalung wieder zur Ruhe, so entwickelt sich durch die Zusammenlagerung der Feststoffe wieder eine tragfähige Struktur, und die Viskosität nimmt zu. Der grundsätzliche Ablauf über die Zeit ist Bild A-1 zu entnehmen.



Bild A-1: Thixotropes Fließverhalten von selbstverdichtendem Beton

In [A-4] wurde für die geringste Betoniergeschwindigkeit von 12,5 m/h während des Betonierens ein stufenförmiger Verlauf des Schalungsdrucks ermittelt. Dies kann mit einer zeitweisen Stabilisierung der Mischung und der damit verbundenen lokalen Stützwirkung (aus Wandreibung und Bogenbildung) begründet werden, die sich bei weiterem Betonierfortschritt wieder auflöst, wodurch ein sprunghafter Druckanstieg festgestellt werden konnte. Auf den maximalen Druck hat die Thixotropie keinen Einfluss, da der Stabilisierungseffekt durch eine weitere Auflast oder Erschütterungen immer wieder aufgelöst wird.

Nach [A-5] ist das thixotrope Verhalten des SVB bzw. seine Regenerierung (Strukturbildung) ausschlaggebend für den Druckabfall nach Betonierende. Durch den Zuwachs der Kohäsion und der inneren Reibung kann teilweise die vertikale Last durch die Struktur des Frischbetons aufgenommen werden. Ein Druckabfall von 60 % wurde nach [A-6] innerhalb von 6 Stunden nach Betonierende festgestellt, der alleine der Regenerierung des SVB infolge des thixotropen Verhaltens zuzuweisen ist. Erst danach tritt die Wirkung der einsetzenden Hydratation auf. Festzustellen ist, dass die Messung hierbei mittels in die Schalung integrierter Druckmessdosen durchgeführt wurde. Nur bei dieser Art des Messverfahrens wird ein derartiger Spannungsabfall aufgezeichnet. Bei Entkopplung der Messaufnehmer von der Schalungskonstruktion, wie es bei [A-4] eingesetzt wurde, kann ein solcher Druckabfall nicht registriert werden. Durch die Entkopplung wird der Einfluss des Schwindens während der Hydratation auf den Frischbetondruck reduziert. Somit stellt sich kein kompletter Druckabfall gegenüber den Messungen mit integrierten Druckmessdosen ein.

Einfluss der Betoniergeschwindigkeit

Durch den Wegfall des Verdichtungsvorgangs und die Konsistenz von SVB kann die Betoniergeschwindigkeit bei der Verwendung von SVB deutlich höher liegen als bei Rüttelbetonen. Abhängig von der Entlüftungsneigung des eingesetzten SVB, den rheologischen Eigenschaften und der Bauteilabmessungen können Betoniergeschwindigkeiten bis zu 100 m/h erreicht werden [A-4, A-7]. Die dabei gemessenen Schalungsdrücke variieren zum Teil beachtlich. Die bisher umfangreichste und aufwändigste Versuchsreihe zum Schalungsdruck bei SVB wurde im Rahmen eines schwedisch-französischen Gemeinschaftsprojektes durchgeführt [A-8]. Dabei wurden sowohl von der GTM Construction (Frankreich) als auch vom NCC AB (Schweden) unabhängig voneinander Schalungsdruckmessungen für verschiedene Betoniergeschwindigkeiten zwischen 6 m/h und 120 m/h vorgenommen. Bei den Versuchen in Schweden betrugen die Schalungshöhen 2,65 m, 5,30 m und 8,00 m, bei einer konstanten Dicke der Bauteile von 1,60 m. Für alle untersuchten Betoniergeschwindigkeiten lag der Schalungsdruck deutlich unterhalb des hydrostatischen Drucks bzw. unter dem Druck, der sich bei gleicher Betoniergeschwindigkeit für einen Rüttelbeton ergeben würde [A-9]. Selbst für eine mit 120 m/h betonierte Wand stellten sich keine hydrostatischen Druckverhältnisse ein [A-8]. Der Schalungsdruck wurde jedoch nicht direkt gemessen, sondern anhand von gemessenen Ankerkräften berechnet. Die Ergebnisse in Frankreich waren gänzlich anders. Dort wurden an den untersuchten 2,80 m und 5,60 m hohen Wänden mit Dicken von 0,25 m und 0,40 m für alle untersuchten Betoniergeschwindigkeiten zwischen 10 m/h und 110 m/h nahezu hydrostatische Verhältnisse festgestellt [A-8].

Systematische Untersuchungen zum Einfluss der Betoniergeschwindigkeit werden in [A-6], [A-4] und [A-10] vorgestellt. Bei den in [A-6] durchgeführten Messungen wurde nur ein mittlerer Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf den Frischbetondruck ermittelt. Beim Betonieren einer 2,10 m hohen und 0,20 m dicken Rundstütze konnten sowohl für eine Geschwindigkeit von 25 m/h als auch für 10 m/h Frischbetondrücke über 95 % des hydrostatischen Drucks ermittelt werden, wobei sich bei der geringeren Geschwindigkeit nur etwa 1 % niedrigere Druckwerte ergaben. Dies wurde mit der thixotropen Eigenschaft des SVB erklärt. Das Setzfließmaß des verwendeten SVB ergab sich dabei zu 650 mm.

Ähnliche Ergebnisse stellte auch Graubner [A-4] fest. Es wurden Untersuchungen an 4 m hohen Stützen mit einer Seitenlänge von 0,30 m und Betoniergeschwindigkeiten von 12,5 m/h bis 160 m/h durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass sich bei einem Setzfließmaß von 750 mm für Betoniergeschwindigkeiten ab 25 m/h hydrostatische Druckverläufe ergaben. Lediglich für eine Füllgeschwindigkeit von 12,5 m/h und die damit verbundene lange Betonierdauer von etwa 25 Minuten stellten sich um etwa 23 % geringere Werte ein [A-4].

Bei den Messungen in [A-11] wurde mit Steiggeschwindigkeiten von 10 m/h und 2 m/h betoniert. Dabei wurde ein Mehlkorntyp-SVB verwendet. Die Bauteile (Wände) hatten Abmessungen von $3,30 \cdot 3,51 \cdot 0,24$ m³. Bei den Betonagen mit Pumpe von unten erreichte der Schalungsdruck bei Betoniergeschwindigkeiten von 10 m/h über die gesamte Bauteilhöhe nahezu hydrostatische Verhältnisse. Bei der Befüllung von oben mit Kübel war der Frischbetondruck nur halb so groß. Bei der Steiggeschwindigkeit von 2 m/h war der Schalungsdruck ca. 20 bis 30 % geringer als bei der höheren Betoniergeschwindigkeit.

Aufgrund der Literaturauswertung kann nicht klar definiert werden, welchen Einfluss die Betoniergeschwindigkeit auf den Schalungsdruck bei Einsatz von SVB hat. Ein Grund für die z. T. widersprüchlichen Aussagen in der Literatur ist unter Umständen, dass eine Berücksichtigung der verschiedenen rheologischen Eigenschaften der verwendeten SVB nicht ausreichend statt gefunden hat. So werden z. B. in Frankreich oder den skandinavischen Ländern häufig Kombinationstyp- oder Stabilisierertyp-SVB verwendet, die deutlich andere rheologische Eigenschaften als die in Deutschland üblichen Mehlkorntyp-SVB aufweisen.

Einfluss der Befüllungsart

Der Einbau des SVB in die Schalung kann auf unterschiedliche Arten erfolgen:

- Pumpen des Betons von unten in die Schalung,
- Einbringen mittels Pumpe von oben,
- Einbringen des Betons mittels Kübel von oben.

Die Befüllung der Schalung von oben mittels Kübel wird am häufigsten praktiziert. Folglich wurden die meisten heute bekannten Messungen des Schalungsdrucks mittels dieser Befüllmethode ausgeführt.

In [A-12] wurde die Wirkung der Befüllungsmethode an einer 12 m hohen Wand ermittelt. Dabei stellten sich maximale Schalungsdrücke ein, die für mit einer Betoniergeschwindigkeit von etwa 20 m/h per Pumpe befüllten Wand um etwa 10 % über denen der mit etwa 25 m/h von oben mittels Kübel betonierten Wand lagen. Bei beiden Verfahren ergab sich ein hydrostatischer Druck nur über eine Tiefe von etwa 2,5 m von Schalungsoberkante.

Beim Einbau des SVB im freien Fall bei hohen, schmalen Bauteilen kann eine unzureichende Entlüftung auftreten, so dass hier ein Einfüllen des Betons von unten in die Schalung einen Vorteil bringen könnte. Durch den zusätzlichen Pumpendruck könnte sich dann aber ein erhöhter Schalungsdruck ergeben. In ACI 347 01 [A-13] wird dagegen angenommen, dass der Druckaufschlag, wie er für Normalbeton beim Einbau von unten vorgeschlagen wird, reduziert werden kann, da der notwendige Pumpendruck für SVB geringer ist [A-14].

Bei den Untersuchungen in [A-11] konnte ein signifikanter Einfluss des Betonageverfahrens ermittelt werden. Beim Pumpen des Betons von unten war der Schalungsdruck deutlich höher als bei der drucklosen Befüllung von oben. Um den Beton in das Bauteil gegen den sich bereits im Bauteil befindlichen Beton einzubringen, musste der Druck der Pumpe vergrößert werden. Durch die Zunahme des Pumpendrucks nahm auch der sich einstellende Frischbetondruck zu. Der maximale Schalungsdruck im unteren Bereich des Bauteils war etwa doppelt so groß wie bei der drucklosen Befüllung mit dem Kübel von oben.

Einfluss des Schalungsquerschnitts

Der Einfluss der Breite bzw. des Querschnitt des zu betonierenden Bauteils auf den Schalungsdruck wurde in [A-6] untersucht. Mit einer Einbaugeschwindigkeit von 10 m/h wurden zwei Rundstützen mit einem Durchmesser von 0,20 m bzw. 0,92 m hergestellt und der Schalungsdruck in einer Tiefe von 2,05 m ab Schalungsoberkante ermittelt. Dabei wurde ein maximaler Schalungsdruck unmittelbar nach Betonierende gemessen, der für die Stütze mit dem größeren Durchmesser 99 % und für die mit dem kleineren Durchmesser 96 % des hydrostatischen Betondrucks betrug. Dieser Unterschied resultiert wahrscheinlich aus dem Einfluss der Wandreibung mit der zugehörigen Gewölbewirkung (vgl. Abschnitt A.2.2 [A-12]).

Zusätzlich hatte die Schalungsbreite auch einen Einfluss auf den zeitlichen Druckabfall. Für die breitere Stütze mit einem Durchmesser von 0,92 m war der Druckabfall deutlich höher als für die dünnere Stütze. Die Regenerierung infolge der thixotropen Wirkung des SVB kann nach [A-6] als Grund dafür angesehen werden. Bei der Stütze mit dem kleineren Querschnitt wird die Wiederzunahme an Scherfestigkeit womöglich durch die ausgeprägtere "Gewölbewirkung" beeinträchtigt.

Einfluss der Bewehrung

Nicht nur durch die Reibung zwischen Beton und Schalung sondern auch durch die Art und Anordnung der Bewehrung wird der auftretende Schalungsdruck deutlich reduziert, indem ein Teil der vertikalen Last über Reibung an die Bewehrung übertragen wird. Beim Betonieren von 4 m hohen Stützen wurde durch den Einbau einer Bewehrung bei einer Betoniergeschwindigkeit von 25 m/h am Fuß der Stütze ein um etwa 20 % geringerer Druck als bei einer vergleichbaren Stütze ohne Bewehrung gemessen [A-4]. Dieser recht deutliche Unterschied hängt wahrscheinlich von den geringen Querschnittsabmessungen des Bauteils $(0,30 \cdot 0,30 \text{ m}^2)$ ab. Bei größeren Querschnitten, wie beispielsweise Wänden, wird dieser Einfluss wahrscheinlich nicht so eindeutig ausfallen. Ein Einfluss des Bewehrungsgrades wurde in [A-4] und [A-11] nicht untersucht.

A.2.3 Berechnungsmodelle für den Frischbetondruck

Mit folgenden Berechnungsansätzen kann der Frischbetondruck der durch SVB beanspruchten Schalungssysteme ermittelt werden.

- 1. Hydrostatischer Ansatz
- 2. Ansatz nach Silotheorie
- 3. Rheologischer Ansatz
- 4. Bodenmechanischer Ansatz
- 5. Empirisch abgeleiteter Berechnungsansatz

Im Folgenden werden die ersten drei Berechnungsansätze näher erläutert. Der bodenmechanische Ansatz und der empirisch abgeleitete Berechnungsansatz werden in [A-15] beschrieben.

Ansatz des hydrostatischen Frischbetondrucks

Auf Grund der immer noch großen Unsicherheiten werden die heute beim Betonieren mit fließfähigen Betonen eingesetzten Schalungen in der Regel für den vollen hydrostatischen Betondruck bemessen, unabhängig von etwaigen Einflussparametern. Diese Empfehlung wird auch für SVB in den SVB-Richtlinien des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) [A-16, A-17] gegeben sowie in anderen internationalen Regelwerken infolge mangelnder Kenntnisse angesetzt [A-14, A-18, A-19].

In [A-4] findet sich ein Berechnungsvorschlag, der auf den Modellvorstellungen der DIN 18218 [A-23] basiert.

Danach ergibt sich der maximale Druck p_{b,max} bei Erstarrungsende (t=t_E) zu:

$$p_{b,max} = \frac{\gamma_b \cdot v_b \cdot \lambda_0 \cdot t_E}{2}$$
(A-2)

mit

 γ_b : Frischbetonrohwichte

v_b: Steiggeschwindigkeit des Betons

- λ_0 : Seitendruckbeiwert bei Betonierbeginn
- t_E: Erstarrungsende des Betons

Unter der Annahme, das SVB bei Betonierbeginn die Eigenschaften einer vollkommenen Flüssigkeit aufweist, d. h. λ_0 zu 1 gesetzt werden kann, errechnet sich der maximale Schalungsdruck mit $\gamma_b = 25 \text{ kN/m}^3 \text{ zu}$:

$$\mathbf{p}_{\mathrm{b,max}} = 12,5 \cdot \mathbf{v}_{\mathrm{b}} \cdot \mathbf{t}_{\mathrm{E}} \tag{A-3}$$

Damit hängt der maximale Schalungsdruck lediglich von der Betoniergeschwindigkeit und der Erstarrungszeit des SVB ab. Unterschiede in der Konsistenz werden nicht berücksichtigt. Für den Druckverlauf über die Bauteilhöhe herrschen bis zum Erreichen des Maximaldrucks hydrostatische Verhältnisse, danach bleibt der Druck bis zum Erstarrungsende konstant.

Bei Anwendung dieser Formel ergibt sich für eine Steiggeschwindigkeit von 5 m/h, die für SVB relativ gering ist, sowie einer Erstarrungszeit von 5 Stunden ein maximaler Betondruck von 312,5 kN/m² und damit ein hydrostatischer Druckverlauf über eine Höhe von 12,5 m. Damit wird deutlich, dass dieser Vorschlag für übliche Randbedingungen mit dem hydrostatischen Druckverlauf über die gesamte Schalungshöhe gleichzusetzen ist.

Dieser Ansatz ist nach [A-4] nur für das Befüllen von oben mit einer Fallhöhe von bis zu 2,0 m gültig. Für den Fall des Einbringens von unten ist hydrostatisches Verhalten zuzüglich eines Anteils aus der zu überwindenden Wandreibung anzusetzen.

Anwendung der Silodrucktheorie für fließfähige Betone

Ein weiterer Berechnungsansatz für die Bestimmung des Schalungsdrucks wird von Vanhove [A-12] vorgestellt. Aufbauend auf den Reibbeiwert μ (Schalung/Beton) und der minimalen Schalungsbreite wird hier der Schalungsdruck basierend auf den Grundlagen der Silotheorie nach Janssen [A-20] ermittelt.

Die Schwierigkeiten bei Anwendung der Silodrucktheorie für herkömmlichen Rüttelbeton bestanden maßgeblich in einer realistischen Einarbeitung des zeitlich veränderlichen Seitendruckbeiwertes. Des Weiteren wurde vermutet, dass durch die Vibrationsverdichtung die Reibungseffekte zwischen Beton und Schalung nahezu vollkommen aufgehoben werden [A-20].

Unter Hinweis auf ein mögliches verzögertes Erstarrungsverhalten des SVB gegenüber Normalbeton scheint es für höhere Geschwindigkeiten und begrenzte Bauteilhöhen und daraus folgend geringen Betonierzeiten vertretbar, näherungsweise von einem gleichbleibenden Beiwert auszugehen, wenngleich auch vor Beginn des Ansteifens mit einem geringen Viskositätsanstieg infolge Thixotropie zu rechnen ist.

Unterstellt man ein konstantes Seitendruckverhältnis während der gesamten Betonierzeit (Wirkung wie eine Flüssigkeit, $\lambda = 1$), ergibt sich aus dem Gleichgewicht der Kräfte am differentiellen Scheibenelement der Schalungsdruckverlauf über die Betonierhöhe bei einer Wand mit der Breite d zu:

$$p_{b} = \frac{\gamma_{b} \cdot d}{2 \cdot \mu} \left[1 - e^{\frac{2 \cdot \mu}{d} z} \right]$$
(A-4)

mit

- γ_b : Frischbetonrohwichte
- d: minimale Schalungsbreite
- μ: Wandreibungskoeffizient
- z: Tiefe von Betonoberkante

Der Wandreibungskoeffizient µ muss dabei experimentell ermittelt werden.

Vanhove [A-12] führte zusätzlich in Anlehnung an DIN 1055 T6 [A-21] einen Korrekturfaktor ein, welcher die dynamischen Einflüsse und die Art der Stoffstruktur berücksichtigen soll. In der angesprochenen Norm wird ein Korrekturfaktor jedoch lediglich für gedrungene Silos (Verhältnis Höhe/Mindestbreite $\leq 1,5$) angegeben. Diese Geometriebedingungen liegen allerdings bei Schalungen im Allgemeinen nicht vor.

Bei unendlicher Füllhöhe ergibt sich aus obiger Gleichung demnach der maximale Schalungsdruck zu:

$$p_{b,max} = \frac{\gamma_b \cdot d}{2 \cdot \mu} \tag{A-5}$$

Nach diesem Berechnungsansatz besteht demnach keine Abhängigkeit von der Betoniergeschwindigkeit. Das Modell ist für die Beschreibung des Frischbetondrucks bei Verwendung von SVB ungeeignet, da die Betoniergeschwindigkeit einen deutlichen Einfluss auf den Schalungsdruck ausübt (vgl. Kapitel A.2.2).

Berechnung des Frischbetondrucks auf Grundlage rheologischer Parameter

Bei diesem Ansatz wird der Betondruck über rheologische Kenngrößen, wie z. B. Viskosität, Fließgrenze, Thixotropie des Frischbetons, bestimmt. In [A-22] wurde als wichtigster Parameter das thixotrope Verhalten des Frischbetons identifiziert. Zur Bestimmung der Thixotropie zum Zeitpunkt t wurde im Scherdiagramm die "Bruchfläche" A_b zwischen den Kurven der Anfangsschubspannung und der Schubspannung im Gleichgewichtszustand verwendet. Khayat [A-22] ermittelte dabei die Schubspannung τ bei einer Schergeschwindigkeit ω von 0,3 bis 0,9 Umdrehungen je Sekunde im Koaxialrheometer. Er stellte einen Zusammenhang zwischen der Fläche A_b und dem zeitlich veränderlichen Gesamtseitendruckbeiwert K(t) bzw. $\lambda(t)$ fest. Bei Untersuchungen an Stützen mit einer Höhe von 2,8 m, einem Durchmesser von 0,2 m und einer Betoniergeschwindigkeit von 10 m/h fand Khayat heraus, dass bei einer größeren Bruchfläche A_b jeweils ein geringerer Frischbetondruck zu erwarten ist.

A.2.4 Normative Bemessungsmodelle für Rüttelbeton

Die heute gültigen internationalen Normen berücksichtigen die unter Kapitel A.2.2 aufgeführten Einflussgrößen in unterschiedlichem Maße. Mit Ausnahme der deutschen Norm basieren alle anderen auf empirischen Ansätzen. Anders als bei den teilweise sehr komplexen Berechnungsvorschlägen einzelner Autoren steht bei den Normen vor allem eine sichere Handhabbarkeit der Bemessungsansätze für die Praxis im Vordergrund.

Über den grundsätzlichen Verlauf des anzusetzenden Frischbetondrucks auf die Schalung besteht weitgehend Einigkeit. Von der Oberkante des Frischbetons ist auf Grund der mechanischen Verdichtung bis in eine bestimmte Tiefe ein hydrostatischer Betondruck anzusetzen, von der an der Druck konstant bleibt. Die genaue Lage dieses Knickpunktes im Druckverlauf, und damit auch der auftretende maximale Schalungsdruck, unterscheidet sich jedoch erheblich.

Nachfolgend werden die wichtigsten international gültigen Modellansätze für Rüttelbeton aufgeführt.

Deutschland: DIN 18218

Die in Deutschland gültige Norm DIN 18218 [A-23] stammt aus dem Jahre 1980 und resultiert aus einer umfangreichen Auswertung der bis zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Versuchsergebnisse und theoretischen Ansätze zur Thematik des Schalungsdrucks.

Die DIN 18218 [A-23] gibt den maximalen Frischbetondruck getrennt für vier verschiedene Konsistenzbereiche (steif (K1), plastisch (K2), weich (K3) und Fließbeton) an. Unter der Voraussetzung einer Verdichtung mit Innenrüttlern ergeben sich daraus für die jeweiligen Konsistenzbereiche folgende vier Gleichungen:

| K1: $\mathbf{p}_{b,max} = \gamma_b \cdot \mathbf{C}_2 \cdot \mathbf{K}_T \cdot (0, 20 \cdot \mathbf{v}_b + 0, 84)$ | (A-6) |
|--|-------|
|--|-------|

K2:
$$p_{b,max} = \gamma_b \cdot C_2 \cdot K_T \cdot (0,40 \cdot v_b + 0,76)$$
 (A-7)

K3:
$$p_{b,max} = \gamma_b \cdot C_2 \cdot K_T \cdot (0.56 \cdot v_b + 0.72)$$
 (A-8)

Fließbeton: $p_{b,max} = \gamma_b \cdot C_2 \cdot K_T \cdot (0.68 \cdot v_b + 0.68)$ (A-9)

Begrenzung des maximalen Druckes:

Für Wände:
$$p_{b,max} = 80 \text{ kN/m}$$

Für Stützen: $p_{b,max} = 100 \text{ kN/m}^2$

mit

p_{p,max} maximaler Frischbetondruck [kN/m²]

- γ_b Frischbetonrohwichte [kN/m³]
- v_b Betoniergeschwindigkeit [m/h]
- C₂ Zusatzmittelkoeffizient (C₂ = $0.08 \cdot t_v + 1$ für Fließbeton)
- t_V Erstarrungsverzögerung [h]
- K_T Temperaturkoeffizient
- T Frischbetontemperatur 5 °C \leq T \leq 30 °C [°C]

Die Begrenzung der maximalen Frischbetondrücke auf die o.g. Werte wurde vorgenommen, um unnötig hohe Druckwerte zu vermeiden und damit eine sichere und stabile Schalung zu gewährleisten.

Die obigen Gleichungen sind für einen Frischbeton mit einer Rohwichte von 25 kN/m³, einer Temperatur von 15 °C und einem Erstarrungsende von 5 Stunden nach Mischbeginn in Bild A-2 ausgewertet.


Bild A-2: Diagramm zur Bestimmung des Frischbetondrucks p_b in Abhängigkeit von der Betoniergeschwindigkeit und der Konsistenz nach DIN 18218 [A-23]

Der Frischbetondruck wirkt über eine Höhe von $h_E = v_b \cdot t_E$, d. h. vom Frischbetonspiegel bis zur Grenze des bereits erstarrten Betons. Bis zum Erreichen der maximalen Druckordinate folgt der Betondruck dem hydrostatischen Verlauf und bleibt von dort an konstant. Bei hohen Bauteilen tritt der Betondruck demnach als Wanderlast auf.

Dem Einsatz von Außen- bzw. Schalungsrüttlern soll durch Ansatz des hydrostatischen Drucks über die gesamte Höhe Rechnung getragen werden. Dies gilt ebenfalls bei anderen auf den Frischbeton dauernd einwirkenden Erschütterungen.

Druckmindernde Einflüsse aus der Silowirkung werden in DIN 18218 [A-23] nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass moderne Verdichtungsgeräte so leistungsstark sind, dass die induzierten Schwingungen entsprechende Reibungseffekte vollkommen aufheben [A-20]. Einflüsse aus dem Schalungsaufbau (Querschnitt, Rauhigkeit und Saugfähigkeit) werden somit auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt.

Im Normenentwurf E DIN 18218:2008-01 [A-24] "Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen" sind erstmals Berechnungsvorschläge zur Schalungsbelastung bei Verwendung von Betonen mit fließfähiger Konsistenz aufgeführt. Die enthaltenen vereinfachten Berechnungsansätze für die Konsistenzklassen F5, F6 und SVB (entsprechend DIN EN 206-1:2001-07 [A-24]) wurden auf Grundlage des Sachstandsberichtes [A-15] im DIN-Normenausschuss NA 005-07-11 AA "Bauausführungen" vom Unterausschuss "Frischbetondruck" erarbeitet. Kernpunkt des Normenentwurfs ist die Druckverteilung nach DIN 18218 mit veränderten Variablen, die das beton- und rezepturspezifische Erstarrungsverhalten berücksichtigen [A-23].

Großbritannien: CIRIA-Report

1985 wurde von der CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) eine Bemessungsmethode veröffentlicht [A-25], deren Entwicklung sich an den gestiegenen Anforderungen hinsichtlich zunehmender Füllhöhen und Füllgeschwindigkeiten orientierte. Zudem werden hier erstmals Mischzemente und Zusatzmittel berücksichtigt. Die Bemessungsgleichung lautet:

$$p_{b,max} = \gamma_b \cdot \left(C_1 \cdot \sqrt{v_b} + C_2 \cdot K_T \cdot \sqrt{h \cdot C \cdot \sqrt{v_b}} \right)$$
(A-10)

 $p_{b,max} = \gamma_b \cdot h$

 $p_{b,max} = 90 \text{ kN/m}^2$ für Wände

 $p_{h,max} = 166 \text{ kN/m}^2 \text{ für Stützen}$

Der kleinere Wert ist maßgebend.

mit

p_{b,max} maximaler Frischbetondruck [kN/m²]

- γ_b Frischbetonrohwichte [kN/m³]
- v_b Betoniergeschwindigkeit [m/h]
- h Betonierhöhe [m]
- C1 Querschnittskoeffizient (1,0 für Wände; 1,5 für Stützen)
- C2 Zusatzmittelkoeffizient (0,30 für Normalbeton; 0,45 für Beton mit Erstarrungsverzögerer)
- KT Temperaturkoeffizient KT = 36/(T+16)

Im Gegensatz zur DIN 18218 [A-23] geht hier die Betonierhöhe mit ein. Dies führt bei höheren Bauteilen zu vergleichsweise höheren Betondrücken.

USA: ACI 347-01

Nach Sichtung und Analyse vorhandener Versuche zur Bestimmung des Seitendrucks bei Frischbeton verfasste das American Concrete Institute (ACI) 1958 erstmals Bemessungsvorschläge getrennt für Wände und Stützen und für verschiedene Geschwindigkeitsspektren unter Einbeziehung der bedeutendsten Parameter Betoniergeschwindigkeit, Frischbetontemperatur und Vibrationsverdichtung [A-26]. Nach mehrmaliger Überarbeitung verzichtet der neueste Entwurf [A-13] auf eine Differenzierung hinsichtlich verschiedener Geschwindigkeitsbereiche, führt jedoch zusätzlich Koeffizienten zur Berücksichtigung verschiedener Frischbetonrohwichten sowie Verzögerungen im Abbindeverhalten durch bestimmte Zusatzmittel und -stoffe ein. Die heute gültigen Empfehlungen lauten:

für Stützenschalungen:

$$p_{b,max} = C_{W} \cdot C_{C} \cdot \left(7,2 + \left(\frac{785 \cdot v_{b}}{T + 17,8}\right)\right)$$
(A-11)

$$\mathbf{p}_{\mathrm{b,max}} = \mathbf{\gamma}_{\mathrm{b}} \cdot \mathbf{h} \tag{A-12}$$

$$\mathbf{p}_{\mathrm{b,max}} = \mathbf{C}_{\mathrm{W}} \cdot \mathbf{C}_{\mathrm{C}} \cdot 150 \tag{A-13}$$

Der kleinere Wert ist maßgebend.

für Wandschalungen:

$$p_{b,max} = C_{W} \cdot C_{C} \quad \left(7,2 + \frac{1156}{T + 17,8} + \frac{244 \cdot v_{b}}{T + 17,8}\right)$$
(A-14)

$$\mathbf{p}_{\mathrm{b,max}} = \boldsymbol{\gamma}_{\mathrm{b}} \cdot \mathbf{h} \tag{A-15}$$

$$\mathbf{p}_{\mathrm{b,max}} = \mathbf{C}_{\mathrm{W}} \cdot \mathbf{C}_{\mathrm{C}} \cdot 100 \tag{A-16}$$

Der kleinere Wert ist maßgebend.

Zusätzlich gilt ein Mindestwert von $30 \cdot C_w$ [kN/m²] für Stützen und Wände.

mit

| p _{b,max} | maximaler Frischbetondruck [kN/m ²] |
|--------------------|---|
| v_b | Betoniergeschwindigkeit [m/h] |
| Т | Frischbetontemperatur [°C] |
| h | Betonierhöhe [m] |
| C_{W} | Koeffizient für die Frischbetonrohwichte [-] |
| C _C | Koeffizient zur Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung [-] (abhängig von Zementart, Gehalt an Gesteinskörnungen und Zusatzmitteln) |

Der Betondruck ist hier über die gesamte Bauteilhöhe anzusetzen.

Für das Pumpen des Betons von unten wird empfohlen, die Schalung auf vollen hydrostatischen Frischbetondruck zu bemessen zuzüglich eines 25% igen Aufschlags für den Pumpendruck.

Frankreich: NPF 93-350

Nach der französischen Norm NFP 93 350 [A-27] ergibt sich der maximale Schalungsdruck für alle Betone, unabhängig von der Frischbetonrohdichte grundsätzlich zu

$$p_{b,max} = 2,4 \cdot g \cdot h \ [kN/m^2] \tag{A-17}$$

mit

g Erdbeschleunigung [m/s²]

h Betonierhöhe [m]

Bis zu einer Höhe von 3 m muss aber der hydrostatische Frischbetondruck angesetzt werden.

Normative Bemessungsmodelle für SVB

Aufgrund der Unkenntnis des tatsächlich auftretenden Schalungsdrucks bei dem Einsatz von SVB wird zum heutigen Zeitpunkt bei der Bemessung von Schalungssystemen i. d. R. von hydrostatischen Druckverhältnissen ausgegangen. Dieses ist auch in den bereits veröffentlichten SVB-Richtlinien aus Deutschland, Österreich, Schweden und den Niederlanden festgeschrieben [A-16, A-17, A-18, A-19, A-28]. Der darin enthaltene Sicherheitszuschlag ist wahrscheinlich zu hoch, so dass es insbesondere bei relativ niedrigen Betoniergeschwindigkeiten in Verbindung mit hohen Betonierhöhen zur unwirtschaftlichen Bemessung der Schalungen kommt.

A.3 Durchgeführte Arbeiten

A.3.1 Überblick Untersuchungsprogramm

Richtrezepturen und Mischungsentwurf

Im Rahmen der 1. Projektsitzung wurden für die einzelnen Forschungsstellen folgende Richtrezepturen vorgeschlagen:

| Doromotor | Einhoit | Gehalt/Wert | | | | | | | |
|-----------------------------|---------|-------------|------|------|------|-----------|--|--|--|
| Farameter | Ennen | SVB1 | SVB2 | SVB3 | SVB4 | RB F5/F6 | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | | |
| CEM I 32,5 R | | | | 270 | | | | | |
| Flugaschegehalt | | 3 | 00 | 1 | 80 | 130 | | | |
| Wassergehalt | kg/m³ | 165 | 200 | 165 | 200 | 165 | | | |
| Gesteinskör- nungsgehalt | | 1599 | 1507 | 1730 | 1638 | 1772 | | | |
| Fließmittel (PCE) | 0/ y 7 | 1,4 | 0,6 | 2,2 | 1,1 | 0,4 - 0,8 | | | |
| Stabilisierer | % V. Z. | - | - | 2 | ,0 | - | | | |
| Luftgehalt | Vol% | 1,5 | | | | | | | |
| w/z _{eq} | - | 0,54 | 0,65 | 0,54 | 0,65 | 0,54 | | | |

| Tabelle A-1: | Richtrezepturen für das Forschungsvorhaben "Schalungsbelastung |
|--------------|--|
| | durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz" |

SVB1: Mehlkorntyp, höherviskos

SVB2: Mehlkorntyp, niederviskos

SVB3: Stabilisierertyp, höherviskos

SVB4: Stabilisierertyp, niederviskos

RB F5/F6: Einstellung der Konsistenzklasse des Rüttelbetons über Fließmittelzugabe

Weiterhin wurden für die zu untersuchenden Betone Richtwerte für die charakteristischen Frischbetoneigenschaften, wie Ausbreitmaß, Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit festgelegt.

SVB:

- Das Setzfließmaß sm des Betons nach DAfStb-Richtlinie SVB [A-17] soll bei Betoneinbau (72 \pm 2) cm betragen.
- Die Trichterauslaufzeit t_{Tr} der verwendeten Betone nach DAfStb-Richtlinie SVB [A-17] soll bei Betoneinbau für die höherviskosen Betone (5 ± 1) s bzw. für die niederviskosen Betone (13 ± 2) s betragen.
- Einzuhalten ist das Kriterium zur Vermeidung des Blockierens nach DAfStb-Richtlinie SVB (Setzfließmaß mit Blockierring) [A-17].

Beton der Konsistenzklasse F5:

Das Ausbreitmaß a des Betons nach DIN EN 12350-5 [A-29] soll bei Betoneinbau (60 ± 2) cm betragen.

Beton der Konsistenzklasse F6:

Das Ausbreitmaß a des Betons nach DIN EN 12350-5 [A-29] soll bei Betoneinbau (68 ± 2) cm betragen.

Da die Untersuchungen zu den Frischbetondruckmessungen im Fertigteilwerk durchgeführt wurden, mussten produktionsbedingt die Ausgangsstoffe geändert und die Mischungsentwürfe angepasst werden. Der eingesetzte höherviskose Mehlkorntyp-SVB war ein bauaufsichtlich zugelassener Beton "Drössler easyflow" (SVB), der in dem Fertigteilwerk standardmäßig zur Produktion von Stahlbetonfertigteilen eingesetzt wird. Die anderen SVB wurden aus diesem Standardbeton entwickelt. Auch die Rüttelbetone basierten auf einer Standardrezeptur des Fertigteilwerkes. In Tabelle A-2 sind die verwendeten Betonrezepturen dargestellt.

| | | Gehalt/Wert | | | | | | | |
|--------------------|---------|-------------|-------|-------|-------|------|------|--|--|
| Parameter | Einheit | SVB | SVB | SVB | SVB | RB | RB | | |
| | | MK-hv | MK-nv | ST-hv | ST-nv | F5 | F6 | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | |
| CEM II/A-LL 42,5 R | | 3 | 00 | 34 | 10 | 39 | 95 | | |
| Flugaschegehalt | | 2. | 50 | 10 | 00 | 7 | 5 | | |
| Wassergehalt | kg/m³ | 160 | 190 | 180 | 200 | 170 | 180 | | |
| Gesteinskör- | | 1664 | 1584 | 1742 | 1680 | 1750 | 1722 | | |
| nungsgehalt | | 1004 | 1304 | 1742 | 1089 | 1750 | 1723 | | |
| Fließmittel (PCE) | 0/ y 7 | 3,9 | 2,1 | 2,7 | 1,7 | 1,2 | 1,5 | | |
| Stabilisierer | % V. Z. | | 1, | 0 | | - | 1,0 | | |
| Luftgehalt | Vol% | 1,5 | | | | | | | |
| w/z _{eq} | - | 0,47 | 0,56 | 0,47 | 0,52 | 0,4 | 0,42 | | |

 Tabelle A-2:
 Betonrezepturen für das Forschungsvorhaben "Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz"

MK: Mehlkorntyp ST: Stabilisierertyp hv: höherviskos

nv: niederviskos

Charakterisierung der Betone

Zur Charakterisierung der Betone wurde sowohl im Labor als auch im Fertigteilwerk die Konsistenz, die Frischbetontemperatur, die Frischbetonrohdichte und die Erstarrungszeit bestimmt.

• Konsistenz

Bei dem SVB wurde das Setzfließmaß und die Setzfließzeit gemäß [A-17], bei dem Rüttelbeton das Ausbreitmaß gemäß [A-29] unmittelbar nach Mischende ermittelt. Im Fertigteilwerk zum Beginn des Betoneinbaus in die Schalung sowie 30 min, 60 min und 90 min nach Betoneinbau. Zusätzlich wurden die Trichterauslaufzeit und das Setzfließmaß mit Blockierring gemäß [A-17] unmittelbar nach Mischende und im Fertigteilwerk zum Beginn des Betoneinbaus in die Schalung bestimmt.

• Frischbetonrohdichte

Die Frischbetonrohdichte wurde gemäß [A-30] ermittelt. Dazu wurde eine Würfelform mit einer Seitenlänge von 150 mm mit Frischbeton gefüllt. Abweichend von [A-30] wurden die mit SVB gefüllten Probekörper nicht verdichtet.

• Erstarren

Zur Ermittlung der Erstarrungszeit des Betons wurde das in [A-31] beschriebene Verfahren eingesetzt. Dazu wird eine Betonprobe von ca. 81 in einen PE-Foliensack gefüllt, der anschließend zu verschließen ist. Der Beton wird dann in dem Foliensack in stündlichem Abstand abgetastet und der Erstarrungszustand charakterisiert.

Durch die in der 1. Projektsitzung festgelegten charakteristischen Frischbetoneigenschaften waren die rheologischen Eigenschaften der Betone weitestgehend vorgegeben. Zur Überprüfung der rheologischen Kenngrößen der Betone wurden im Labor an dem Mörtel, der rechnerisch aus dem Beton extrahiert wurde, Untersuchungen im Viskomat NT durchgeführt, da das Fließverhalten des Betone vorrangig durch die Eigenschaften der Zementleime bzw. -mörtel beeinflusst wird.

A.3.2 Versuchsaufbau für die modellartigen Wandversuche

In diesem Forschungsvorhaben wurde der Frischbetondruck in Abhängigkeit von der Betoniergeschwindigkeit und des Einbringverfahrens für selbstverdichtende Betone im Vergleich zu Rüttelbetonen ermittelt. Die Untersuchungen erfolgten an Modellwänden mit den Abmessungen $3,30 \cdot 2,56 \cdot 0,24$ m³ (Bild A-3). Die Wandschalung wurde aus je drei einzelnen Elementen mit einer Breite von 0,90 m zusammengesetzt, die jeweils mit einem 0,05 m breiten Ausgleichselement getrennt waren, um die Schalungsseiten möglichst weich (geringe Momentenübertragung) auszubilden und den Einfluss der Stirnabschalungen zu minimieren. Der Frischbetondruck wurde mittels Druckmessdosen bestimmt. Die Druckmessdosen bestanden jeweils aus einem mit der Schalhaut bündig abschließenden Druckaufnehmer (Stahlscheibe), der über eine Gewindestange mit einer Wägezelle verbunden war (Bild A-4). Zur Abdichtung war an der Innenseite der Schalung eine dünne PE-Folie über die Druckaufnehmer geklebt (Bild A-5). Die Druckmessdosen waren in 0,15 m, 0,75 m, 1,35 m und 2,55 m von der Schalungsunterkante im mittleren Schalungselement angebracht (Bild A-3).



Bild A-3: Versuchsaufbau mit Lage der Druckmessdosen



Bild A-4: Verankerung Druckmessdose

Bild A-5: Abdichtung Druckmessdose

Die Bezeichnung der Druckmessdosen für die Auswertung der Messergebnisse wurde wie folgt gewählt:

- unten: 0,15 m von Schalungsunterkante
- 2. v. unten: 0,75 m von Schalungsunterkante
- 2. v. oben: 1,35 m von Schalungsunterkante
- oben: 2,55 m von Schalungsunterkante

A.3.3 Versuchsdurchführung

Bei den Untersuchungen im Fertigteilwerk wurden insgesamt elf Wände betoniert. Je Wand wurden drei Chargen Beton benötigt. Die Steiggeschwindigkeit wurde über die Geschwindigkeit des Entleerens des Kübels bzw. über die Pumpe eingestellt und über eine Stirnschalung aus Plexiglas kontrolliert (Bild A-6). Produktionsbedingt entstand auch, wie in der Praxis üblich, eine Unterbrechung des Betonierens zwischen den einzelnen Chargen. Der Beton wurde entweder mit dem Kübel von oben eingefüllt oder mit einer Pumpe durch einen speziellen Anschluss von unten in das Bauteil eingebracht (Bild A-7). Die Rüttelbetone wurden mit einem Innenrüttler verdichtet. Der Innenrüttler hatte eine Leistung von 3 x 250 Volt und eine Frequenz von 200 Hz. Bei der Betonage von oben betrug die freie Fallhöhe zwischen Kübel und Schalungsboden max. 3,30 m. Die Wände erhielten jeweils eine Mindestbewehrung mit 2 x Q 188 A je Wandseite. Die Bewehrungsmatten wurden im Bereich der Druckmessdosen aufgeschnitten, damit es bei den Druckmessungen durch Stützwirkung der Bewehrung nicht zu verfälschten Ergebnissen kommt.



Bild A-6: Kontrolle der Steighöhe Bild A-7: Pumpenanschluss

Die Umgebungstemperatur lag bei den Versuchen zwischen 17,4 °C und 29,9 °C. Die Wände unterschieden sich hinsichtlich des Betontyps, der Betoniergeschwindigkeit und der Einfüllmethode (Tabelle A-3). Die Steiggeschwindigkeiten der SVB betrugen 10 und 2 m/h, die der RB lagen bei 2 m/h. Aufgrund der geringen Betoniergeschwindigkeit beim Pumpen ($v_b = 2$ m/h) konnten keine Pumpendrücke ermittelt werden.

| Bauteil | Beton | Einbaumethode | Betoniergeschwindigkeit | | |
|---------|--------------------|------------------------|-------------------------|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| Wand 1 | SVB-MK-hv | | | | |
| Wand 2 | SVB-MK-nv | | | | |
| Wand 3 | Wand 3 SVB-ST-hv | | 2.0 m/h | | |
| Wand 4 | SVB-ST-nv | von oben | 2,0 11/11 | | |
| Wand 5 | RB-F5 | mit Kübel | | | |
| Wand 6 | RB-F6 | | | | |
| Wand 7 | SVB-MK-hv | | 10.0 / | | |
| Wand 8 | SVB-MK-nv | | 10,0 11/11 | | |
| Wand 9 | SVB-MK-hv | | | | |
| Wand 10 | SVB-MK-nv | von unten mit Pumpe | 2,0 m/h | | |
| Wand 11 | SVB-ST-nv | inter unipe | | | |

Tabelle A-3: Versuchsprogramm

A.4 Ergebnisse

A.4.1 Laboruntersuchungen

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Betone sind in Tabelle A-A1, Anhang A, dargestellt. Das Setzfließmaß des SVB lag während der Untersuchungen unmittelbar nach Mischende zwischen 715 und 740 mm, die Setzfließzeit zwischen 1,2 und 3,4 s. Die Frischbetonrohdichte betrug zwischen 2365 und 2297 kg/m³. Die Kennwerte für die Konsistenz und die Frischbetonrohdichte lagen somit im üblichen Bereich des eingesetzten SVB. Die Trichterauslaufzeiten t_{Tr} lagen im geforderten Zielbereich (vgl. Kap. A.3.1). Die Erstarrungszeit der SVB betrug bei einer Frischbetontemperatur von 18 bis 21 °C ca. 7 h.

Die untersuchten Rüttelbetone entsprachen mit einem Ausbreitmaß von 635 mm und 670 mm unmittelbar nach Mischende den Konsistenzklassen F5 bzw. F6. Sie wiesen eine Frischbetonrohdichte von im Mittel 2365 kg/m³ auf. Die Erstarrungszeiten der RB lagen bei 5,5 h.

In Tabelle A-A2 sind die Ergebnisse der Mörteluntersuchungen dargestellt. Für die Prüfungen im Viskomat NT wurden die selbstverdichtenden Mörtel (SVM) auf ein Setzfließmaß von 290 mm eingestellt. Die Trichterauslaufzeiten t_{Tr} lagen zwischen 2,3 s und 6,5 s. Die Mörtel der Rüttelbetone (RM) wurden auf ein Ausbreitmaß von 230 mm bzw. 265 mm eingestellt. In Bild A-8 sind die Ergebnisse der Viskomatuntersuchungen anhand von Fließkurven abgebildet.



Bild A-8: Fließkurven der SVM und RM

Die Steigung der Fließkurve entspricht der Viskosität des Mörtels. Bei den SVM ergibt sich eine im Vergleich zur Trichterauslaufzeit gleiche Ordnung der relativen Viskositäten. Bei den hoch- und niederviskosen Systemen hat jeweils der Mehlkorntyp eine höhere Viskosität als der Stabilisierertyp. Dies begründet sich vermutlich im größeren Feinstanteil (Flugasche) der Mehlkorntypen. Damit wird zunächst der qualitative Zusammenhang zwischen Trichterauslaufzeit und Viskosität bestätigt. Es ist zu erkennen, dass der höherviskose Mörtel des Mehlkorntyps (SVM-MK-hv) ein leicht dilatantes Verhalten zeigt, während die Fließkurven der übrigen Mörtel dem Verlauf binghamscher Fluide ähneln. Die Mörtel der Rüttelbetone weisen ein binghamsches Verhalten auf und liegen mit den Viskositäten im Bereich der Viskosität des höherviskosen Mörtels des Stabilisierertyps. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass durch die Mischungsentwicklung Betone mit unterschiedlichen Viskositäten hergestellt werden konnten.

A.4.2 Betonagen im Fertigteilwerk

Bei den Betonagen im Fertigteilwerk wurden bei jeder ersten Charge der herzustellenden Wände die Frischbetoneigenschaften ermittelt. Zusätzlich wurde das Erstarrungsverhalten per Knetbeutelverfahren [A-31] bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle A-A3 dargestellt. Für den Einbau der Chargen zwei und drei wurde lediglich das Setzfließmaß bzw. das Ausbreitmaß überprüft. Weiterhin wurde die zeitliche Entwicklung der Konsistenz einer jeden ersten Charge ermittelt (Tabelle A-A4).

Das Setzfließmaß der SVB lag vor Einbau in die Schalung zwischen 705 und 740 mm. 30 min nach Einbau wiesen die Betone ein Setzfließmaß von 645 mm bis 695 mm auf. Die Charge der Wand 1 hatte 30 min nach Einbau lediglich ein Setzfließmaß von 595 mm. Bei den Rüttelbetonen lag das Ausbreitmaß vor dem Einbau zwischen 620 und 680 mm, und 30 min nach Betonagebeginn betrug es zwischen 500 und 645 mm. Die Frischbetonrohdichten lagen zwischen 2181 und 2328 kg/m³. Bei Frischbetontemperaturen von 22,1 bis 28,6 °C wurden bei den SVB Erstarrungszeiten zwischen 8,0 und 10,0 h und bei den RB Zeiten von 5,5 und 6,5 h ermittelt.

Frischbetondruckmessungen

In Bild A-9 sind die zeitlichen Entwicklungen der Frischbetondrücke während der Betonage der Wand 1 (SVB-Mk-hv) bei einer Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h dargestellt. Zusätzlich sind die Betonierhöhe und der hydrostatische Frischbetondruck in dem Diagramm eingetragen. Die Frischbetondrücke im unteren Bereich nehmen bis zur ersten Betonierpause bei einer Betonierhöhe von 1,20 m kontinuierlich zu. Nach der Betonierpause nehmen die Frischbetondrücke an den beiden unteren Druckmessstellen bis zur zweiten Betonierpause weiter zu. Die Steigung der Druckzunahme ist nach der Betonierpause flacher. Dieses ist auf die Thixotropie des bereits eingefüllten Betons zurückzuführen. Der Frischbetondruck an der zweiten Druckmessstelle von oben steigt bis zur zweiten Betonierpause kontinuierlich an. Nach der zweiten Betonierpause ist bis zum Betonageende keine Zunahme der Frischbetondrücke mehr zu erkennen. Lediglich der Frischbetondruck an der obersten Druckmessstelle steigt an.



Bild A-9: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke von Wand 1 in Abhängigkeit der Betonierhöhe für eine Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h

Zu erkennen ist, dass bei einer Betonierhöhe von ca. 2,2 m die Frischbetondrücke an drei Druckmessstellen sprunghaft ansteigen. Bei dieser Betonierhöhe wird die Auflast des Betons im oberen Bereich größer als die Stützwirkung und die Strukturbildung im angesteiften unteren Bereich. Daher kommt es zur Zunahme des Frischbetondrucks. Der max. Frischbetondruck beträgt ca. 55 % des hydrostatischen Frischbetondrucks.



Bild A-10: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke von Wand 1 in Abhängigkeit der Betonierhöhe für eine Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h

Nach Betonierende nimmt der Frischbetondruck bis zum Erstarrungsende t_E an der unteren Druckmessstelle auf ca. 66 % seines max. Drucks ab (Bild A-10).

Diese Zusammenhänge sind auch bei den Betonagen der Wände 2 bis 4 zu beobachten. Die zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke dieser Versuche sind in Anhang A, Bild A-A1 bis A-A3, dargestellt. Allerdings ist zu erkennen, dass es bei längeren Betonierpausen bereits zur Abnahme des Frischbetonsdrucks während des Betoniervorgangs an den zwei unteren Druckmessstellen kommt.

Bei der Betonage der Rüttelbetone (Bild A-A4 und A-A5) liegen die max. Frischbetondrücke im Bereich des hydrostatischen Frischbetondrucks. Der ungleichmäßige Verlauf der Frischbetondrücke ist auf die periodisch einsetzende Verdichtung mit dem Innenrüttler zurückzuführen. Eine Frischbetondruckabnahme während des Betonierens ist auch hier zu beobachten.

In Bild A-11 sind die Frischbetondrücke an der untersten Druckmessstelle für die Wände 1 bis 6 dargestellt.



Bild A-11: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke an der untersten Druckmessstelle der Wände 1 bis 6 für eine Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h

Die RB weisen aufgrund der Verdichtung die höchsten Frischbetondrücke auf. Bei den SVB ist festzustellen, dass die Frischbetondrücke der jeweiligen niederviskosen SVB-Typen größer sind als die der höherviskosen SVB-Typen. Ein Einfluss des SVB-Typs auf den Frischbetondruck ist nicht zu erkennen, da die Drücke der jeweiligen höher- bzw. niederviskosen Mischungen fast identisch sind.

Die Ergebnisse der Versuche für den Mehlkorntyp-SVB mit einer Betoniergeschwindigkeit von $v_b = 10$ m/h mit dem Kübel von oben sind in Bild A-A6 und A-A7 dargstellt. Die max. Frischbetondrücke liegen nahe am hydrostatischen Frischbetondruck und sind bei dieser Steiggeschwindigkeit für die beiden unterschiedlichen Viskositäten in etwa gleich (Bild A-A11).

Der Einfluss der Steiggeschwindigkeit ist in Bild A-12 deutlich erkennbar. Der Frischbetondruck ist bei einer Steiggeschwindigkeit des höherviskosen Mehlkorntyp-SVB von 10 m/h deutlich größer als bei 2 m/h. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der Beton bei der niedrigeren Steiggeschwindigkeit bereits leicht ansteifte. Beim niederviskosen Mehlkorntyp-SVB kann beobachtet werden (Bild A-A12), dass die Frischbetondrücke fast identisch sind. Aufgrund der langen zweiten Betonierpause beim Versuch mit einer Steiggeschwindigkeit von 10 m/h kam es zu einem Ansteifen des Betons und dadurch zu einer starken Abnahme des Frischbetondrucks.



Bild A-12: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke an der untersten Druckmessstelle der Wände 1 und 7 für Betoniergeschwindigkeiten von 2 m/h und 10 m/h

In den Bildern A-A8 bis A-A10 sind die Ergebnisse der Betonagen mit der Pumpe von unten für eine Steiggeschwindigkeit von 2 m/h dargestellt. Auch hier liegen die max. Frischbetondrücke im Bereich des hydrostatischen Frischbetondrucks. Beim Vergleich der Drücke an der untersten Druckmessstelle für den höherviskosen Mehlkorntyp-SVB ist festzustellen (Bild A-13), dass die Frischbetondrücke beim Pumpen signifikant höher sind als bei der drucklosen Befüllung von oben.



Bild A-13: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke an der untersten Druckmessstelle der Wände 1 und 9 in Abhängigkeit der Einbaumethode für eine Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h

Der Druck an der untersten Druckmessstelle ist bei Befüllung von unten um das 2,5fache größer als bei der drucklosen Befüllung von oben. Die Ursache dafür ist, dass der sich einstellende Druck des Frischbetons durch den Druck der Pumpe vergrößert wird. Dies ist erforderlich, um den Beton gegen den sich bereits in der Schalung befindlichen Beton (Frischbetondruck, Wandreibung) einzubringen.

Ein Einfluss des SVB-Typs und der Viskosität ist bei der Einbaumethode mit Pumpe von unten und einer Steiggeschwindigkeit von 2 m/h nicht zu erkennen (Bild A-14). Die max. Frischbetondrücke sind nahezu identisch.



Bild A-14: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke an der untersten Druckmessstelle der Wände 9, 10 und 11 für eine Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h

Wenn auch der hydrostatische Druck beim Einsatz von SVB bei der drucklosen Befüllung mit Kübel von oben und einer Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h nicht erreicht wird, so sollte bei der Bemessung von Schalungen für Betonagen von fließfähigen Betonen trotzdem vom hydrostatischen Druck ausgegangen werden, um so bei allen Betonierverfahren und Steiggeschwindigkeiten eine ausreichende Sicherheit der Schalung zu gewährleisten.

A.5 Zusammenfassung

Der Einfluss des SVB-Typs, der rheologischen Kenngrößen, des Betonierverfahrens und der Steiggeschwindigkeit auf den Frischbetondruck wurde bei der Betonage von Modellwänden mit fließfähigen Betonen untersucht. Die Wände wurden mit praxisüblichen Steiggeschwindigkeiten von 10 m/h und 2 m/h betoniert. Die Befüllung erfolgte alternativ mit einem Kübel von oben sowie mit einer Betonpumpe von unten.

Es wurde festgestellt, dass der Einfluss des SVB-Typs auf den Frischbetondruck gering war. Bei niedrigen Steiggeschwindigkeiten und einer Befüllung von oben wirkte sich eine Verringerung der Viskosität der SVB drucksteigernd aus. Dabei wurden aber keine hydrostatischen Verhältnisse erreicht. Bei höheren Steiggeschwindigkeiten hatte die Änderung der Viskosität keinen Einfluss auf den Frischbetondruck. Die Rüttelbetone erreichten bis zur halben Bauteilhöhe hydrostatische Druckverhältnisse.

Das Betonierverfahren hatte einen großen Einfluss auf den sich ausbildenden Frischbetondruck. Bei der Befüllung mit einer Betonpumpe von unten war der maximale Frischbetondruck in etwa doppelt so hoch wie bei drucklosen Befüllung von oben. Er lag über die gesamte Bauteilhöhe nahezu im Bereich des hydrostatischen Drucks.

Auch die Betoniergeschwindigkeit hatte einen Einfluss auf den Frischbetondruck. Bei höheren Steiggeschwindigkeiten war der Schalungsdruck größer. Er war etwa doppelt so groß und erreichte hydrostatische Druckverhältnisse.

Die Untersuchungen zeigen, dass das Betonierverfahren und die Steiggeschwindigkeit den größten Einfluss auf den Frischbetondruck haben. Der SVB-Typ hatte keinen Einfluss auf den Frischbetondruck und spielt bei der Bemessung von Schalungen eher eine untergeordnete Rolle. Die Viskosität der SVB hatte nur bei geringen Steiggeschwindigkeiten einen Einfluss auf den Frischbetondruck. Soll der SVB wirtschaftlicher eingesetzt werden, sind höhere Einbaugeschwindigkeiten als die hier überprüften notwendig. Für diesen Fall sollte bei der Verwendung von Betonen der Konsistenzklasse F5 und F6 sowie bei SVB die Bemessung von Schalungen anhand von hydrostatischen Druckverhältnissen erfolgen. Bei niedrigen Betoniergeschwindigkeiten kann eine Bemessung von Schalung in Abhängigkeit von der Steiggeschwindigkeit und der Konsistenzklasse erfolgen.

A.6 Literaturverzeichnis

- [A-1] Freimann, T.: Einfluß von Steinkohleflugaschen auf das rheologische Verhalten von Zementleimen und –mörteln. Hannover, Technische Universität, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen, Dissertation 2002.- zugl.: Berichte aus dem Institut für Baustoffe (2002), Nr. 1
- [A-2] Keck, H.-J.: Untersuchungen des Flie
 ßverhaltens von Zementleim anhand rheologischer Messungen. Essen, Universit
 ät Gesamthochschule Essen, Fachbereich Bauwesen, Dissertation, 1998
- [A-3] Brameshuber, W.: Charakterisierung und Modellierung des Fließverhaltens von Selbstverdichtendem Beton. Aachen : Institut f
 ür Bauforschung, 2003. – Forschungsantrag Nr. F 900
- [A-4] Graubner, C.-A. ; Proske, T.: Einfluß der Betoniergeschwindigkeit auf das Entlüftungsverhalten sowie den entstehenden Schalungsdruck bei Verwendung von selbstverdichtendem Beton. Darmstadt : Institut für Massivbau, 2002. – Forschungsbericht V 415
- [A-5] Assaad, J.; Khayat, K.H.; Mesbah, H.: Variation of Formwork Pressure with Thixotropy of Self-Consolidating Concrete. In: ACI Materials Journal 100 (2003), Nr. 1, S. 29-37
- [A-6] Khayat, K.H.; Assaad, J.; Mesbah, H.: Variations of Formwork Pressure of Self-Consolidating Concrete – Effect of Section Width and Casting Rate. Evanston : Center for Advance Cement-Based Materials, 2002. - In: First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Evanston, II, USA, November 12-13, 2002, S. 295-302
- [A-7] Grauers, M.: Form Systems and Surface Properties. Brussels : European Commission, ECCREDI, 2000. - In: Proceedings Seminar on Self-Compacting Concrete, Malmö, 20th - 21st November 2000, S. 33-37
- [A-8] Brite-EuRam project BRPR-CT96-0366, 2000 <u>http://scc.ce.luth.se/public/report/task7/</u>
- [A-9] Söderlind, L.: Full-Scale Tests for Housing. Cachan Cedex : RILEM Publications, 1999. - In: Proceedings of the First International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete, Stockholm, September 13-14, 1999, (Skarendahl, A. ; Petersson, Ö. (Ed.)), S. 723-728
- [A-10] Billberg, P., Österberg, T.: Self-compacting Concrete Technique of application. CBI rapport. <u>http://www.cbi.se/ra022a.htm</u>
- [A-11] Brameshuber, W. ; Uebachs, S.: Schalungsdruck bei der Anwendung von selbstverdichtendem Beton. Aachen : Institut f
 ür Bauforschung, RWTH Aachen, 2003.-Forschungsbericht Nr. F 848
- [A-12] Vanhove, Y.; Djelal, C.; Magnin, A.; Martin, D.: Study of Self-Compacting Concrete Pressure on Formwork. Fukui : COMS Engineering Corporation, 2001. -In: Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, 23-25 October 2001, (Ozawa, K.; Ouchi, M. (Ed.)), S. 585-594
- [A-13] ACI-Committee 347: Guide to Formwork for Concrete (ACI 347-01) Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, 2001
- [A-14] Hurd, M.K.: Putting the Pressure on Formwork. In: Concrete International 24 (2002), Nr. 10, S. 49-55

- [A-15] Graubner, C.-A.; Beitzel, H.; Beitzel, M.; Brameshuber, W.; Brunner, M.; Dehn, F.; Glowienka, S.; Hertle, R.; Huth, J.; Leitzbach, O.; Meyer, L.; Motzko, C.; Müller, H.S.; Proske, T.; Rathfelder, M.; Schuon, H.; Uebachs, S.: Frischbetondruck fließfähiger Betone. Sachstandbericht. Berlin: Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2006), Nr. 567
- [A-16] Deutscher Ausschuß f
 ür Stahlbeton (DAfStb) Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB Richtlinie), Erg
 änzungen zu DIN 1045 1988-07, Ausgabe 10/2001
- [A-17] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (DAfStb) Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Ergänzungen und Änderungen zu DIN 1045 2 2001 07 und DIN EN 206 1 2001 07 und DIN 1045 3 2001 07, Ausgabe 08/2003 (12. Entwurf)
- [A-18] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: Merkblatt Selbstverdichtender Beton (SCC) (Ausgabe Dez. 2002). Wien : Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2002
- [A-19] Silfwerbrand, J.: Self-Compacting Concrete : Recommendations for Use. Stockholm : Swedish Concrete Association, 2002. - Concrete Report No. 10(E)
- [A-20] Specht, M.: Der Frischbetondruck nach DIN 18218 die Grundlagen und wichtigsten Festlegungen. In: Bautechnik 8 (1981), Nr. 8, S. 253-261
- [A-21] DIN 1055-6:2005-03 Einwirkung auf Tragwerke Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter
- [A-22] Khayat, K.H. ; Assaad, J.: Use of Rheological Properties of SCC to Predict Formwork Pressure. Evanston, Illinois : Center for Advanced Cement-Based Materials, 2005. - In: SCC 2005, Conference Proceedings, The Second North American Conference on the Design and Use of Self Consolidation Concrete (SCC) and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago, Illinois, 30. Okt. - 02. Nov. 2005, Plenary Closing 2, 6 Seiten
- [A-23] DIN 18218:1980-09 Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen
- [A-24] DIN 18218 Entwurf 2008-01 Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen
- [A-25] Clear, C. A. ; Harison, T. A.: The pressure of concrete in formwork CIRIA Research Report Nr. 108. Construction Industry Research and Information Association, London, 1985
- [A-26] ACI-Committee 622 (Ellsberg, H.).: Pressure on Formwork. In: Journal of the American Concrete Institute 30 (1958), S. 173-190, S. 1335-1339
- [A-27] NFP 93-350:1995-06 Banches industrialisées pour ouvrages en béton
- [A-28] Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving: Aanbeveling 93, Zelfverdichtend Beton. Gouda : Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, 2002
- [A-29] DIN EN 12 350-5:2000-06 Prüfung von Frischbeton Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12 350-5:1999
- [A-30] DIN EN 12350-6:2000-03 Prüfung von Frischbeton Teil 6: Frischbetonrohdichte; Deutsche Fassung EN 12350-6:1999
- [A-31] Reinhardt, H.W.; Brameshuber, W.; Uebachs, S.; Buchenau, G.; et al: Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB). Berlin: Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2001), Nr. 516

A.7 Danksagung

Für die Unterstützung des Vorhabens durch die Fa. Benno Drössler GmbH & Co. KG (Beton, Gelände, Zuarbeiten beim Stellen der Schalung) und PERI GmbH (Schalung) bedanken sich die Projektbeteiligten ausdrücklich.

Aachen, 26.11.2008

Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber

Dipl.-Ing. C. Bohnemann

A.8 Anlagen

| Prüfgröße | Einheit | SVB MK-hv | SVB MK-nv | SVB ST-hv | SVB ST-nv | RB F5 | RB F6 |
|-------------------------------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Setzfließmaß sm | mm | 740 | 740 | 740 | 715 | - | _ |
| Setzfließzeit t ₅₀₀ | | 3,5 | 1,9 | 1,9 | 1,2 | - | - |
| Setzfließmaß sm,b | | 670 | 680 | 675 | 635 | - | - |
| Setzfließzeit t500,b | 8 | 4,34 | 2,23 | 4,60 | 1,6 | - | - |
| Trichterauslaufzeit t _{Tr} | | 14,0 | 6,2 | 11,2 | 5,9 | - | - |
| Ausbreitmaß a | mm | - | - | - | - | 635 | 670 |
| Rohdichte | kg/m³ | 2357 | 2297 | 2365 | 2346 | 2361 | 2369 |
| Erstarrungsende t _{E,Knet} | h | 7,0 | 6,5 | 7,0 | 7,0 | 5,5 | 5,5 |

Tabelle A-A1:Ergebnisse der Laboruntersuchungen der Betone

| Tabelle A-A2: | Ergebnisse o | der Laborunters | suchungen de | er Mörtel |
|---------------|--------------|-----------------|--------------|-----------|
| | | | | |

| Prüfgröße | Einheit | SVM MK-hv | SVM MK-nv | SVM ST-hv | SVM ST-nv | RM F5 | RM F6 |
|-------------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Setzfließmaß sm | mm | 290 | 290 | 290 | 290 | - | - |
| Trichterauslaufzeit t _{Tr} | S | 6,5 | 3,4 | 5,5 | 2,3 | - | - |
| Ausbreitmaß a | mm | - | - | - | - | 230 | 265 |
| Relative Viskosität bei 60 1/min | Nmm∙ min | 0,30 | 0,11 | 0,13 | 0,08 | 0,15 | 0,12 |

| Prüfgröße | Einheit | SVB | SVB | SVB | SVB | RB | RB |
|---------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | MK-hv | MK-nv | ST-hv | ST-nv | F5 | F6 |
| | | Wand1 | Wand2 | Wand3 | Wand4 | Wand5 | Wand6 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Setzfließmaß sm | mm | 720 | 715 | 740 | 705 | - | _ |
| Setzfließzeit t ₅₀₀ | | 4,5 | 2,1 | 2,2 | 1,3 | - | - |
| Setzfließmaß sm,b | G | 680 | 700 | 715 | 675 | - | - |
| Setzfließzeit t500,b | 8 | 8,0 | 2,2 | 4,8 | 3,1 | - | - |
| Trichterauslaufzeit t _{Tr} | | 11,0 | 4,8 | 10,0 | 4,1 | - | - |
| Ausbreitmaß a | mm | - | - | - | - | 620 | 680 |
| Rohdichte | kg/m³ | 2292 | 2263 | 2328 | 2312 | 2276 | 2304 |
| Erstarrungsende t _{E,KB} | h:min | 9,20 | 9,25 | 8,15 | 10,09 | 5,39 | 6,44 |
| Erstarrungsende t _{E,eff,KB} | h:min | 9,0 | 9,0 | 8,0 | 10,0 | 5,30 | 6,30 |
| Frischbetontemperatur | °C | 22,7 | 22,2 | 22,1 | 22,5 | 23,9 | 25,6 |

Tabelle A-A3:Untersuchungsergebnisse Beton, Wände 1 bis 11

Tabelle A-A3:Fortsetzung

| Prüfgröße | Einheit | SVB MK-hv Wand7 | SVB MK-nv Wand8 | SVB MK-hv Wand9 | SVB MK-nv Wand10 | SVB ST-nv Wand11 |
|---------------------------------------|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Setzfließmaß sm | mm | 740 | 730 | 730 | 735 | 720 |
| Setzfließzeit t500 | | 3,5 | 2,0 | 4,0 | 2,7 | 1,1 |
| Setzfließmaß sm,b | | 710 | 710 | 690 | 720 | 665 |
| Setzfließzeit t500,b | 8 | 7,5 | 2,4 | 5,6 | 3,3 | 1,9 |
| Trichterauslaufzeit t _{Tr} | | 10,8 | 4,5 | 10,0 | 5,0 | 3,0 |
| Ausbreitmaß a | mm | - | - | - | - | - |
| Rohdichte | kg/m³ | 2287 | 2268 | 2266 | 2181 | 2269 |
| Erstarrungsende t _{E,KB} | h:min | 9,40 | 8,41 | 8,39 | 9,13 | 9,42 |
| Erstarrungsende t _{E,eff,KB} | h:min | 9,30 | 8,30 | 8,30 | 9,0 | 9,30 |
| Frischbetontemperatur | °C | 27,0 | 28,6 | 22,7 | 24,0 | 22,6 |

| Prüfgröße | Zeit | Einheit | SVB | SVB | SVB | SVB | RB | RB |
|---------------|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | MK-hv | MK-nv | ST-hv | ST-nv | F5 | F6 |
| | | | Wand1 | Wand2 | Wand3 | Wand4 | Wand5 | Wand6 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| | Einbau | | 720 | 715 | 740 | 705 | - | - |
| Setzfließmaß | 30 min | | 595 | 680 | 675 | 655 | - | - |
| sm | 60 min | | 575 | 575 | 645 | 625 | - | - |
| | 90 min | mm | 530 | 550 | 620 | 600 | - | - |
| | Einbau | 111111 | - | - | - | - | 620 | 680 |
| Ausbreitmaß a | 30 min | | - | - | - | - | 500 | 645 |
| | 60 min |] | - | - | - | - | 445 | 620 |
| | 90 min | | - | - | - | - | 370 | 550 |

Tabelle A-A4:zeitliche Entwicklung der Konsistenz der Wände 1 bis 11

Tabelle A-A4:I

Fortsetzung

| Prüfgröße | Zeit | Einheit | SVB | SVB | SVB | SVB | SVB |
|--------------|--------|---------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | | | MK-hv | MK-nv | MK-hv | MK-nv | ST-nv |
| | | | Wand7 | Wand8 | Wand9 | Wand10 | Wand11 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | Einbau | | 740 | 730 | 730 | 735 | 720 |
| Setzfließmaß | 30 min | mm | 695 | 680 | 650 | 645 | 620 |
| sm | 60 min | 111111 | 660 | 625 | 640 | 615 | 610 |
| | 90 min | | 600 | 585 | 630 | 600 | 580 |



Bild A-A1: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke von Wand 2 in Abhängigkeit der Betonierhöhe für eine Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h



Bild A-A2: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke von Wand 3 in Abhängigkeit der Betonierhöhe für eine Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h



Bild A-A3: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke von Wand 4 in Abhängigkeit der Betonierhöhe für eine Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h



Bild A-A4: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke von Wand 5 in Abhängigkeit der Betonierhöhe für eine Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h



Bild A-A5: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke von Wand 6 in Abhängigkeit der Betonierhöhe für eine Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h



Bild A-A6: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke von Wand 7 in Abhängigkeit der Betonierhöhe für eine Betoniergeschwindigkeit von 10 m/h



Bild A-A7: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke von Wand 8 in Abhängigkeit der Betonierhöhe für eine Betoniergeschwindigkeit von 10 m/h



Bild A-A8: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke von Wand 9 in Abhängigkeit der Betonierhöhe für eine Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h



Bild A-A9: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke von Wand 10 in Abhängigkeit der Betonierhöhe für eine Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h



Bild A-A10: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke von Wand 11 in Abhängigkeit der Betonierhöhe für eine Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h



Bild A-A11: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke an der untersten Druckmessstelle der Wände 7 und 8 für eine Betoniergeschwindigkeit von 10 m/h



Bild A-A12: Zeitliche Entwicklung der Frischbetondrücke an der untersten Druckmessstelle der Wände 2 und 8 für Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h und 10 m/h

Teilprojekt B

Simulations- und Großversuche

von

Prof. Dr.-Ing. H. Beitzel⁽¹⁾ Prof. Dr.-Ing. H. S. Müller⁽²⁾ Dipl.-Ing. M. Beitzel⁽²⁾

(1) Institut für Bauverfahrens- und Umwelttechnik, Trier(2) Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie

Inhaltsverzeichnis Schlussbericht Teilprojekt B

| B.1 | Einleitung | B-3 |
|------------|--|------|
| B.1. | 1 Problemstellung | B-3 |
| B.1. | 2 Zielsetzung | B-4 |
| B.1. | 3 Vorgehensweise | B-4 |
| B.2 | Ausgangsbasis und Grundlagen für Teilprojekt B | B-6 |
| B.2. | 1 Ausgangspunkt | B-6 |
| B.2. | 2 Einflussparameter auf den Frischbetondruck | B-7 |
| B.3 | Durchgeführte Arbeiten | B-8 |
| B.3. | 1 Versuchsprogramm | B-8 |
| B.3. | 2 Versuchsaufbau und Messtechnik | B-10 |
| B.3. | 3 Versuchsdurchführung | B-16 |
| B.4 | Ergebnisse | B-21 |
| B.4. | 1 Einfluss der Einbaugeschwindigkeit | B-21 |
| B.4. | 2 Einfluss der Schalungsgeometrie | B-23 |
| B.4. | 3 Einfluss der Frischbetontemperatur | B-25 |
| B.5 | Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf | B-28 |
| B.6 | Literaturverzeichnis | B-31 |
| B.7 | Danksagung | B-33 |
| B.8 | Anlagen | B-34 |

B.1 Einleitung

B.1.1 Problemstellung

Zur Gewährleistung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit bei dem Einsatz von Schalungssystemen auf Betonbaustellen sind fundierte Kenntnisse des horizontalen Frischbetondruckverhaltens und entsprechende Bemessungsmodelle unverzichtbar. Wie neuere Untersuchungsergebnisse bestätigen, gelten die bislang bekannten stoffgesetzlichen Beziehungen aber lediglich für Normal-, Leicht- und Schwerbeton und sind noch nicht eindeutig geklärt. Darüber hinaus bleiben für neue Betonarten wesentliche Einflussparameter außer Acht [B-1].

Des Weiteren wurde die dem Forschungsvorhaben "Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz" zugrunde liegende Problematik bereits im Rahmen des DAfStb-Sachstandsberichts – Frischbetondruck fließfähiger Betone [B-2] identifiziert und eingehend formuliert. Insofern sollen an dieser Stelle die wesentlichen Gedanken nochmals wiedergegeben werden. Gleichzeitig wird in diesem Zusammenhang auch auf [B-2] verwiesen.

Verschiedene Normen wie die DIN 18218 [B-3], das CIB-CEB-FIB-Bulletin [B-4] oder der CIRIA-Report [B-5] ergeben sich aus einer mehr oder weniger ausgeprägten Modifizierung eines hydrostatischen Druckansatzes. Dies hat aufgrund der betontechnologischen und bauverfahrenstechnischen Entwicklungen der vergangenen Jahre zur Folge, dass die genannten Normen das effektive Schalungsdruckverhalten nicht wirklichkeitsnah abbilden. Das Hauptaugenmerk der o. g. Normen und Regelwerke war auf die Standsicherheit von sowohl der Schalung als auch dem Traggerüst ausgerichtet. Demzufolge können bei ihrer Anwendung keine fundierten Aussagen hinsichtlich der Schalungsverformung und -gebrauchstauglichkeit getroffen werden.

Nachfolgend sollen am Beispiel der bezüglich der Konsistenzbereiche nicht mehr zeitgemäßen DIN 18218 exemplarisch einige Gesichtspunkte aufgeführt werden, welche die Bestimmung des Schalungsdruckverhaltens fließfähiger Betone zusätzlich erschweren:

- Die Gültigkeit von DIN 18218 bezieht sich ausschließlich auf vertikale Schalungssysteme. Aus ihren Angaben lassen sich nur äußert ungenaue Aussagen für geneigte Schalungen ableiten.
- Bei ihrer Anwendung für den Einsatz von Konter- oder Deckelschalungen wird auf Aussagen zur Bestimmung des Auftriebs gänzlich verzichtet.
- In DIN 18218 sind keine Angaben hinsichtlich der Reibungseffekte zwischen Frischbeton und Schalung zu finden. Dies behindert die exakte Bestimmung der parallel zur Schalung auftretenden Kräfte. Zwar sind diesbezüglich vereinzelt Werte in der Literatur vorhanden, jedoch sind diese nicht für geneigte Schalungen verwendbar. Darüber hinaus sind auch keinerlei Angaben zur Ableitung der Abstützkraft für den Einsatz geneigter Schalungen enthalten.

• Da die Gültigkeit der genannten Norm ausschließlich auf den Einbauzustand beschränkt ist, trifft sie keinerlei Aussagen in Bezug auf den Vorspannungszustand des Schalungssystems für erstarrten Beton. Gleichzeitig wird dieser Eigenspannungszustand sowohl im Traggerüst als auch in der Schalung vollkommen vernachlässigt.

Die vorangegangene Aufstellung führt zu der Erkenntnis, dass eine wirklichkeitsnahe Ermittlung des Schalungsdrucks fließfähiger Betone mit den derzeit zur Verfügung stehenden Normen und Regelwerken nicht möglich ist. Daher wird zur Schalungsbemessung zumeist ein hydrostatischer Druckansatz empfohlen [B-2].

B.1.2 Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Bildung einer wissenschaftlichen Grundlage hinsichtlich der wirkenden Einflussparameter zur Entwicklung eines Bemessungsmodells für den Schalungsdruck fließfähiger Betone. Im Mittelpunkt der im Rahmen des beantragten Vorhabens durchzuführenden experimentellen Untersuchungen steht die Beschreibung des Frischbetondruckverhaltens für vertikale Schalungen. Dabei sollen die maßgebenden Einflussgrößen gezielt erfasst werden, um somit eine wissenschaftliche Grundlage für die Herleitung und Erstellung eines fundierten Bemessungsmodells zu ermöglichen.

Zur Gewährleistung von einheitlichen und steuerbaren Bedingungen werden die experimentellen Untersuchungen in einer Versuchshalle durchgeführt.

Hierzu wird die bereits vorhandene, von BEITZEL in [B-1] bzw. [B-6] entwickelte und bewährte Modellvorrichtung verwendet, die es ermöglicht, neben der tatsächlichen Schalungshöhe weitere Einbauhöhen zu simulieren. Anhand dieser Vorrichtung kann die Anzahl der durchzuführenden Untersuchungen bei gleichbleibendem Kostenaufwand erhöht werden.

Darauf aufbauend erfolgt die Durchführung der experimentellen Untersuchungen zum Schalungsdruckverhalten fließfähiger Betone. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Betrachtung der Einflüsse der einzelnen Parameter auf den Frischbetondruck – der Einbaugeschwindigkeit, der Schalungsgeometrie und der Frischbetontemperatur – gerichtet. Gleichzeitig werden in diesem Zusammenhang der zeitliche Konsistenzverlauf und die Schalungsendverformung erfasst. Dabei kommt eine Trägerschalung zum Einsatz, s. [B-6].

In einem letzten Schritt sollen die gewonnenen Ergebnisse in baupraktischen Großversuchen an einer Rahmenschalung überprüft werden, s. [B-6].

B.1.3 Vorgehensweise

Ebenso wie die Problemstellung (Abschnitt B.1.1) ergibt sich die Vorgehensweise des Forschungsvorhabens aus dem in [B-2] aufgezeigten Forschungsbedarf. Die auf das Teilprojekt B anzuwendenen Überlegungen werden nachfolgend aufgegriffen und noch einmal wiedergegeben.

Aufgrund der Vielzahl ungelöster Probleme ergibt sich der Forschungsbedarf und der daraus geforderte Forschungsansatz. Für eine wirklichkeitsnahe Berechnung des Frischbetondrucks, besonders bei Betonen mit hoher Fließfähigkeit (F5-Beton, F6-Beton und selbstverdichtender Beton), liegen noch in keinster Weise ausreichende Erkenntnisse vor. Grundsätzlich ist eine stoffgesetzliche Modellbildung für einen erweiterten Kenntnisstand wünschenswert. Zur ganzheitlichen Betrachtung der Thematik werden im Rahmen des Teilprojektes B die Frischbetondruckmessungen an der bereits vorhandenen, in [B-1] bzw. [B-6] eigens entwickelten und bewährten Modellvorrichtung sowie an Bauteilen durchgeführt. Diese werden von den weiteren Forschungsstellen u. a. durch die Untersuchung des rheologischen Materialverhaltens des Frischbetons (Teilprojekt A), die Modellbildung und Nachweiskonzepte (Teilprojekt C), die Erschütterungsund Vibrationsuntersuchungen (Teilprojekt D) sowie durch die Betrachtung der Qualitätssicherung (Teilprojekt E) ergänzt.

Hinsichtlich der Bemessung von Schalungskonstruktionen muss grundsätzlich zwischen Einwirkung und Widerstand differenziert werden. Dabei ist die Identifizierung derjenigen Einflussparameter notwendig, die eine signifikante Wirkung auf den Frischbetondruck ausüben. Des Weiteren soll überprüft werden, ob diese Paramter in einer praktischen Anwendung ermittelt werden können, denn nur unter dieser Voraussetzung ist ihre explizite Berücksichtigung in einem Stoffgesetz überhaupt sinnvoll [B-2].

Für die Ableitung eines allgemeinen Berechnungsverfahrens zur Beschreibung des Frischbetondruckverhaltens fließfähiger Betone bilden die experimentellen Untersuchungen des Forschungsvorhabens das wissenschaftliche Fundament. Dabei wird der Zusammenhang zwischen dem vorherrschenden Frischbetondruck und den dazugehörigen Einflussparametern erfasst und wissenschaftlich geklärt.

Das Frischbetondruckverhalten an vertikalen Schalungskonstruktionen wird durch die Simulation eines Einbauvorgangs an mittelgroßen Wandbauteilen erfasst und analysiert. Dabei der absolute Frischbetondruck, die Konsistenz, werden u. a. die Frischbetontemperatur sowie die resultierenden Schalungsendverformungen registriert. Damit einhergehend wird eine gezielte Untersuchung der Einflussparameter Einbaugeschwindigkeit, Schalungsgeometrie und Frischbetontemperatur angestrebt.

Darauf aufbauend sollen in einem letzten Schritt die gewonnenen Ergebnisse an Großversuchen mit einer Rahmenschalung überprüft werden.

B.2 Ausgangsbasis und Grundlagen für Teilprojekt B

Sowohl die Ausgangsbasis als auch die Grundlagen für das hier vorgestellte Teilprojekt B ergeben sich (wie bereits der Abschnitt B.1) ebenfalls aus dem von den Autoren mit erarbeiteten DAfStb-Sachstandsbericht [B-2] und der darin enthaltenen aktuellen Zusammenstellung des nationalen und internationalen Wissenstands zum Schalungsdruckverhalten fließfähiger Betone auf vertikale Schalungen. Gleichsam wurden darin die bisher bestehenden Grundlagen für eine normative Regelung des Schalungsdrucks fließfähiger Betone (F5- und F6-Beton sowie selbstverdichtender Beton nach DIN EN 206-1 [B-7] bzw. DIN 1045-2 [B-8]) aufgezeigt [B-2].

Dabei wurde auf der Grundlage der aktuellen Regelwerke die Problemstellung des Frischbetondruckverhaltens fließfähiger Betone unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften und der baubetrieblichen Randbedingungen behandelt. Daran anschließend wurden nationale und internationale Forschungsergebnisse zusammengefasst und gegenübergestellt. Des Weiteren enthält der DAfStb-Sachstandsbericht [B-2] einen Vergleich der unterschiedlichen Modellansätze mit daraus abgeleiteten Vorschlägen für eine Verbesserung der existierenden Modellvorstellungen. Gleichsam werden die resultierenden Fragestellungen bezüglich der Sicherheit und Zuverlässigkeit von Schalungskonstruktionen sowie der offene Forschungsbedarf aufgezeigt.

B.2.1 Ausgangspunkt

Im Rahmen der Erforschung des Baustoffs selbstverdichtender Beton konnten schon verschiedene Fragestellungen wissenschaftlich gelöst werden. Jedoch trifft dies nicht in dem gleichen Ausmaß auf das Schalungsdruckverhalten selbstverdichtender Betone zu. Zumeist gelten die ermittelten Messergebnisse alleine für spezifische Bauteile. Dabei fehlen oft für die Interpretation der Ergebnisse wichtige Angaben wie zur Einbaugeschwindigkeit oder zum gewählten Messverfahren. Vereinzelt ist aber auch der Einfluss signifikanter Parameter wie Einbaugeschwindigkeit oder Konsistenz systematisch untersucht worden. In der jüngsten Vergangenheit wurden vermehrt sog. F6-Betone baupraktisch verwendet, welche auch als leichtverdichtbare Betone bezeichnet werden. Als F6-Betone werden Betone definiert, welche der Konsistenzklasse F6 nach DIN 1045-2 entsprechen. Gleichzeitig müssen sie ein Ausbreitma $\beta \ge 630$ mm aufzeigen, hingegen aber keine selbstverdichtenden Eigenschaften erfüllen. Im Hinblick auf den Schalungsdruck von F6-Betonen sind bis zum heutigen Zeitpunkt auch erst vereinzelt experimentelle Untersuchungen durchgeführt und die entsprechenden Ergebnisse der Fachwelt zugänglich gemacht worden. In den nachfolgenden Abschnitten wird der für das Teilprojekt B wesentliche Stand der Forschung hinsichtlich des Schalungsdrucks von selbstverdichtendem Beton und F6-Beton dargestellt [B-2].
B.2.2 Einflussparameter auf den Frischbetondruck

Auf Grundlage der Auswertung der national und international veröffentlichten Literatur ist keine allgemeingültige und eindeutige Aussage möglich, welche Einflussgrößen den Frischbetondruck von Fließbeton und selbstverdichtendem Beton bestimmen. Nach dem derzeitigen Stand der Erkenntnis ist ebenfalls keine sichere Prognose des zu erwartenden Frischbetondrucks möglich. Eine mögliche Ursache für die z. T. widersprüchlichen Aussagen hinsichtlich des Frischbetondruckverhaltens fließfähiger Betone könnte die Tatsache sein, dass die rheologischen Frischbetoneigenschaften der verwendeten Betone nicht ausreichend berücksichtigt worden sind, s. [B-2].

Ein maßgebender Einfluss der Einbauverfahren auf den resultierenden Frischbetondruck wurde bei in Deutschland durchgeführten Untersuchungen beobachtet. Beispielsweise führt bei dem Einsatz von Betonpumpen der Betoneinbau "von oben" zu wesentlich geringeren Frischbetondrücken als eine Schalungsbefüllung "von unten". Auch führt ein Betoneinbau mit geringer Steiggeschwindigkeit zu geringeren Frischbetondrücken als der Betoneinbau mit hohen Steiggeschwindigkeiten.

Grundsätzlich lässt sich die Gewichtung der Einflussparameter in die Kategorien "hoch" und "mittel bis gering" einstufen (s. [B-2]). Zu der Gruppe mit einer Gewichtung "hoch" zählen die Parameter Einbaugeschwindigkeit, rheologische Frischbetoneigenschaften, Bauteilgeometrie (Einbauhöhe und Schalungsquerschnitt), Einbaugeschwindigkeit, Einbaumethode Verdichtungsenergie -tiefe) (Einbaurichtung, und und Betonzusammensetzung (u. a. Frischbetondichte und -konsistenz). Zu den ..mittlerer bis geringer" Einflussparametern Gewichtung zählen z. Β. der Bewehrungsgehalt, die Schalungsrauhigkeit, das Frühschwinden, die Haftung zwischen Beton und Schalung, die Verdichtungsart sowie die Außentemperatur.

Demnach beeinflussen zahlreiche Einflussparameter den sich ergebenden Frischbetondruck, deren Wirkung auch schon für die Bestimmung des Frischbetondrucks von Rüttelbetonen nicht eindeutig geklärt ist. Bei dem Einbau von selbstverdichtendem Beton sind dies die rheologischen Frischbetoneigenschaften sowie die Frischbetontemperatur. In den Fällen, in denen die Randbedingungen nicht eindeutig im Zuge der Arbeitsvorbereitung festgelegt wurden, sollte daher aufgrund des derzeitigen Kenntnisstandes der hydrostatische Druck zur Bemessung der Schalung und der Anker gewählt werden, um so bei allen Betonierverfahren und Steiggeschwindigkeiten eine ausreichende Sicherheit der Schalung zu gewährleisten [B-2].

B.3 Durchgeführte Arbeiten

B.3.1 Versuchsprogramm

Die experimentellen Untersuchungen zum Frischbetondruckverhalten von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz erfolgten in Anlehnung an [B-6]. Dabei wurden die Umgebungsbedingungen konstant gehalten. Die Schalungsbelastung ergab sich sowohl aus der Simulation verschiedener Einbauhöhen mit einem Modellschalungssystem als auch alleine aus dem in eine Rahmenschalung eingebauten Beton. Die verwendete Trägerschalung des Modellschalungssystems hatte die Abmessungen h x b x d = 1,50 m x 2,00 m x 0,25 m. Die Abmessungen der Rahmenschalung betrugen h x b x d = 3,00 m x 1,25 m x 0,25 m.

Um die Einflussparameter auf den Frischbetondruck fließfähiger Hochleistungsbetone eindeutig identifizieren zu können, wurden zwei Fließbetone verschiedener Konsistenz sowie ein selbstverdichtender Beton ausgewählt, s. Tabelle B-1.

| Tabelle B-1: | Experimentell | untersuchte | Betone | mit | ihren | charakteristischen |
|--------------|---------------|-------------|--------|-----|-------|--------------------|
| | Eigenschaften | | | | | |

| Beton | Eigenschaft | | | |
|--|--|--|--|--|
| Fließbeton | | | | |
| Normalbeton CEM III/A 32,5 N (F5) Normalbeton CEM I 32,5 R (F6) | $2000 \text{ kg/m}^3 < \rho \le 2600 \text{ kg/m}^3$ | | | |
| Selbstverdichtender Beton | | | | |
| Selbstverdichtender Beton CEM I 32,5 R | $2000 \text{ kg/m}^3 < \rho \le 2600 \text{ kg/m}^3$ | | | |

Vor der Durchführung der experimentellen Untersuchungen wurde im Rahmen der Simulations- und Großversuche jeweils ein geeignetes Versuchsprogramm aufgestellt. Dieses ermöglichte das Studium der nachfolgenden Einflüsse auf den Schalungsdruck der fließfähigen Normalbetone und eines selbstverdichtenden Betons:

- Einbaugeschwindigkeit
- Schalungsgeometrie
- Frischbetontemperatur (nur Simulationsversuche)

Darüber hinaus konnten anhand der Oberflächenvermessung der Betonkörper die Wandunebenheiten festgestellt werden, welche einen Aufschluss über die Größenordnung der aufgetretenen Schalungsverformungen gaben.

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen wurde der Beton in die verwendete Trägerschalung eingebracht. Das Anbringen der Belastungsvorrichtung zur Simulation verschiedener Einbauhöhen erfolgte an einen Stahlprofilrahmen mit den Maßen h x b = 2,77 m x 1,60 m, s. [B-6].

Der Betoneinbau in die Rahmenschalung erfolgte mittels eines Kübels auf konventionellem Wege "von oben".

Tabelle B-2 gibt einen Überblick über das experimentelle Versuchsprogramm. Darin sind die verwendeten Schalungskonstruktionen, die resultierenden Wandkörperabmessung sowie die ermittelten Messgrößen dargestellt.

| Versuch | Modellschalt | ungssystem | Systemschalung | | |
|---|--|--|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
| Schalungsart | Tägersch | halung | Ra | hmenschalu | ing |
| Modell- abmessungen h x b x d [m] | 1,50 x 2,00 x 0,25 | | 3,00 x 1,25 x 0,25 | | |
| Messgrößen | σ_h -t \rightarrow T _B , a bzw. sm | | σ_h -t \rightarrow a bzw. sm | | |
| Beton | NB-F5 | SVB | NB-F5 | NB-F6 | SVB |
| Einbau- geschwindigkeit [m/h] | $v_1 = 3,5$ $v_2 = 14$ | $v_1 = 3,5$ $v_2 = 7$ $v_3 = 14$ | v = 14 | $\begin{array}{l} v_1=7\\ v_2=28 \end{array}$ | $v_1 = 7$ $v_2 = 14$ $v_2 = 28$ |
| Einbauhöhe [m] | | | | h = 3 | |

| Tabelle B-2: | Übersicht | über | das | Versuchsprogramm | der | Simulations- | und |
|--------------|-----------|---------|--------|------------------------|--------|--------------|-----|
| | Großversu | che zun | n Scha | alungsdruck fließfähig | er Bet | one | |

Wie Tabelle **B-2** wurden experimentellen zeigt, im Rahmen der Simulationsuntersuchungen für den F5-Beton (NB-F5) sowie den selbstverdichtenden Beton (SVB) der Schalungsdruck σ_h , die Frischbetontemperatur T_B sowie das Ausbreitmaß a bzw. das Setzfließmaß sm erfasst. Für den Beton NB-F5 betrugen die simulierten Einbaugeschwindigkeiten v = 3,5 m/h und 14 m/h. Bei dem selbstverdichtenden Beton SVB wurden die Einbaugeschwindigkeiten v = 3,5 m/h, 7 m/h und 14 m/h simuliert. Die simulierten Einbauhöhen betrugen h = 3 m und 6 m. Aufgrund der maximal zulässigen Belastung der verwendeten Druckmessdosen war eine Simulierung größerer Einbauhöhen nicht möglich.

Im Zuge der Großversuche wurden für den F5-Beton, den F6-Beton (NB-F6) und den selbstverdichtenden Beton die Messgrößen Schalungsdruck σ_h sowie das Ausbreitmaß a bzw. das Setzfließmaß sm bestimmt. Die untersuchten Einbaugeschwindigkeiten betrugen für den NB-F5 v = 14 m/h, für den NB-F6 v = 7 m/h und 28 m/h sowie für den SVB v = 7 m/h, 14 m/h und 28 m/h.

B.3.2 Versuchsaufbau und Messtechnik

Eine ausführliche Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Messtechnik ist in [B-6] zu finden. Zum besseren Verständnis wird sich hier diesbezüglich lediglich auf die wesentlichen Gesichtspunkte beschränkt, welche in den nachfolgdenden Abschnitten wiedergegeben werden.

Simulationsversuche

Der Versuchsaufbau entsprach den Ausführungen von [B-1] bzw. [B-6]. Dieser wurde bereits vor Beginn des Forschungsvorhabens und unabhängig davon entwickelt. Die Versuchseinrichtung setzte sich aus den folgenden Komponenten zusammen:

- Schalungskonstruktion
- Stahlrahmenkonstruktion
- Belastungsvorrichtung
- Einbauvorrichtung

Die Verwendung eines aus einer Modellkonstruktion mit Messeinrichtung bestehenden Versuchsaufbaus zur Erfassung des Schalungsdrucks infolge simulierter Einbauhöhen (Simulationsversuche) ermöglichte für eine Vielzahl von Versuchen einheitliche Bedingungen sowie die Variation einzelner Einflussparameter. Der resultierende Schalungsdruck wurde in dem mit Beton befüllten Schalungsbereich der Simulations-Modellvorrichtung erfasst. Auf diese Weise konnte ein durchgehender Praxisbezug gewährleistet werden. Neben dem konventionellen Einbauprozess konnten dabei auch die zusätzlichen Einbauhöhen simuliert werden. Somit wurde durch eine dem jeweiligen Betoneigengewicht und der Einbaugeschwindigkeit entsprechende Lastaufbringung ein kontinuierlicher Einbauvorgang nachgestellt.

Um den an das Modellschalungssystem gestellten Anforderungen gerecht zu werden, wurde seine Konstruktion aus zwei voneinander unabhängigen Teilsystemen zusammengesetzt. Das versuchstechnische Grundgerüst wurde von einer Trägerschalung gebildet. Mittels dieser Trägerschalung konnte die Versuchsreihe unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt werden.

Das zweite Teilsystem bestand aus einer Stahlrahmenkonstruktion mit integrierter hydraulischer Pumpeneinheit. Damit konnten Einbauhöhen, welche über die Schalungshöhe der verwendeten Trägerschalung hinausgehen, frei simuliert werden. Von essentieller Relevanz für die Durchführung der experimentellen Versuche war die Stahlrahmen-Stützkonstruktion. Grundgedanke war dabei die Gewährleistung eines gleichmäßigen und kontinuierlichen Lastauftrags. Die geometrischen Abmessungen mussten eine ungestörte Versuchsdurchführung ermöglichen. Durch eine adäquate Wahl der messtechnischen Einrichtungen konnten die jeweiligen Schalungsdrücke in geforderter Weise aufgezeichnet werden.

Schalungskonstruktion

Zur Durchführung der Simulationsversuche wurde eine konventionelle Trägerschalung gewählt. Die Konstruktionsprinzipien und deren Ausführung wurden bereits eingehend in [B-6] vorgestellt. In Bild B-1 sind die geometrischen Abmessungen und die Bestandteile des Schalungssystems dargestellt.



Bild B-1: Ansicht (oben), Querschnitt (Mitte, Schnitt A–A) und Längsschnitt (unten, Schnitt B–B) der eingesetzten Trägerschalung [B-6]; alle Abmessungen in [cm]

Um die zu erwartenden Schalungsdrücke der im Versuchsprogramm vorgegebenen Auflastsimulation problemlos aufnehmen zu können, erfolgte die Bemessung des Schalungssystems auf der "sicheren Seite" liegend (s. [B-6]). Daher ist für die Schalungsdimensionierung eine Einbauhöhe von 10 m und eine hydrostatische Schalungsdruckcharakteristik angenommen worden. Die Schalungsbemessung erfolgte nach den allgemeingültigen Vorgaben und Vorschriften, s. [B-9].

Stahlrahmenkonstruktion, Belastungs- und Einbauvorrichtung

Die zur Komplettierung des Modellschalungssystems verwendete Stahlrahmenkonstruktion ist zusammen mit der zugehörigen Belastungs- und Einbauvorrichtung detailliert in [B-6] beschrieben.

Eigenschaften und Umsetzung des Modellschalungssystems

Bild B-2 zeigt schematisch das Prinzip zur Umsetzung des Versuchsaufbaus, s. [B-6].



Bild B-2: Prinzip des Modellschalungsaufbaus zur Untersuchung des Schalungsdrucks fließfähiger Betone (links), Vorderansicht (oben rechts) und Seitenansicht (unten rechts) [B-6] Bild B-2 links zeigt ausgehend von der Hydraulikpumpe den Kraftverlauf innerhalb des Modellschalungssystems – bestehend aus Hydraulikpumpen-Zylindereinheit, Stahlrahmen und Schalung – bis hin zur Kraftübertragung auf den Schalungsinhalt. Aus der Vorderansicht des Modellschalungssystems in Bild B-2 oben rechts ist zu erkennen, dass die Breite des Stahlrahmens für beliebige Wanddicken ausreichend dimensioniert ist. In Bild B-2 unten rechts ist eine Seitenansicht des Modellschalungssystems dargestellt. An der abgebildeten Schalhaut sind die einzelnen Druckmessdosen angebracht.

In Bild B-3 ist abschließend eine Detailansicht der Umsetzung der Auflasteinrichtung zur Simulation von Einbauhöhen, die die Schalungshöhe überschreiten, dargestellt.



Bild B-3: Detailansicht der Auflasteinrichtung (bestehend aus Stahlrahmen, Hydraulikpresse, Druckmessdose, Kantholz und Stahlhilfskonstruktion) zur Einbauhöhensimulation [B-6]

Ohne aufwendige Modifizierungen konnten mittels des in den Bildern B-2 und B-3 dargestellten Modellschalungssystems die nachfolgenden, für den Einbauvorgang relevanten Einflussparameter variiert werden:

- Einbauhöhe
- Einbaugeschwindigkeit

<u>Messeinrichtung</u>

Für eine detaillierte Untersuchung des Schalungsdrucks der betrachteten Betone wurden im Rahmen des Versuchsprogramms die nachfolgenden Messgrößen sowohl bei tatsächlichen als auch bei simulierten Einbauhöhen registriert:

- Schalungsdruck
- Frischbetontemperatur

Eine eingehende Beschreibung der verwendeten Druckmessdosen (DMD) und Temperaturfühler ist [B-6] zu entnehmen. Die Platzierung und Bezeichnung (DMD 0 bis 2) der einzelnen Druckmessdosen ist aus Bild B-1 ersichtlich. Der Temperaturfühler zur Messung der Frischbetontemperatur war auf der Messhöhe der DMD 0 (Messhöhe 0,14 m) positioniert.

Großversuche

Neben der Durchführung von Simulationsversuchen werden weitere Informationen für eine Verifizierung der gewonnenen Erkenntnisse benötigt. Dies gilt insbesondere für den Druckverlauf über die Schalungshöhe sowie im Zusammenhang mit den Verarbeitungseigenschaften des Betons für die Größenordnung des maximalen relativen hydrostatischen Schalungsdrucks, s. [B-6].

Rahmenschalung

Die Voraussetzung für eine wirklichkeitsnahe Wiedergabe des Schalungsdruckverhaltens war, dass die Ausführung der experimentellen Untersuchungen unter baupraktischen Bedingungen auch ohne eine weitere Simulation verschiedener Einbauhöhen erfolgen konnte, s. Bild B-4.



Bild B-4: Ansicht, Querschnitt (Schnitt A-A) und Längsschnitt (Schnitt B-B) der verwendeten Rahmenschalung [B-6]; alle Abmessungen in [cm]

Auf dieser Grundlage waren die nachfolgenden Kriterien für die Auswahl der eingesetzten Schalung von Bedeutung:

- in der Baupraxis vielseitig zu verwendende Schalungskonstruktion
- einfache und schnelle Montierbarkeit
- baupraktisch häufig verwendete Schalungshöhe
- Größenordnung der geometrischen Abmessung ausreichend für die Anordnung verschiedener Messpunkte

Bis auf die Schalungsgeometrie werden die o.g. Anforderungen grundsätzlich von einer Systemschalung erfüllt. Von daher fiel die Entscheidung zugunsten der bereits von [B-6] verwendeten Rahmenschalung (Bild B-4). Durch eine angemessene Wahl der Schalelementabmessungen konnte auch den geometrischen Anforderungen entsprochen werden.

Wie aus Bild B-5 (links und rechts) zu ersehen ist, wurden zur Verbindung der einzelnen Rahmenschalungselemente miteinander vier Außenecken benötigt. Diese konnten mit jeweils drei über die Elementhöhe gleichmäßig verteilten Stahlschlössern befestigt werden, s. [B-6].





Bild B-5: Vorderansicht (links) und Seitenansicht (rechts) des verwendeten Rahmenschalungssystems [B-6]

Aufgrund der Höhe der verwendeten Rahmenschalung sowie aus Gründen der Arbeitssicherheit und der Arbeitserleichterung wurde die Schalungskonstruktion in einer Versuchsrinne aufgestellt, welche mit einem Schutzgeländer gesichert wurde.

<u>Messtechnik</u>

Im Rahmen der Großversuche wurde der Schalungsdruck der untersuchten Betone erfasst. Die verwendeten Druckmessdosen entsprachen denen der Simulationsversuche und sind in [B-6] ausführlich beschrieben. Die Platzierung und Bezeichnung (DMD 0 bis 7) der einzelnen Druckmessdosen ist in Bild B-4 dargestellt.

B.3.3 Versuchsdurchführung

Der Schalungsdruck der untersuchten Betone wurde sowohl während des Einbauvorgangs als auch nach dessen Beendigung aufgezeichnet. Externe Umwelteinflüsse ließen sich durch den Aufbau der Versuchseinrichtung in einer geschlossenen Halle ausschließen. Vor der Schalungsbefüllung erfolgte das Mischen des Betons in einem Betonmischer des Typs "EMS 1000-D" der Fa. ELBA, s. Bild B-6. Um im Zuge der Schalungsdruckuntersuchungen nicht auf eine einzige Höhe beschränkt zu sein, wurden in den Modellschalungsversuchen weitere Einbauhöhen nach Beendigung des Betoneinbaus simuliert.



Bild B-6: Verwendeter Einwellentrogmischer "EMS 1000-D" der Fa. ELBA

Die nachfolgenden Abschnitte befassen sich mit den wesentlichen Aspekten der Umsetzung des Versuchsprogramms.

Betonzusammensetzung

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden drei Betone verwendet. Nach Möglichkeit sollte die Zusammensetzung auf den gleichen Ausgangsstoffen beruhen.

Ausgangsstoffe

Zement

Als Bindemittel wurde der Portlandzement CEM I 32,5 R (nach DIN E 197-1 [B-10]) der Fa. WOTAN verwendet. Um den Einfluss der Erstarrungsgeschwindigkeit und damit der Wärmeentwicklung auf den Schalungsdruck untersuchen zu können, wurde die Herstellung von Normalbeton durch den Einsatz weiterer Zementarten modifiziert. Die Wahl fiel auf einen Hochofenzement CEM III/A 32,5 N (nach DIN EN 197-4 [B-11]) der Fa. WOTAN mit einer geringen Anfangsfestigkeit.

Silicastaub

Der Silicastaub wurde der Mischung in reiner Form zugegeben. Dabei wurde der Silicastaub vom Typ "940 U" der Fa. ELKEM gewählt.

Flugasche

Je nach der gegebenen Mischungszusammensetzung wurde bei einigen Proben Steinkohlenflugasche vom Typ "Safament" der Fa. SAFA eingesetzt. Die verwendete Flugasche erfüllte sowohl die Anforderungen nach DIN 1045 [B-8] als auch nach DIN EN 450 [B-12].

Fließmittel

Um die geforderten Eigenschaften und damit die gewünschte Verarbeitbarkeit zu erzielen, wurde ein Fließmittel vom Typ "Addiment FM 34" der Fa. SIKA verwendet. Bei der Herstellung von Betonen mit Hochofenzement CEM III wurde aufgrund der dabei auftretenden Verzögerung des Erstarrungsprozesses ein Fließmittel mit langanhaltender Wirkung vom Typ "Addiment FM 40" der Fa. SIKA verarbeitet. Die Praxistauglichkeit beider Fließmittel war durch ihre Zulassung nach DIN V 18998 [B-13] bzw. DIN EN 934-2 [B-14] gewährleistet.

Gesteinskörnungen

Die verwendeten Gesteinskörnungen wurden von der Fa. EKQW EIFELER KALKSANDSTEIN- UND QUARZWERKE bezogen. Dabei handelte es sich bei den Korngruppen 4/8 mm und 8/16 mm um gewaschenen Quarzkies. Die Korngruppe 0/4 mm setzte sich aus gewaschenem Quarzsand zusammen.

<u>Betonrezeptur</u>

Eine einheitliche Vorgabe für die Rezepturentwicklung aller Betone war die Beschränkung auf eine einzige Sieblinie. Diese ist [B-6] zu entnehmen.

Teilprojekt A erarbeiteten Hinsichtlich der in Richtrezepturen spielte die Betonzusammensetzung lediglich eine untergeordnete Rolle. Primäres Kriterium war die Erfüllung der festgelegten Kennwerte bezüglich des Setzfließ- bzw. Ausbreitmaßes sowie der Trichterauslaufzeit. Insofern war zu ihrer Sicherstellung eine Modifizierung der Richtrezepturen erlaubt. Daher wurde im Rahmen des hier beschriebenen Teilprojektes B auf eine erprobte Rezeptur zurückgegriffen, welche die geforderten Frischbetoneigenschaften gewährleistete, s. [B-6].

Eine Zusammenstellung der einzelnen Betonrezepturen ist in Tabelle B-3 gegeben. Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale waren die Verarbeitbarkeit sowie die Festigkeitsentwicklung der Betone. Im Vergleich zu den Betonen mit Zement als alleinigem Bindemittel zeichneten sich die Betone mit zusätzlichem Flugascheanteil durch ihre selbstverdichtenden Eigenschaften aus. Entsprechend konnten die Betone in zwei Kategorien eingeteilt werden:

- 1) Betone ohne Flugascheanteil als konventioneller Normalbeton mit den Bezeichnungen NB-F5 und NB-F6
- 2) Betone mit einer Flugaschekomponente als selbstverdichtender Beton auch SVB genannt

Eine Abänderung der Festigkeitsentwicklung wurde durch die Verwendung verschiedener Zementarten erreicht. Gegenüber den Betonen mit dem Portlandzement CEM I 32,5 R (NB-F6 und SVB) konnte eine langsamere Festigkeitsentwicklung durch den Einsatz eines Hochofenzements CEM III/A 32,5 N (NB-F5) erreicht werden.

| Beton | Bind [kg | emittel g/m ³] | Gesteinskörnung [kg/m ³] | | Fließmittel | Wasser | |
|-------|-------------|-------------------------------|---|--------|-------------|----------------------|----------------------|
| | Zement | Flugasche | 0/4 mm | 4/8 mm | 8/16 mm | [kg/m ⁺] | [kg/m [*]] |
| NB-F5 | 350 | — | 868 | 406 | 573 | 1,2 | 175 |
| NB-F6 | 356 | - | 866 | 406 | 571 | 2 | 175 |
| SVB | 350 | 200 | 862 | 338 | 417 | 4,2 | 175 |

 Tabelle B-3:
 Zusammensetzung der verwendeten Betone

Betoneigenschaften

Für den Werkstoff Beton ist hinsichtlich seiner Materialeigenschaften grundsätzlich zwischen den Frischbetoneigenschaften sowie den Festbetoneigenschaften zu unterscheiden. In Bezug auf die Werkstoffeigenschaften war in erster Linie die Verarbeitbarkeit von Interesse.

Die Ermittlung der Eigenschaften des Normalbetons (NB-F5 und NB-F6) wurde nach DIN 1048 [B-15] durchgeführt. Die dabei bestimmten Materialkennwerte waren:

- Konsistenzmaß
- Luftporengehalt
- Rohdichte

Nach den Vorgaben der DAfStb-Richtlinie [B-16] wurden die Eigenschaften des selbstverdichtenden Betons SVB bestimmt. Dabei wurden ebenfalls die oben bereits aufgeführten Kennwerte ermittelt.

Sowohl für die fließfähigen Normalbetone als auch für den selbstverdichtenden Beton wurden die Erstarrungszeiten nach dem Knetbeutelverfahren [B-17] ermittelt.

Die Prüfung der Materialkennwerte der Betone erfolgte gemäß DIN 1048 [B-15] bzw. [B-18]. Dazu wurden zeitgleich mit der Durchführung der o. g. Prüfungen Probewürfel mit der Kantenabmessung 150 mm hergestellt. Nach Erreichen eines Probealters von 28 Tagen wurde anschließend ihre Druckfestigkeit erfasst. Die zeitliche Konsistenzentwicklung der untersuchten Betone ist in Tabelle B-A1 zusammengefasst.

Eigenschaften der Normalbetone

In Tabelle B-4 sind die Kennwerte der Normalbetone zusammengestellt. Daraus ist zu erkennen, dass die mittleren Druckfestigkeiten der Betone nicht weit voneinander abwichen und diese als normalfeste Betone ausgebildet waren.

| | F | rischbetonkenn | Festbetonkennwerte | |
|-------|----------|-------------------------------------|------------------------|---|
| Beton | w/z-Wert | Rohdichte ρ [kg/m ³] | Luftporen LP [Vol%] | Druckfestigkeit β_{w28} an Würfeln [N/mm ²] |
| NB-F5 | 0,50 | 2372 | 1,6 | 55,9 |
| NB-F6 | 0,49 | 2369 | 1,3 | 54,7 |

Tabelle B-4: Kennwerte der verwendeten Normalbetone

Eigenschaften des selbstverdichtenden Betons

Eine Übersicht der Materialkennwerte des selbstverdichtenden Betons ist in Tabelle B-5 zu finden.

 Tabelle B-5:
 Kennwerte des verwendeten selbstverdichtenden Betons

| | | Frischbeto | nkennwerte | | Festbetonkennwerte |
|-------|----------|--|---------------------------|---|--|
| Beton | w/z-Wert | Rohdichte ρ [kg/m ³] | Luftporen LP [Vol%] | Auslaufzeit Trichter t _{tr} [s] | Druckfestigkeit β _{w28} an Würfeln [N/mm ²] |
| SVB | 0,5 | 2342 | 2,1 | 7,4 | 65,7 |

<u>Erstarrungszeiten</u>

Die Erstarrungszeiten der untersuchten Betone wurden nach dem Knetbeutelverfahren [B-17] untersucht. Tabelle B-6 fasst die dabei ermittelten Werte zusammen.

| Beton | Erstarrungszeit t _E [h] |
|-------|------------------------------------|
| NB-F5 | 4,6 |
| NB-F6 | 4,8 |
| SVB | 5,5 |

Tabelle B-6: Erstarrungszeiten der untersuchten Beton

Herstellung und Einbau der fließfähigen Betone

Die Herstellung und der Einbau der fließfähigen Betone erfolgten unter Berücksichtigung des verwendeten Einwellentrogmischers bzw. der benötigten Einbaumenge nach dem Prinzip der in [B-6] vorgestellten Vorgehensweise.

Simulation von über die Schalungshöhe hinausgehenden Einbauhöhen mit dem Modellschalungssystem

Die Simulation der über die Schalungshöhe hinausgehenden Einbauhöhen bei den experimentellen Untersuchungen mit dem Modellschalungssystem entsprach dem von [B-6] entwickelten Verfahren.

Umgebungstemperatur

Die Messung der Umgebungstemperaturen ergab Werte in einem Bereich von 19,6 °C bis 22,2 °C.

Sonstige Randbedingungen

Die Dokumentation weiterer Randbedingungen ist in Tabelle B-A2 enthalten. Darin sind Angaben über die Fallhöhe der untersuchten Betone, die Schalungsendverformung, den eingesetzten Mischertyp, die verwendete Schalhaut und die Verdichtungsart zusammengefasst.

B.4 Ergebnisse

Im Zuge der nachstehenden Parameterstudie der experimentellen Ergebnisse werden diverse Einflüsse auf das Schalungsdruckverhalten von fließfähigem Beton diskutiert. Primäres Ziel der experimentellen Untersuchungen war die Bestimmung elementarer Einflussgrößen, deren Einbau in die Formulierung eines Bemessungsmodells als empfehlenswert erachtet wird. Darüber hinaus sind die aus der experimentellen Parameterstudie gewonnenen Erkenntnisse für die Erstellung baupraktischer Empfehlungen von unmittelbarem Nutzen.

Obwohl die Fließgrenze und die thixotropen Eigenschaften des Betons nach [B-6] den signifikantesten Einfluss auf den Schalungsdruck ausüben, waren entsprechend der Aufteilung der Aufgabenstellungen der einzelnen Teilprojekte rheologische Untersuchungen nicht Gegenstand von Teilprojekt Β. Der Einfluss der Frischbetonrheologie auf den Schalungsdruck wurde vielmehr in Teilprojekt A bearbeitet.

Die nachfolgende Ergebnisanalyse bestätigt die in [B-6] vorgestellten Erkenntnisse.

B.4.1 Einfluss der Einbaugeschwindigkeit

Die Untersuchungen zum Einfluss der Einbaugeschwindigkeit wurden unter konstanten Umgebungsbedingungen mit zwei Fließbetonen NB-F5 und NB-F6 sowie einem selbstverdichtenden Beton SVB ausgeführt. Die im Rahmen der Simulationsversuche eingehaltenen Einbaugeschwindigkeiten betrugen für den Beton NB-F5 3,5 m/h und 14 m/h sowie 3,5 m/h, 7 m/h und 14 m/h für den Beton SVB. Für die Großversuche waren die gewählten Einbaugeschwindigkeiten für den Beton NB-F5 14 m/h, für den Beton NB-F6 7 m/h und 28 m/h sowie für den selbstverdichtenden Beton SVB 7 m/h, 14 m/h und 28 m/h. Grundlage für die Wahl der untersuchten Einbaugeschwindigkeiten waren neben den neuesten Erkenntnissen über die Abhängigkeit des Betonschalungsdrucks fließfähiger Betone von der Fließgrenze bzw. der Thixotropie (s. [B-1], [B-6] und [B-19]) auch die Anforderungen aus der Baubetriebstechnik und wirtschaftliche Aspekte. So sind z. B. in Abhängigkeit von den rheologischen Eigenschaften des Betons auch bei Einbaugeschwindigkeiten > 7 m/h Schalungsdrücke möglich, die z. T. deutlich unter den hydrostatischen Verhältnissen liegen. Die Ergebnisse bestätigen die in [B-6] ermittelten Werte.

Bild B-7 zeigt exemplarisch die typischen Verläufe der (im Zuge der Simulationsversuche) an der Druckmessdose DMD 1 registrierten σ_{mess} -v-Beziehungen bei verschiedenen Einbauhöhen. Dabei muss beachtet werden, dass bei einem Vergleich verschiedener Einbaugeschwindigkeiten eine bestimmte Einbauhöhe immer zu unterschiedlichen Einbauzeiten erreicht wird. Die bei über die effektive Schalungshöhe (h = 1,50 m) hinausgehenden Einbauhöhen (in Bild B-7 h = 3 m und h = 6 m) aufgezeichneten Drücke konnten durch die Verwendung der von [B-6] entwickelten Simulationsvorrichtung initiiert werden. Entsprechend dem Kurvenvergleich gilt für den selbstverdichtenden Beton SVB, dass der Einfluss der Einbaugeschwindigkeit mit wachsender Einbauhöhe zunimmt. Zur Verdeutlichung dieser Erkenntnis sind die experimentellen Ergebnisse aller weiteren Versuche (bei den Einbauhöhen h = 1 m, 3 m und 6 m) zusätzlich in tabellarischer Form in Tabelle B-A3 (Simulationsversuche) und Tabelle B-A4 (Großversuche) zusammengestellt. Demnach zeigt sich eine verstärkte Abhängigkeit des Schalungsdrucks von der Einbaugeschwindigkeit innerhalb der Bereiche zwischen 3,5 m/h und 14 m/h (bei NB-F5) bzw. 3,5 m/h und 7 m/h (bei SVB): Wird die Einbaugeschwindigkeit des Betons SVB z. B. von 3,5 m/h auf 7 m/h erhöht, so wächst bei einer Einbauhöhe h = 1 m der Schalungsdruck um $\Delta\sigma_{mess} = 0,44 \text{ kN/m}^2 (\triangleq 7 \%)$ an. Beträgt in diesem Zusammenhang jedoch die Einbauhöhe h = 6 m, ergibt sich der Druckzuwachs hingegen zu $\Delta\sigma_{mess} = 61,88 \text{ kN/m}^2$ ($\triangleq 112 \%$), s. Bild B-7.



Bild B-7: Einfluss der Einbaugeschwindigkeit im Rahmen der Simulationsversuche auf den Schalungsdruck von selbstverdichtendem Beton SVB bei unterschiedlichen Einbauhöhen

Zudem ist aus den Simulationsexperimenten mit selbstverdichtendem Beton SVB zu erkennen, dass die Einbaugeschwindigkeit ab Werten von 7 m/h keine signifikante Bedeutung auf den Schalungsdruck ausübt. Das Versuchsprogramm für die übrigen Experimente lässt die eindeutige Ableitung dieses Zusammenhangs nicht zu. Da es sich bei der Einbaugeschwindigkeit jedoch um einen primär mechanischen Einfluss handelt, erscheint eine derartige Abhängigkeit auch für die weiteren Versuche schlüssig.

Eine allgemeingültige Aussage über den Einfluss der Einbaugeschwindigkeit auf das Schalungsdruckverhalten von sowohl Normalbeton als auch selbstverdichtenden Beton kann nach der im Rahmen des DAfStb-Sachstandsberichts [B-2] durchgeführten Literatursichtung nicht getroffen werden. Gleichwohl sind die vorgestellten Ergebnisse übereinstimmend mit den in KHAYAT & OMRAN [B-20] beschriebenen Feststellungen.

Innerhalb einer bestimmten Einbauzeit führen auch geringe Einbaugeschwindigkeiten zu längeren Zeitabschnitten, innerhalb derer der Beton einen höheren Scherwiderstand ausbilden kann und damit zu verringerten Schalungsdrücken führt. Dieser Effekt erweist sich umso ausgeprägter, je mehr das Ansteifen des Betons durch hohe Einbaugeschwindigkeiten innerhalb des Einbauzeitraums verhindert wird [B-20].

Eine detaillierte Gegenüberstellung der zum Erreichen einer Einbauhöhe h = 6 m nach Tabelle B-A3 (Simulationsversuche) und Tabelle B-A4 (Großversuche) erforderlichen Einbauzeiten zeigt, dass mit $\Delta t = 0,85$ h zwischen den Einbaugeschwindigkeiten 3,5 m/h und 7 m/h die größte Differenz auftritt. Dieser Wert verringert sich bei einem Vergleich der Einbaugeschwindigkeiten 7 m/h und 14 m/h schon auf 0,43 h. Innerhalb des erstgenannten Zeitraums kommt es infolgedessen zu einer weitaus signifikanteren Veränderung der rheologischen Betoneigenschaften als bei den übrigen Zeitdifferenzen.

Unter Einbeziehung der Schalungsgeometrie bei der Bewertung der experimentellen Ergebnisse ist zu beobachten, dass bei einer Einbaugeschwindigkeit von 3,5 m/h kein kontinuierlicher Einbauhöhenanstieg ermöglicht werden konnte. Erst ab v = 7 m/h war dies gewährleistet, was als eine weitere Ursache für die oben dargestellten Ergebnisse gewertet werden kann.

Der Verlauf der σ_{mess} -v-Beziehungen darf indessen nicht einzig aus dem reinen Materialverhalten abgeleitet werden, sondern ergibt sich teilweise auch aus einem mechanischen Phänomen. Bisher wurde als vertikale Auflast auf den in die Schalung eingebauten Beton alleine das Betoneigengewicht angesetzt. Durch die Impulsgleichung (s. [B-1] bzw. [B-6]) ist diese allerdings tatsächlich erhöht.

Während des Betoneinbaus erfährt der bereits in die Schalung eingebaute Beton aufgrund der Impulswirkung, zusätzlich zu der Auflast des über ihm noch einzubringenden Betons, eine weitere Auflast. Der Einfluss des Einbauimpulses kann aus der Spannung der Impulsauflast $\sigma_{imp} = \rho \cdot v^2$ bestimmt werden. Jedoch ist die Wirkungsweise aufgrund des Verdichtungsvorgangs für den Einbau von Normalbeton entsprechend verändert [B-1], [B-6].

B.4.2 Einfluss der Schalungsgeometrie

Der Schalungsdruckverlauf über die Schalungshöhe und -breite wurde durch die Aufstellung von Schalungsdruck-Einbauhöhenbeziehungen analysiert. Die Ergebnisse entsprachen den von [B-6] ermittelten Erkenntnissen. In Bild B-8 sind exemplarisch für die Einbauhöhen h = 3 m bzw. 6 m die im Rahmen der Simulationsversuche bei einer Einbaugeschwindigkeit von 14 m/h erfassten σ_{mess} -h-Werte (für einen fließfähigen Normalbeton NB-F5 sowie einen selbstverdichtenden Beton SVB) dargestellt. Erwartungsgemäß liegen für beide betrachteten Betone die σ_{mess} -h-Kurven bei geringen Einbauhöhen unter denen größerer Einbauhöhen. Die Schalungsdruck-Einbauhöhenbeziehungen der übrigen Versuche wiesen eine ähnliche Charakteristik auf. Die Unterschiede – im unteren Bereich auf einer Messhöhe von h = 0.14 m bzw. 0.75 m – zwischen den (bei den betrachteten Einbauhöhen) gemessenen Maximaldrücken einer Messhöhe fielen aufgrund der unterschiedlichen Fließgrenzen-Zeitbeziehungen und der verwendeten Einbaugeschwindigkeiten verstärkt oder vermindert aus.



Bild B-8: Einfluss der Einbaugeschwindigkeit im Rahmen der Simulationsversuche auf den Schalungsdruck der Betone NB-F5 und SVB (Einbaugeschwindigkeit v = 14 m/h)

Die experimentell ermittelten Messwerte sind für die Simulations- und Großversuche (mit B-A6 zugehörigen Standardabweichungen) in den Tabellen B-A5. den (Simulationsversuche) und B-A7 (Großversuche) zusammengefasst. Dabei wird die Druckmessdose DMD 2 vernachlässigt, da eine mögliche Beeinträchtigung durch die Stahlkonstruktion im Rahmen der Einbausimulation nicht herausfilterbar war. Für die Simulationsversuche und damit nach Bild **B-8** nimmt bei gleichen Einbaugeschwindigkeiten die Differenz des Schalungsdrucks eines fließfähigen Normalbetons (hier NB-F5) gegenüber den Werten des selbstverdichtenden Betons SVB mit anwachsender Einbauhöhe zu. Sind für eine Einbauhöhe von drei Metern die Schalungsdruckverläufe der beiden Betone noch annähernd gleich, so sind bei einer Höhe von sechs Metern schon größere Abweichungen der h-omess-Beziehungen festzustellen. Die jeweils auftretende Differenz ist abhängig von den rheologischen Eigenschaften der Betone.

Für den selbstverdichtenden Beton SVB (v = 14 m/h) ist nach Bild B-8 die vertikale Schalungsdruckcharakteristik sowohl bei einer Höhe h = 3 m als auch bei h = 6 m annähernd linear. Innerhalb der zum Erreichen von h = 3 m benötigten Einbauzeit von ca. 13 Minuten waren die Thixotropie bzw. die Fließgrenzenentwicklung des untersuchten Betons noch nicht stark genug ausgeprägt, um der auftretenden Vertikallast entgegenzuwirken. Die Charakteristik des Schalungsdruckverlaufs bei Verwendung eines Zements CEM III/A 32,5 N und damit des Betons NB-F5 entspricht bis zu einer Einbauhöhe von drei Metern der des Betons SVB. Jedoch ist bei einer Einbauhöhe von sechs Metern auf der Messhöhe h = 0,75 m ein Knick zu verzeichnen (s. Bild B-8), was dazu führt, dass die Schalungsdrücke der Höhe h = 0,14 m geringfügig unter denen der Höhe h = 0,75 m liegen. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen kann zusätzlich zu den thixotropen Eigenschaften das Hydratationsverhalten der Betone liefern. Dies kann zu einer Veränderung der innerhalb des Betons ablaufenden chemischen Prozesse führen, s. [B-6]. Die gleichen Phänomene führen zu der Schalungsdruckcharakteristik der Betone, welche mit einer Geschwindigkeit von 3,5 m/h eingebaut wurden, s. Tabellen B-A5 und B-A6.

zusammengestellten Standardabweichungen Anhand der in Tabelle B-A7 der Großversuche ist zu erkennen, dass die Schalungsbreite erwartungsgemäß keinen signifikanten Einfluss auf den Schalungsdruck ausübt, s. [B-6]. Ferner zeigen die in Tabelle B-A5 dargestellten Ergebnisse der Großversuche, dass das Schalungsdruckverhalten Beton sehr mit dem verwendeten von gut Modellschalungssystem (s. [B-6]) untersucht werden kann. Darüber hinaus konnte für eine Einbauhöhe von h = 3 m bestätigt werden, dass der Schalungsdruck der untersuchten fließfähigen Betone einen annähernd horizontalen Verlauf aufweist.

B.4.3 Einfluss der Frischbetontemperatur

Im Rahmen der experimentellen Simulationsuntersuchungen wurde auf der Messpunkthöhe DMD 1 (h = 0.75 m) die Betontemperatur aufgezeichnet. Dies ermöglichte den Erhalt weiterer Informationen bezüglich ihres Einflusses auf den Schalungsdruck. Die dabei gewonnenen Ergebnisse entsprachen den in [B-6] ermittelten Werten.

Bild B-9 zeigt exemplarisch sowohl die typischen Verläufe der Betontemperatur-Zeitbeziehungen (Bild B-9 unten) als auch die gleichzeitig auftretenden Schalungsdrücke (Bild B-9 oben). Dabei handelt es sich um die (auf einer Messhöhe h = 0,75 m) gemessene Temperatur der Betone NB-F5 und SVB sowie die an der Druckmessdose DMD 1 aufgetretenen Schalungsdrücke. Der Betrachtungszeitraum wurde von Versuchsbeginn bis Erstarrungsende gewählt. Die dargestellten Ergebnisse wurden bei Versuchen mit einer Einbaugeschwindigkeit von 14 m/h aufgezeichnet.

Die Temperatur der beiden untersuchten Betone (Bild B-9 unten) bleibt innerhalb des betrachteten Zeitraums annähernd konstant. Während zu Einbaubeginn eine Temperatur von 22,55 °C (NB-F5) bzw. 23,22 °C (SVB) vorliegt, beträgt ihr Wert nach sechs Stunden 24,12 °C (NB-F5) bzw. 25,25 °C (SVB).

Der Schalungsdruck beider Betone (Bild B-9 oben) nimmt hingegen während des Einbauvorgangs kontinuierlich zu. Er erreicht sein Maximum jeweils nach einer Zeit von t = 0,43 h. Dabei betragen die Schalungsdrücke für den NB-F5 95,25 kN/m² sowie 115,87 kN/m² für den SVB. Ab dem Zeitpunkt des Einbauendes kommt es für beide Betone zu einem Schalungsdruckabfall. Dieser ist für die fließfähigen Betone unterschiedlich stark ausgeprägt, was hauptsächlich in den thixotropen Eigenschaften als auch dem Hydratationsverhalten der Betone begründet ist, s. [B-6]. Die Schalungsdrücke

betragen nach einer Zeit von sechs Stunden für den fließfähigen Beton NB-F5 45,75 kN/m² sowie 111,34 kN/m² für den SVB. Wie bereits von [B-6] beobachtet wurde, ist davon auszugehen, dass mit keiner absoluten Aufhebung des Schalungsdrucks zu rechnen ist.



Bild B-9: Einfluss der Betontemperatur (unten) auf den zeitlichen Verlauf des Schalungsdrucks (oben) in den Simulationsversuchen der Betone NB-F5 und SVB bei einer Einbaugeschwindigkeit von v = 14 m/h

Das Phänomen des "eingeprägten Schalungsdrucks" steht im auffälligen Widerspruch zu einem Großteil der bisher existierenden Theorien zur Beschreibung des Schalungsdrucks von Beton, s. [B-21]. Dabei wird zumeist davon ausgegangen, dass der Seitendruckbeiwert λ und damit zwangsläufig der Schalungsdruck zum Erstarrungsende hin den Wert Null bzw. annähernd diesen Wert annimmt. Dies resultiert daraus, dass die den entsprechenden Modellen zugrunde liegenden Untersuchungen nicht über einen ausreichend langen Zeitraum ausgeführt wurden und so fälschlicherweise eine vollkommene Aufhebung des Schalungsdrucks angenommen wird.

aktuellen Fachliteratur liegen jedoch derzeit auch In der einige wenige Vergleichsmessungen - wie z. B. die von [B-22] - über einen ausgedehnten Betrachtungszeitraum vor. Bezüglich des Grades der Schalungsdruckabnahme ist in Bild B-9 (oben) eine merkliche Differenz zwischen den Betonen NB-F5 und SVB zu erkennen. Dies bestätigten die in [B-22] zusammengestellten Erkenntnisse. Danach wirken innerhalb des Hydratationszeitraums sowohl physikalische als auch chemische Prozesse. Aus physikalischer Sicht führt mit fortschreitendem Hydratationsvorgang die zunehmende Restrukturierung der Festpartikel zu einem Anstieg der inneren Reibung und damit zu einer Umkehrung der thixotropen Eigenschaften der Betone. Die chemischen Phänomene werden durch die sich bildenden Hydratationsprodukte und die damit verbundene Wasserabsorption hervorgerufen. Dies führt zu einer unmittelbaren Verknüpfung dieses Effekts mit den Auswirkungen der Bindemittelart, des Bindemittelgehalts sowie des Fließmittelanteils. Infolgedessen kommt es zu einem vergleichsweise größeren Druckabfall bei vermindertem Fließmittelgehalt [B-22].

Da das schalungskonstruktive Verhalten einer belasteten Schalung dem eines Bettungsmoduls entspricht, muss die durch die Hydratationswärme hervorgerufene Betondehnung im Zusammenhang mit der Schalungsdurchbiegung als eine weitere Einflussgröße für den Schalungsdruckabbau angesehen werden, s. [B-1] bzw. [B-6]. Für eine praxisgerechte Umsetzung eignet sich in diesem Zusammenhang die Ermittlung eines Bettungsmoduls $k = \sigma/f$ (mit der Schalungsdurchbiegung f). Aufgrund der verhältnismäßig geringen Schalungsverformungen sowie der Vielzahl der Einflussparameter auf den Bettungsmodul k ist eine derartige Betrachtung vollends ausreichend und liefert realitätsnahe sowie sehr gute Ergebnisse [B-1]. Gleichzeitig muss bedacht werden, dass z. B. das Schrumpfen oder Schwinden des Betons infolge zusätzlicher chemischer Vorgänge im Rahmen der experimentellen Untersuchungen nicht explizit messbar sind. Eine eindeutige Quantifizierung der einzelnen Parameter ist aufgrund ihrer Komplexität nicht durchgeführt worden.

Der Zusammenhang zwischen Schalungsdruck und Frischbetontemperatur der weiteren Simulationsversuche ist für den o. g. Betrachtungszeitraum von Versuchsbeginn bis Erstarrungsende in den Bildern B-A1 bis B-A2 dargestellt. Des Weiteren wurden innerhalb des genannten Zeitraums auch die mittleren Schalungsdruckverläufe der einzelnen Messhöhen (h = 0,16 m, 0,50 m, 1,16 m, 1,82 m und 2,48 m) im Rahmen der Großversuche messtechnisch erfasst. Diese können den Bildern B-A3 bis B-A8 entnommen werden.

B.5 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Im Rahmen der experimentellen Simulations- und Großuntersuchungen wurde ein umfassendes Versuchsprogramm zur Ermittlung wesentlicher Einflüsse auf den Schalungsdruck fließfähiger Betone durchgeführt. Wissenschaftliches Fundament des im Rahmen des Forschungsvorhabens herzuleitenden Bemessungsmodells bildeten die dabei gewonnenen Untersuchungsergebnisse. Um eine umfangreiche Verwertung der Messergebnisse zu ermöglichen, ist eine Parameterstudie durchgeführt worden. Aus den umfangreichen Untersuchungen der Betone konnten fundierte Kenntnisse über die Wirkungsweise der nachfolgenden Einflussgrößen erlangt werden:

- Einbaugeschwindigkeit
- Schalungsgeometrie
- Frischbetontemperatur (Simulationsversuche)

Darüber hinaus wurden im Rahmen der experimentellen Untersuchungen die Parameter Konsistenz und Schalungsendverformung (Simulationsversuche) ermittelt.

Im Zuge der umfassenden experimentellen Schalungsdruckuntersuchungen wurde ein neuartiges Modellschalungssystem zur Simulierung von Einbauhöhen eingesetzt, s. [B-6]. Anhand dieses Modellschalungssystems konnten sowohl tatsächliche als auch simulierte Auflastzustände ausgewertet werden. Die dabei verwendete Trägerschalung hatte die Abmessungen 1 x b x d = 1,50 m x 2,00 m x 0,25 m. Die untersuchte maximale Einbauhöhe betrug sechs Meter. Mit dem aufgestellten Versuchsprogramm wurde das Schalungsdruckverhalten zweier fließfähiger Normalbetone (NB-F5 und NB-F6) und eines selbstverdichtenden Betons (SVB) studiert. Die Einbaugeschwindigkeiten betrugen dabei 3,5 m/h (NB-F5 und SVB), 7 m/h (SVB) sowie 14 m/h (NB-F5 und SVB).

Die Großversuche wurden mit einer Rahmenschalung ausgeführt. Sie ermöglichten eine Überprüfung der mit dem Modellschalungssystem durchgeführten Simulationsversuche. Die Schalungsabmessungen betrugen l x b x d = 3,00 m x 1,25 m x 0,25 m. Entsprechend den Simulationsversuchen wurde ebenfalls das Schalungsdruckverhalten der Betone NB-F5, NB-F6 und SVB studiert. Die Betone wurden mit den Geschwindigkeiten 7 m/h (NB-F6 und SVB), 14 m/h (NB-F5 und SVB) sowie 28 m/h (NB-F6 und SVB) in die Schalung eingebaut.

Bei einer Betrachtung des Einflusses der Einbaugeschwindigkeit auf den Schalungsdruck war ein signifikanter Unterschied in einem Bereich zwischen 3,5 m/h und 7 m/h festzustellen. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass bei einer Einbaugeschwindigkeit v = 3.5 m/h aufgrund der gegebenen Schalungsgeometrie kein Einbauhöhenanstieg kontinuierlicher möglich war. So wurde für geringe Einbaugeschwindigkeiten bei der durch den pro Zeiteinheit eingebauten Beton keine signifikante Vertikalbelastung auf den in der Schalung befindlichen Beton ausgeübt. Des wurde bestätigt, Weiteren dass geringe Einbaugeschwindigkeiten zu langen Zeitabschnitten führen, innerhalb derer der Beton aufgrund eines entsprechenden Strukturaufbaus einen hohen Scherwiderstand ausbilden kann und sich folglich geringere Schalungsdrücke einstellen. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass mangels Strukturaufbau ein Anstieg der Fließgrenze des Betons durch hohe Geschwindigkeiten innerhalb des Einbauzeitraums verhindert wird. Indessen darf der Verlauf der σ_{mess} -v-Beziehungen nicht einzig aus dem reinen stoffphysikalischen Verhalten abgeleitet werden. Zusätzlich müssen mechanische Phänomene berücksichtigt werden, welche z. B. in Form des Impulses während des Einbauvorgangs zu einer zusätzlichen Belastung des in der Schalung befindlichen Betons führen können.

Hinsichtlich des Einflusses der Schalungsgeometrie ergab sich aus den Großversuchen keine Beeinträchtigung der Breite auf den auftretenden Frischbetondruck. Grundsätzlich nahm der Schalungsdruck eines jeden Betons im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erwartungsgemäß mit ansteigender Einbauhöhe zu. Jedoch konnte bezüglich des vertikalen Schalungsdruckverlaufs zwischen zwei Charakteristiken unterschieden werden. Diese ergaben sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Höhe aus einem Zusammenspiel der rheologischen Betoneigenschaften mit der verwendeten Einbaugeschwindigkeit sowie evtl. des Hydratationsverhaltens. Bei niederthixotropen Betonen oder hohen Einbaugeschwindigkeiten ergibt sich zumeist ein vertikal linearer Schalungsdruckverlauf. Hingegen ist bei Betonen mit einem höheren Thixotropiegrad bzw. reduzierter Einbaugeschwindigkeit teilweise ein Knick in dem Kurvenverlauf zu verzeichnen.

Für den Zeitraum von Einbaubeginn bis Erstarrungsende ergab sich keine unmittelbare Beeinflussung des Schalungsdrucks durch die Frischbetontemperatur.

In Bezug auf die zeitliche Analyse des Schalungsdrucks fließfähiger Betone war festzustellen, dass bis zur Beendigung des Einbauvorgangs der Schalungsdruck kontinuierlich ansteigt. Ab Einbauende ist ein Schalungsdruckabfall zu verzeichnen, welcher unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Dies wird in erster Linie sowohl durch die thixotropen Eigenschaften als auch durch das Hydratationsverhalten der Betone verursacht. Niederthixotrope Betone neigen zu einem langsameren Druckabbau als höher thixotrope. Dies ist in der zeitlichen Entwicklung der Fließgrenze der Betone begründet. Gleichzeitig wirken innerhalb des Hydratationsvorgangs sowohl chemische als auch physikalische Prozesse, welche den Schalungsdruck der fließfähigen Betone ebenfalls maßgeblich beeinflussen.

Hinsichtlich der Bewertung der wesentlichen Einflüsse auf den maßgebenden Frischbetondruck ist in erster Linie die Thixotropie zu nennen. Das Erstarrungsverhalten des Betons spielt dabei eher eine untergeordnete Rolle.

Die Entwicklung eines Modellschalungssystems war im Zuge des Forschungsprojektes nicht notwendig. Dieses geschah bereits zuvor in einem gesonderten Forschungsvorhaben. Diesbezüglich bestand somit bei Beginn des Forschungsvorhabens kein Forschungsbedarf.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte der in dem DAfStb-Sachstandsbericht [B-2] angegebene Forschungsbedarf teilweise gedeckt werden. Jedoch konnten infolge der zur

Verfügung stehenden Möglichkeiten noch nicht alle diesbezüglich offenen Fragen beantwortet werden. Daraus ergeben sich nachfolgend die weiterhin offenen Fragestellungen:

- Beschreibung des Schalungsdruckverhaltens von Normalbetonen mit verminderter Fließfähigkeit
- Frischbetondruckverhalten bei dem Einsatz geneigter Schalungen
- Zusammenhang der Einbautechnologie (Verdichtungsvorgang, Unterbrechungen des Arbeitsvorgangs, Einbauart etc.) mit dem Schalungsdruck von Beton
- Abhängigkeit der Mischungszusammensetzung, der Konsitenzklasse und der Frischbetonrheologie auf den Schalungsdruck
- Beeinflussung weiterer zeitabhängiger Frischbetonkennwerte (innerer Reibungswinkel, Schalungsreibung, Bewehrungsreibung etc.)
- Frischbetonschalungsdruck in Abhängigkeit von dem Porenwasserdruck
- Entwicklung neuer Methoden zur messtechnischen Erfassung von Schalungsverformungen
- Ausführung statistischer Auswertungen bezüglich der Streuungsbereiche des Frischbetondrucks
- Analyse wirtschaftlicher Optimierungspotenziale hinsichtlich des Schalungsdrucks von Beton

Wie oben bereits gezeigt wurde, konnte anhand der durchgeführten experimentellen Untersuchungen wesentliche Aspekte des Schalungsdruckverhaltens fließfähiger Betone geklärt werden, was eine weitere Erforschung dieser Thematik wesentlich vereinfacht.

B.6 Literaturverzeichnis

- [B-1] Beitzel, M.: Neue Erkenntnisse zum Frischbetondruckverhalten. Kurzbericht, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Baustofftechnologie, Karlsruhe 2006.
- [B-2] Graubner, C. A.; Beitzel, H.; Beitzel, M.; Brameshuber, W.; Brunner, M. et al.: DAfStb-Sachstandsbericht – Frischbetondruck fließfähiger Betone. DAfStb Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [B-3] DIN Deutsches Institut für Normung: DIN 18218 Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen. Ausgabe 1980-09, Beuth Verlag, Berlin, 1980.
- [B-4] CIB-CEB-FIB: Manual de Technologie, Coffrage. 1977.
- [B-5] CIRIA Construction Industry Research and Information Association: CIRIA-Report Nr. 108: Concrete pressure on formwork. London, 1985.
- [B-6] Beitzel, M.: Schalungsdruckverhalten von Beton unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften. Dissertation, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe (TH), in Vorbereitung.
- [B-7] DIN Deutsches Institut f
 ür Normung: DIN EN 206-1 Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformit
 ät. Ausgabe 2001-07, Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [B-8] DIN Deutsches Institut f
 ür Normung: DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformit
 ät – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Ausgabe 2001-07, Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [B-9] Gehbauer, F.: Baubetriebstechnik I. Institut für Maschinenwesen im Baubetrieb, Universität Karlsruhe (TH), Reihe V, Heft 16, Karlsruhe, 2000.
- [B-10] DIN Deutsches Institut f
 ür Normung: DIN EN 197-1 Zement Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformit
 ätskriterien von Normalzement. Ausgabe 2004-08, Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [B-11] DIN Deutsches Institut f
 ür Normung: DIN EN 197-4 Zement Teil 4: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Hochofenzement mit niedriger Anfangsfestigkeit. Ausgabe 2004-08, Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [B-12] DIN Deutsches Institut f
 ür Normung: DIN 450-1 Flugasche f
 ür Beton Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformit
 ätskriterien. Ausgabe 2005, Beuth Verlag, Berlin, 2005.
- [B-13] DIN Deutsches Institut f
 ür Normung: DIN V 18998 Beurteilung des Korrosionsverhaltens von Zusatzmitteln nach Normenreihe DIN EN 934. Ausgabe 2002-11, Beuth Verlag, Berlin, 2002.
- [B-14] DIN Deutsches Institut f
 ür Normung: DIN EN 934-2 Zusatzmittel f
 ür Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 2: Betonzusatzmittel; Definitionen und Anforderungen, Konformit
 ät, Kennzeichnung und Beschriftung. Ausgabe 2001, Beuth Verlag, Berlin, 2002.
- [B-15] DIN Deutsches Institut f
 ür Normung: DIN 1048-1 Pr
 üfverfahren von Beton Teil 1: Frischbeton. Ausgabe 1991-06, Beuth Verlag, Berlin, 1991.

"Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz" Teilprojekt B – Institut für Bauverfahrens- und Umwelttechnik, Trier Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie

- [B-16] DAfStb Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (DAfStb-Richtlinie). Ausgabe 2003-11, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [B-17] DIN Deutsches Institut für Normung: DIN 18218 Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen. Ausgabe 2008-01, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [B-18] DIN Deutsches Institut f
 ür Normung: DIN 1048-2 Pr
 üfverfahren von Beton Teil 2: Festbeton in Bauteilen und Bauwerken. Ausgabe 1991-06, Beuth Verlag, Berlin, 1991.
- [B-19] Ovarlez, G.; Roussel, N.: A physikal model for the predictions of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork. Materials and Structures, Vol. 39, No. 2, J. Marchand (Hrsg.), Springer Netherlands, Dordrecht, 2006.
- [B-20] Khayat, K. H.; Omran, A.: SCC Formwork Pressure Phase II State of the Art Review of Formwork Pressure Exerted by Self-Compacting Concrete. The National Ready-Mix Concrete Research Foundation and The Strategic Development Council, American Concrete Institute, Sherbrooke, 2007.
- [B-21] Khayat, K. H. et al.: SCC Formwork Pressure Phase I State of the Art Review of Formwork Pressure Exerted by Self-Compacting Concrete. The National Ready-Mix Concrete Research Foundation and The Strategic Development Council, American Concrete Institute, Sherbrooke, 2007.
- [B-22] Assad, J.; Khayat, K.: Kinetics of Formwork Pressure Drop of SCC Containing Various Types and Contents of Binder. Cement and Concrete Research, Vol. 35, Elsevier, Amsterdam, 2005.

B.7 Danksagung

Das vorgestellte Forschungsvorhaben wurde im Rahmen der Forschungsinitiative "Zukunft Bau" des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) gefördert. Für die Ermöglichung des Projektes bedanken wir uns herzlich sowohl bei dem Projektträger BBR als auch bei dem Bundesministerium BMVBS.

Ebenfalls gilt der Fa. ELBA ein herzliches Dankeschön für die Überlassung des Betonmischers.

Die einzelnen Betonkomponenten wurden uns von den Firmen WOTAN (Zement), ELKEM (Silicastaub), SAFA (Flugasche), SIKA (Fließmittel) und EKQW EIFELER KALKSANDSTEIN-UND QUARZWERKE (Gesteinskörnung) zur Verfügung gestellt, wofür wir gleichfalls herzlich danken möchten.

Ein letztes aber nicht minder herzliches Dankeschön gilt der Fa. WESTAG & GETALIT, welche uns mit Schalhäuten ausgestattet hat.

25. November 2008, Trier/Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. H. Beitzel

Prof. Dr.-Ing. H. S. Müller

B.8 Anlagen

| Beton | Schalung | Einbau- geschwindigkeit | Frischbe | tonkonsiste | enz a bzw. s | sm [cm] |
|--------------|-------------|----------------------------|----------|-------------|--------------|---------|
| | | v [m/h] | 0 min | 30 min | 60 min | 90 min |
| | Modellash | 3,5 | 58 | 55 | 54 | 50 |
| NB-F5 | wodensch. | 14 | 58 | 61 | 56 | 52 |
| | Rahmensch. | 14 | 58 | 54 | 52 | 49 |
| NB-F6 Rahmen | Dohmonooh | 7 | 66 | 70 | 66 | 61 |
| | Kannnensch. | 28 | 70 | 67 | 64 | 61 |
| | | 3,5 | 72 | 70 | 64 | 62 |
| | Modellsch. | 7 | 72 | 70 | 66 | 63 |
| SVB - | | 14 | 74 | 71 | 68 | 64 |
| | | 7 | 73 | 70 | 73 | 67 |
| | Rahmensch. | 14 | 74 | 75 | 71 | 66 |
| | | 28 | 72 | 70 | 70 | 66 |

Tabelle B-A1: Zeitliche Frischbetonkonsistenzentwicklung der untersuchten Betone

Tabelle B-A2: Sonstige Randbedingungen

| Fallhöhe [m] | ca. 1,60 m | |
|----------------------------------|-----------------------|--|
| Schalungsendverformung [mm] | max. 3,02 mm | |
| Mischertyp | Einwellentrogmischer | |
| Schalhauttyp Simulationsversuche | Sperrholz | |
| Schalhauttyp Großversuche | Polypropylen | |
| Verdichtungsart | Innenvibrator, 200 Hz | |

Tabelle B-A3: Einfluss der Einbaugeschwindigkeit auf den Schalungsdruck der
untersuchten Betone an der Druckmessdose DMD 1
(Simulationsversuche)

| Beton | Einbau- geschwindigkeit v [m] | Einbauhöhe h [m] | Einbauzeit t [h] | $\frac{\sigma_{mess}}{[kN/m^2]}$ |
|--------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|
| | | 1 | 0,29 | 4,99 |
| | 3,5 | 3 | 0,86 | 47,89 |
| ND E5 | | 6 | 1,71 | 72,37 |
| ND-1'J | | 1 | 0,07 | 11,22 |
| | 14 | 3 | 0,21 | 48,12 |
| | | 6 | 0,43 | 95,25 |
| | | 1 | 0,29 | 6,51 |
| | 3,5 | 3 | 0,86 | 34,12 |
| | | 6 | 1,71 | 92,33 |
| | | 1 | 0,14 | 6,95 |
| SVB | 7 | 3 | 0,43 | 54,54 |
| | | 6 | 0,86 | 114,21 |
| | | 1 | 0,07 | 7,03 |
| | 14 | 3 | 0,21 | 55,55 |
| | | 6 | 0,43 | 115,87 |

Tabelle B-A4: Einfluss der Einbaugeschwindigkeit auf den Schalungsdruck der
untersuchten Betone an der Druckmessdose DMD 1
(Rahmenschalung, Einbauhöhe h = 3 m)

| Beton | Einbau- geschwindigkeit v [m] | Einbauzeit t [h] | Schalungsdruck σ_{mess} [kN/m ²] |
|-------|-------------------------------------|---------------------|--|
| NB-F5 | 14 | 0,21 | 52,66 |
| NB-F6 | 7 | 0,43 | 53,12 |
| | 28 | 0,11 | 55,87 |
| | 7 | 0,43 | 53,72 |
| SVB | 14 | 0,21 | 52,55 |
| | 28 | 0,11 | 50,97 |

| Tabelle B-A5: | Vertikale | Schalungsdruckverteilung | bei | einer | Einbauhöhe | h | = . | 3 m |
|---------------|------------|--------------------------|-----|-------|------------|---|-----|-----|
| | (Simulatio | onsversuche) | | | | | | |

| Beton | Einbauge- | Schalungsdruck σ_{mess} [kN/m ²] | | | | |
|-------|-----------|---|------------|--|--|--|
| | v [m/h] | h = 0,14 m | h = 0,75 m | | | |
| NB-F5 | 3,5 | 38,22 | 47,89 | | | |
| | 14 | 56,27 | 48,12 | | | |
| SVB | 3,5 | 32,38 | 34,12 | | | |
| | 7 | 63,28 | 54,54 | | | |
| | 14 | 65,57 | 55,55 | | | |

| Tabelle B-A6: | Vertikale | Schalungsdruckverteilung | bei | einer | Einbauhöhe | h | = 6 | m |
|-----------------------|-----------|--------------------------|-----|-------|------------|---|-----|---|
| (Simulationsversuche) | | | | | | | | |

| Beton | Einbauge- | Schalungsdruck σ_{mess} [kN/m ²] | | | |
|-------|-----------|---|------------|--|--|
| | v [m/h] | h = 0,14 m | h = 0,75 m | | |
| NB-F5 | 3,5 | 59,55 | 72,37 | | |
| | 14 | 85,11 | 95,25 | | |
| SVB | 3,5 | 46,77 | 92,33 | | |
| | 7 | 129,95 | 114,21 | | |
| | 14 | 122,59 | 115,87 | | |

| Tabelle B-A7: | Mittlerer vertikaler Schalungsdruckverlauf der fließfähigen Betone in |
|---------------|---|
| | einer Rahmenschalung (h = 3 m) mit den Standardabweichungen für |
| | die Messhöhen 1,16 m, 1,82 m und 2,48 m (Großversuche) |

| Beton | Einbau- geschwindigkeit v | Schalungsdruck σ _{mess} [kN/m ²] Mittelwert (Standardabweichung) | | | | | | |
|-------|---------------------------------|---|----------|-----------------|-----------------|-----------------|--|--|
| | [m/h] | Messhöhe h [m] | | | | | | |
| | | h = 0,16 | h = 0,50 | h = 1,16 | h = 1,82 | h = 2,48 | | |
| NB-F5 | 14 | 60,23 | 53,12 | 38,82 (0,47) | 25,88 (0,49) | 11,05 (0,22) | | |
| NB-F6 | 7 | 61,99 | 52,66 | 40,78 (0,53) | 26,25 (0,10) | 10,55 (0,22) | | |
| | 28 | 64,35 | 55,87 | 43,07 (0,34) | 26,78 (0,17) | 10,93 (0,33) | | |
| SVB | 7 | 61,75 | 53,72 | 38,98 (0,26) | 26,23 (0,53) | 9,75 (0,04) | | |
| | 14 | 59,58 | 52,55 | 40,23 (0,48) | 24,37 (0,23) | 11,76 (0,34) | | |
| | 28 | 61,76 | 50,97 | 40,94 (0,45) | 20,46 (0,27) | 6,00 (0,18) | | |

"Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz" Teilprojekt B – Institut für Bauverfahrens- und Umwelttechnik, Trier

Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie



Bild B-A1:Einfluss der Betontemperatur (unten) auf den zeitlichen Verlauf des
Schalungsdrucks (oben) in den Simulationsversuchen der Betone
NB-F5 und SVB bei einer Einbaugeschwindigkeit von v = 3,5 m/h



Bild B-A2:Einfluss der Betontemperatur (unten) auf den zeitlichen Verlauf des
Schalungsdrucks (oben) in den Simulationsversuchen des Betons
SVB bei einer Einbaugeschwindigkeit von v = 7 m/h



Bild B-A3:Zeitlicher Verlauf des mittleren Schalungsdrucks der Messhöhen
h = 0,16 m, 0,50 m, 1,16 m, 1,82 m und 2,48 m in den Großversuchen
des Betons NB-F5 bei einer Einbaugeschwindigkeit von v = 14 m/h



Bild B-A4:Zeitlicher Verlauf des mittleren Schalungsdrucks der Messhöhen
h = 0,16 m, 0,50 m, 1,16 m, 1,82 m und 2,48 m in den Großversuchen
des Betons NB-F6 bei einer Einbaugeschwindigkeit von v = 7 m/h



Bild B-A5:Zeitlicher Verlauf des mittleren Schalungsdrucks der Messhöhen
h = 0,16 m, 0,50 m, 1,16 m, 1,82 m und 2,48 m in den Großversuchen
des Betons NB-F6 bei einer Einbaugeschwindigkeit von v = 28 m/h



Bild B-A6:Zeitlicher Verlauf des mittleren Schalungsdrucks der Messhöhen
h = 0,16 m, 0,50 m, 1,16 m, 1,82 m und 2,48 m in den Großversuchen
des Betons SVB bei einer Einbaugeschwindigkeit von v = 7 m/h

"Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz" Teilprojekt B – Institut für Bauverfahrens- und Umwelttechnik, Trier

Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie



Bild B-A7: Zeitlicher Verlauf des mittleren Schalungsdrucks der Messhöhen h = 0,16 m, 0,50 m, 1,16 m, 1,82 m und 2,48 m in den Großversuchen des Betons SVB bei einer Einbaugeschwindigkeit von v = 14 m/h



Bild B-A8: Zeitlicher Verlauf des mittleren Schalungsdrucks der Messhöhen h = 0,16 m, 0,50 m, 1,16 m, 1,82 m und 2,48 m in den Großversuchen des Betons SVB bei einer Einbaugeschwindigkeit von v = 28 m/h
Teilprojekt C

Materialversuche zur Reibung und zum Verformungsverhalten von frischem Beton sowie Entwicklung eines analytischen Modells zur Bestimmung der Schalungsbelastung

von

Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner Dr.-Ing. T. Proske Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau

Inhaltsverzeichnis Schlussbericht Teilprojekt C

| C.1 | Einleitung | C-3 |
|------------|---|-------------|
| C.1. | .1 Problemstellung zum Teilprojekt C | C-3 |
| C.1. | .2 Zielsetzung des Teilprojektes C | C-3 |
| C.2 | Ausgangsbasis und Grundlagen für Teilprojekt C | C -4 |
| C.2. | .1 Reibung von Frischbeton | C-4 |
| C.2. | .2 Modellvorstellungen zur Berechnung des Frischbetondrucks | C-6 |
| C.2. | .3 E DIN 18218:2008-01: Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen C | -11 |
| C.3 | Durchgeführte ArbeitenC | -14 |
| C.3. | .1 AllgemeinesC | -14 |
| C.3. | .2 Verwendete BetoneC | -15 |
| C.3. | .3 Überblick Untersuchungsprogramm (experimentelle Untersuchungen) C | -17 |
| C.3. | .4 VersuchseinrichtungC | -19 |
| C | .3.4.1 Untersuchungen zum Seitendruck und zur Reibung C | -19 |
| C | .3.4.2 KompressionsversuchC | -26 |
| C | .3.4.3 Oberflächensetzung C | -28 |
| C.3. | .5 Versuchsdurchführung C | -29 |
| C.4 | Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen (Teil C1)C | -30 |
| C.4. | .1 Frischbetoneigenschaften und ErstarrungszeitenC | -30 |
| C.4. | .2 SeitendruckversucheC | -34 |
| C.4. | .3 ReibungsversucheC | -40 |
| C.4. | .4 Verformungsverhalten des Frischbetons C | -49 |
| C | .4.4.1 Kompressionsversuche | -49 |
| C | .4.4.2 Oberflächensetzung C | -52 |
| C.5 | Modellbildung (Teil C2)C | -53 |
| C.5. | .1 ModellentwicklungC | -53 |
| C.5. | .2 Berechnungsansatz unter Berücksichtigung der Silotheorie C | -59 |
| C.5. | .3 Berechnungsvorschlag und Kalibrierung der Sicherheitselemente C | -62 |
| C.5. | .4 Vergleich des Berechnungsvorschlags mit dem Berechnungsansatz nach | |
| Silo | otheorieC | -68 |
| C.5. | .5 Vergleich des Berechnungsvorschlags mit E DIN 18218:2008-01C | -69 |
| C.6 | Zusammenfassung und weiterer ForschungsbedarfC | -71 |
| C.7 | LiteraturverzeichnisC | -73 |
| C.8 | DanksagungC | -75 |
| C.9 | AnlagenC | -76 |

C.1 Einleitung

C.1.1 Problemstellung zum Teilprojekt C

vorhandenen Modellansätzen verschiedenen bereits zur Berechnung In des Frischbetondrucks wird der Reibungswiderstand zwischen der Schalungswand und des Frischbetons als wichtiger Einflussparameter angesehen. Die Kenntnis dieses Parameters um eine wirklichkeitsnahe ist daher zwingend notwendig, Berechnung der Schalungsbelastung durchführen zu können. In diesem Zusammenhang ist auch der Einfluss des Widerstandes zwischen dem Frischbeton und der Bewehrung von großem Interesse.

Da es sich bei der Bemessung der Schalung um ein nichtlineares und statisch unbestimmtes Problem handelt, muss zur wirklichkeitsnahen Berechnung die Interaktion des Systems Frischbeton/Schalung berücksichtigt werden. Hierfür sind Untersuchungen zum Verformungsverhalten des Frischbetons und dessen Auswirkungen auf den horizontalen Frischbetondruck unerlässlich. Als entscheidende, bisher jedoch nur unzureichend untersuchte Einflussgrößen müssen in diesem Zusammenhang mögliche Vibrationen und Erschütterungen Berücksichtigung finden.

C.1.2 Zielsetzung des Teilprojektes C

Das Teilprojekt C gliedert sich in die zwei Abschnitte C1 Untersuchung von Materialparametern und C2 Modellbildung.

Das Ziel des ersten Abschnitts ist die Bestimmung von Materialparametern, um sowohl eine analytische als auch in einem späteren Schritt numerische Berechnung der Schalungsbelastung infolge des Frischbetondrucks zu ermöglichen. Insbesondere soll die Reibung zwischen dem Frischbeton und der Schalung sowie der Reibungswiderstand zwischen dem Frischbeton und der Bewehrung analysiert werden. Des Weiteren sollten Erkenntnisse zum Einfluss der Verformungsfähigkeit und des inneren Reibungswiderstandes des Frischbetons auf den Frischbetondruck gewonnen werden.

Ziel des Abschnitts Modellbildung ist die Erarbeitung eines praxisorientierten analytischen den der Frischbetondrucks Modells mit auf lotrechte Schalungen möglichst wirklichkeitsnah berechnet werden kann. Zu dessen Realisierung sind die Untersuchungsergebnisse aller Forschungsstellen einzubeziehen. In diesem Zusammenhang sollen auch die im Entwurf DIN 18218:2008-01 "Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen" enthaltenen Berechnungsansätze für Betone mit fließfähiger Konsistenz verifiziert werden.

C.2 Ausgangsbasis und Grundlagen für Teilprojekt C

C.2.1 Reibung von Frischbeton

Bei der Reibung des Frischbetons ist zwischen innerer und äußerer Reibung zu differenzieren. Die innere Reibung des Frischbetons ist gleichzusetzen mit dem Scherwiderstand des Frischbetongefüges. Dieser wird unter anderem durch die Reibung zwischen den Feststoffpartikeln des Betons hervorgerufen. Als äußere Reibung kann der Scherwiderstand im Bereich der Kontaktzone Frischbeton und angrenzender Oberfläche (Schalung) angesehen werden.

Systematische Untersuchungen zur Reibung des Frischbetons liegen für fließfähigen Beton bisher nicht vor. Die Reibung zwischen Schalungsoberflächen und konventionellen Rüttelbetonen (Konsistenzklasse F1 bis F4) wurde dagegen bereits in verschiedenen Untersuchungen analysiert [C-1]. Ebenfalls veröffentlicht sind Ergebnisse zum Reibungswinkel φ von Rüttelbeton [C-2].

Hinsichtlich der inneren Reibung Selbstverdichtender Betone liegen umfangreiche Messungen mittels Rheometer vor, z. B. von Billberg [C-5]. Jedoch wird in diesen Untersuchungen der Einfluss eines erhöhten Normalspannungszustandes (wie er in einer Schalung vorliegt) in keiner Weise berücksichtigt. Der wichtige Parameter Reibungswinkel φ kann daher aus diesen Ergebnissen nicht abgeleitet werden. Messungen zur Interaktion zwischen Frischbeton und Schalung bei fließfähigen Betonen wurden beispielsweise von Djelal [C-3] und Vanhove [C-4] publiziert. Die hier vorgestellten Reibungsversuche vernachlässigen jedoch das zeitlich veränderliche Materialverhalten des Frischbetons.

Untersuchungen zur Reibung bei selbstverdichtendem Beton wurden unter anderem am Institut für Massivbau der TU Darmstadt durchgeführt [C-6], [C-16]. Mittels einer extra entwickelten Versuchsapparatur wurde sowohl die Reibung zwischen dem Frischbeton und der Schalungsoberfläche als auch der Reibungswiderstand zwischen dem Frischbeton und der Bewehrung bestimmt (vgl. Bild C-1). Die Untersuchungen wurden vom Zeitpunkt kurz nach Mischungsfertigstellung bis hin zum Erstarrungsende des Betons t_E durchgeführt.

Bild C-1 zeigt die Entwicklung des Reibungswiderstandes in Abhängigkeit des Versuchszeitpunktes bzw. des Betonalters, wobei die auf das Erstarrungsende des Betons t_E bezogene Zeit herangezogen wurde. Der Reibungswiderstand wird dabei durch den Reibungsbeiwert μ bei einer Vertikalbelastung von ca. 90 kN/m² charakterisiert. Es zeigt sich, dass in sehr frühem Betonalter nur eine sehr geringe Reibung zwischen der Schalung und dem Beton vorliegt, diese jedoch mit zunehmender Zeit t/t_E deutlich ansteigt. Allerdings fällt dieser Anstieg bei der reinen Oberflächenreibung Frischbeton/Schalung bis zum Zeitpunkt $t/t_E = 0,4$ sehr moderat aus. Demgegenüber wurde zwischen Bewehrung und dem Frischbeton bereits ab $t/t_E = 0,2$ ein sehr hoher mechanischer Widerstand festgestellt (vgl. Bild C-1).



Bild C-1: Experimentell ermittelte Reibungsbeiwerte an Selbstverdichtenden Betonen in Abhängigkeit der auf das Erstarrungsende bezogenen Zeit nach [C-16]

Neben dem Reibungsbeiwert μ wurde der Winkel der inneren Reibung φ über das Verhältnis von Horizontalspannungen zu Vertikalspannungen λ ermittelt (vgl. Bild C-2). Unter Verwendung der aus der Bodenmechanik bekannten Zusammenhänge und unter der Annahme einer ausreichenden Horizontalverformung der Schalung (aktiver Druck) ist die Berechnung des Winkels der inneren Reibung φ möglich. Es zeigt sich ein Anstieg des inneren Reibungswiderstandes mit zunehmender Zeit t/t_E .



Bild C-2: Reibungswinkel ϕ_{ges} sowie maximal möglicher Reibungsbeiwert μ_{max} von SVB in Abhängigkeit der auf das Erstarrungsende bezogenen Zeit nach [C-16]

C.2.2 Modellvorstellungen zur Berechnung des Frischbetondrucks

Ein allgemein anerkanntes Berechnungsverfahren zur wirklichkeitsnahen Bestimmung des Frischbetondrucks bei Verwendung fließfähiger Rüttelbetone existiert bisher noch nicht. Bereits vorhandene Modelle (die vom hydrostatischen Verhalten abweichen) gelten lediglich für lotrechte Schalungen. Oft berücksichtigen diese Modelle explizit nur wenige Randbedingungen und liegen damit weit auf der sicheren Seite [C-7]. Teilweise erfolgte eine Rückrechnung der Materialparameter durch einen Vergleich der Rechenwerte mit Bauteilmessungen, z. B. in [C-9], was jedoch nicht als zielführend angesehen wird. Für Modelle, welche zur Berechnung geeigneter erscheinen, fehlen gesicherte Eingansparameter für fließfähige Betone, wie z. B. der Reibungsbeiwert und der Seitendruckbeiwert [C-8].

Bild C-3 zeigt den möglichen Verlauf des Seitendruckbeiwertes λ , des Reibungsbeiwertes μ und des horizontalen und vertikalen Frischbetondrucks σ_h bzw. σ_v über die Schalungshöhe entsprechend einer für SVB abgeleiteten Modellvorstellung auf Grundlage der Silotheorie nach [C-6]. Nach dieser Theorie reduziert sich der Vertikal- und Horizontaldruck im Siloschaft infolge der Schubspannung τ_w zwischen dem Schüttgut (Beton) und der Behälterwand (Schalung).



Bild C-3: Möglicher Verlauf des Seitendruckbeiwertes λ, des Reibungsbeiwertes μ und des horizontalen und vertikalen Frischbetondrucks entsprechend der Modellvorstellung nach [C-6]

Ausgangspunkt für die Berechnung nach der Silotheorie ist das Kräftegleichgewicht am Scheibenelement mit infiniter Höhe (vgl. Bild C-4 und (C-1)).



Bild C-4: Gleichgewicht der Kräfte im Silo- bzw. Schalungsschaft [C-16]

$$A \cdot \sigma_{v} + \gamma_{c} \cdot A \cdot dh = A \cdot (\sigma_{v} + d\sigma_{v}) + \tau_{w} \cdot U \cdot dh$$
(C-1)

Die Veränderung der Füllhöhe dh kann über die Betoniergeschwindigkeit v sowie die Betonierdauer t ausgedrückt werden:

$$dh = dt \cdot v \tag{C-2}$$

Nach Einführung des zeitabhängigen Materialparameters $\mu(t)$ zur Beschreibung der Reibung zwischen Frischbeton und der vertikalen Stützfläche sowie des Kennwertes $\lambda(t)$ zur Darstellung des zeitabhängigen Zusammenhangs zwischen Vertikalspannung und Horizontalspannung [vgl. Gleichungen (C-3) und (C-4)] und Umformung der Gleichung (C-1) ergibt sich für die Vertikalspannung σ_{ν} eine lineare inhomogene Differentialgleichung 1. Ordnung nach Gleichung (C-5).

$$\tau_w = \sigma_h \cdot \mu(t) \tag{C-3}$$

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot \lambda(t) \tag{C-4}$$

$$\frac{d\sigma_{v}}{dt} + \sigma_{v} \cdot \lambda(t) \cdot \mu(t) \cdot \frac{U}{A} \cdot v = \gamma_{c} \cdot v$$
(C-5)

Der in Gleichung (C-6) und (C-7) dargestellte Lösungsansatz nach Lagrange führt zur Bestimmungsgleichung (C-8), welche den vertikalen Frischbetondruck in Abhängigkeit der Betonierzeit t angibt.

$$y' + p(x) \cdot y = s(x) \tag{C-6}$$

$$y = e^{-\int p(x) dx} \cdot \left(\int s \cdot e^{\int p(x) dt} \cdot dx + C \right)$$
(C-7)

$$\sigma_{v}(t) = \frac{\gamma_{c} \cdot v \cdot \int_{e}^{t} e^{v \cdot \frac{U}{A} \int \lambda(t) \cdot \mu(t) \cdot dt} \cdot dt + \sigma_{v0}}{e^{v \cdot \frac{U}{A} \int_{0}^{t} \lambda(t) \cdot \mu(t) \cdot dt}}$$
(C-8)

Der Wert σ_{v0} beschreibt eine Randspannung an der Betonoberfläche (h = 0). In der Regel gilt $\sigma_{v0} = 0$. Gegebenenfalls ist mit σ_{v0} die Simulation einer zusätzlichen Auflast, z. B. infolge des Einfüllprozesses, möglich. Der horizontale Frischbetondruck errechnet sich durch Umformung der Gleichung (C-4) mit Gleichung (C-9).

$$\sigma_{h}(t) = \sigma_{v}(t) \cdot \lambda(t) = \frac{\gamma_{c} \cdot v \cdot \int_{0}^{t} e^{v \cdot \frac{U}{A} \int \lambda(t) \cdot \mu(t) \cdot dt} \cdot dt + \sigma_{v0}}{e^{v \cdot \frac{U}{A} \int_{0}^{t} \lambda(t) \cdot \mu(t) \cdot dt}} \cdot \lambda(t)$$
(C-9)

Die in Bild C-3 dargestellte Abnahme des Horizontaldrucks nach Überschreiten des Maximalwertes $\sigma_{h,max}$ bis zum Erstarrungsende ist nur dann möglich, wenn die im Beton vorhandene Vorspannung durch Frühschwinden oder Schalungsverformung (z. B. Kriechen der Schalung) abgebaut werden kann. In der Praxis bildet sich ein Gleichgewichtszustand zwischen Verformung und Lasteinwirkung aus, wobei die Horizontalspannung von der Steifigkeit der Schalung beeinflusst wird.

Entscheidend für die Genauigkeit der Frischbetondruckberechnung ist die Wahl der Modell-Materialparameter Seitendruckbeiwert $\lambda(t)$ und Reibungsbeiwert $\mu(t)$. Vorschläge für den Ansatz dieser Modellparameter bei Verwendung von Selbstverdichtenden Beton werden in [C-16] unterbreitet. Als 95%-Quantilwert von $\lambda(t)$ bei duktiler bzw. nachgebender Schalung unter Berücksichtigung von gewissen Erschütterungen wird für den Bereich $0 \le t/t_{E,eff} \le 1$ angegeben:

$$\lambda_1(t) = 1 - \left(1, 1 \cdot \frac{t}{t_{E,eff}}\right)^{2,3} \tag{C-10}$$

Hierbei ist das effektive Erstarrungsende $t_{E,eff}$ das Erstarrungsende des Betons t_E nach DIN EN 480-2:2006-11 (Vicat) abzüglich des Zeitraums zwischen Mischungsfertigstellung und Einbaubeginn Δt .

Die 5%-Quantilwerte von $\mu(t)$ ohne Bewehrung, mit lediglich sehr geringen Erschütterungen, werden im Bereich $0 \le t/t_{E,eff} \le 1$ angegeben mit:

$$\mu_{1}(t) = -0.143 \cdot \frac{t}{t_{E,eff}} + 2.30 \cdot \left(\frac{t}{t_{E,eff}}\right)^{2} - 11.4 \cdot \left(\frac{t}{t_{E,eff}}\right)^{3} + 24.4 \cdot \left(\frac{t}{t_{E,eff}}\right)^{4} - 21.9 \cdot \left(\frac{t}{t_{E,eff}}\right)^{5} + 7.0 \cdot \left(\frac{t}{t_{E,eff}}\right)^{6}$$
(C-11)

Die 5%-Quantilwerte von $\mu(t)$ bei Bauteilen mit einer Horizontalbewehrung und einem Bewehrungsabstand von mindestens $s_h = 12,5$ cm bei keinen bis geringen Erschütterungen im Bereich $0 \le t/t_{E,eff} \le 0,5$ werden angesetzt mit:

$$\mu_2(t) = 1.5 \cdot \left(\frac{t}{t_{E,eff}}\right)^3 \le 0.2 \tag{C-12}$$

Für die Integrale der Gleichung (C-9) können unter Verwendung der vorgeschlagenen Beziehungen für $\mu(t)$ und $\lambda(t)$ keine geschlossenen Lösungen aufgestellt werden. Damit ist zur Berechnung der Druckzustände eine numerische Integration erforderlich.

Die unter diesen Annahmen ermittelten möglichen Maximalwerte des Frischbetondrucks von SVB sind in Bild C-5 zusammengestellt. Es zeigt sich, dass der maximal mögliche Frischbetondruck (unabhängig von der Schalungshöhe) bei Zunahme von Betoniergeschwindigkeit und Erstarrungsende ansteigt. Höhere Bewehrungsgehalte und geringere Schalungsbreiten vermindern den Frischbetondruck. Hinsichtlich der Druckverteilung bei lotrechten Schalungen wird empfohlen, sich prinzipiell am Vorgehen nach DIN 18218:1980-09 zu orientieren.

Eine Berechnung des Frischbetondrucks von Rüttelbeton auf geneigte Schalungen (nicht Gegenstand dieses Vorhabens) ist bisher lediglich für Betone der Konsistenzklasse F1 bis F4 möglich. Untersuchungen hierzu liegen von Specht [C-1] vor. Allerdings wird hier zeitlich unveränderliches Materialverhalten vorausgesetzt. Für fließfähige Betone ergäbe sich bei Verwendung dieses Modells stets annähernd hydrostatisches Verhalten. Um wirklichkeitsnahe Ergebnisse erzielen zu können, ist daher eine Berücksichtigung des zeitlich veränderlichen Materialverhaltens zwingend. Zielführend ist insbesondere eine numerische Berechnung mit Hilfe der FE-Methode auf Grundlage entsprechender

Materialgesetze. Vorschläge zur Berechnung des Frischbetondrucks auf geneigte Schalungen bei Verwendung von SVB wurden bereits in [C-16] unterbreitet.



Bild C-5: Rechnerischer maximaler Frischbetondruck $\sigma_{h,max}$ in Abhängigkeit der Steiggeschwindigkeit *v*, dem effektiven Erstarrungsende $t_{E,eff}$ und der Schalungsbreite *b* für stark bewehrte und unbewehrte bzw. gering bewehrte Bauteile aus SVB nach [C-16]

Hinsichtlich der Sicherheit und Zuverlässigkeit von Schalungssystemen liegen nur sehr wenige Untersuchungen vor [C-10], [C-16]. Bei der Bemessung von Schalung und Rüstung für Rüttelbeton nach dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept wird in [C-11] ein Teilsicherheitsbeiwert auf den Frischbetondruck nach DIN 18218:1980-09 von $\gamma_F = 1,5$ vorgeschlagen. In [C-16] werden Vorschläge für Teilsicherheitsbeiwerte zur Berechnung des Frischbetondrucks bei SVB im ULS und SLS unterbreitet. Unterschieden wird erstmals zwischen günstig und ungünstig wirkenden Einwirkungen.

C.2.3 E DIN 18218:2008-01: Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen

Der Normenentwurf E DIN 18218:2008-01 "Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen" beinhaltet erstmals Berechnungsvorschläge zur Schalungsbelastung bei Verwendung von Betonen mit fließfähiger Konsistenz. Die enthaltenen vereinfachten Berechungsansätze für die Konsistenzklassen F5, F6 und SVB (entsprechend DIN EN 206-1:2001-07) wurden auf Grundlage des Sachstandsberichtes [C-8] im DIN-Normenausschuss NA 005-07-11 AA "Bauausführungen" vom Unterausschuss "Frischbetondruck" erarbeitet.

Der charakteristische Wert des maximalen Frischbetondrucks kann mit folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\sigma_{hk,max} = K_{tot,k} \cdot \gamma_c \cdot t_E \cdot v \ge 30 \quad [kN/m^2]$$
(C-13)

Dabei sind γ_c die Frischbetonwichte, t_E das Erstarrungsende des verwendeten Betons nach DIN EN 480-2:2006-11 (Vicat-Test) und *v* die mittlere Betoniergeschwindigkeit (Steiggeschwindigkeit). Der Modellparameter $K_{tot,k}$ berücksichtigt den Einfluss der Frischbetonkonsistenz und beträgt 0,42 bei SVB [a \ge 700 mm], 0,35 bei Rüttelbeton der Konsistenzklasse F5 mit 560 \le a \le 620 mm und 0,50 bei Konsistenzklasse F6 mit 630 \le a < 700 mm.

Die vergleichsweise hohen $K_{tot,k}$ -Werte für die Konsistenzklassen F6 und SVB resultieren insbesondere aus den zu erwartenden signifikanten Auswirkungen von Streuungen hinsichtlich der Mischungszusammensetzung bzw. der Sensibilität der Betone sowie den Streuungen des Erstarrungsendes. Auf Grund der Auswirkungen der Vibrationsverdichtung ist der empfohlene Frischbetondruck für F6-Betone im Vergleich zum SVB höher. Es ist jedoch zu bemerken, dass auch die Angaben für SVB mögliche Erschütterungswirkungen berücksichtigen. Der druckmindernde Einfluss des Siloeffektes wird in den Regelungen von E DIN 18218:2008-01 weitestgehend vernachlässigt.

Zur Ermittlung des Erstarrungsendes des Frischbetons t_E darf neben dem Referenzverfahren nach DIN EN 480-2:2006-11 (Vicat-Test) auch das in E DIN 18218:2008-01 beschriebene Knetbeutelverfahren Verwendung finden. Das Erstarrungsende nach Knetbeutelverfahren $t_{E,KB}$ wird an einer Betonprobe mit 8 Liter Volumen ermittelt, die sich in einem wasserundurchlässigen Kunststoffbeutel befindet. Der Zeitpunkt der Erstarrung (bezogen auf den ersten Kontakt von Wasser und Zement) ist erreicht, an dem der Beton mit dem Daumen bei einer Kraftaufwendung von ca. 40 N (entspricht 4 kg) nicht mehr als 0,5 mm eingedrückt werden kann. Um den Wert t_E zu erhalten, ist das mit dem Knetbeutelverfahren ermittelte Erstarrungsende $t_{E,KB}$ mit dem Faktor 1,25 zu erhöhen.



Bild C-6: Charakteristischer Wert des maximal möglichen Frischbetondrucks nach E DIN 18218:2008-01

Bild C-6 zeigt den charakteristischen Wert des maximal möglichen Frischbetondrucks nach E DIN 18218:2008-01 in Abhängigkeit der Betoniergeschwindigkeit und der Konsistenzklasse des Frischbetons. Im dargestellten Diagramm beträgt das Erstarrungsende 10 Stunden bzw. 8 Stunden nach Knetbeutelverfahren. Bei Verwendung der Diagramme ist zu beachten, dass die Frischbetontemperatur des tatsächlich eingebauten Betons, die dem Erstarrungsende zugrunde liegende Frischbetontemperatur nicht überschreiten darf. In gewissen Grenzen sind nach E DIN 18218:2008-01 Anpassungen an geringere Frischbeton- bzw. Außentemperaturen möglich.

Die für die Bemessung von Schalung und Rüstung anzusetzende Druckverteilung über die Schalungshöhe ist aus Bild C-7 ersichtlich. Der charakteristische Wert des Frischbetondrucks ist als hydrostatischer Betondruck anzusetzen, bis der maximal mögliche Frischbetondruck $\sigma_{hk,max}$ erreicht wird. Danach ist von einem konstanten Wert $\sigma_{hk,max}$ bis zu der Höhe auszugehen, an dem der Beton bereits erstarrt ist. Im erstarrten Zustand darf der Betondruck zu null gesetzt werden. Zu beachten ist, dass die Druckverteilung immer von der jeweilige Betonierhöhe abhängt und daher als Wanderlast aufzufassen ist. Wird der Beton von unten eingepumpt, ist nach E DIN 18218:2008-01 mindestens hydrostatischer Betondruck über die gesamte Betonierhöhe anzusetzen.

Bei der Bemessung von Schalung und Rüstung ist der charakteristischen Wert des Frischbetondrucks entsprechend dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept mit dem Teilsicherheitsbeiwert (der Einwirkung) zu multiplizieren. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit beträgt der Teilsicherheitsbeiwert im Falle einer ungünstig wirkenden Einwirkung $\gamma_F = 1,5$. Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit gilt $\gamma_F = 1,0$.



Bild C-7: Verteilung des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe

C.3 Durchgeführte Arbeiten

C.3.1 Allgemeines

Die durchgeführten Arbeiten gliedern sich in zwei Teile C1 Untersuchung von Materialparametern und C2 Modellbildung.

Im ersten Teil C1 wurden bemessungsrelevante Materialparameter des Frischbetons in experimentellen Untersuchungen ermittelt, um nachfolgend sowohl eine analytische als auch in einem späteren Schritt (nicht Bestandteil dieses Antrags) eine numerische Berechnung der Schalungsbelastung infolge des Frischbetondrucks zu ermöglichen.

In den experimentellen Untersuchungen wurde die Entwicklung des horizontalen Frischbetondrucks systematisch analysiert. Verwendung fand hierbei eine bereits erprobte Versuchsapparatur, an der jedoch noch Modifizierungen vorzunehmen waren. In einem mit gefüllten Schalungskörper erfolgte die Simulation Frischbeton verschiedener Spannungszustände über schrittweises Aufbringen von Vertikalspannungen. Durch die ansteigende Vertikalbelastung wird ein Betoniervorgang mit ansteigendem Betonspiegel simuliert. Im Rahmen der Versuchsreihe wurde der Einfluss der Frischbetoneigenschaften (wie z. B. rheologische Eigenschaften, Erstarrungsverhalten, Frischbetontemperatur), der Verformungsfähigkeit der Schalung und von Erschütterungen auf den horizontalen Frischbetondruck untersucht. Aus den Messergebnissen wurde anschließend der zeitliche Verlauf des inneren Reibungswiderstandes des Frischbetons abgeleitet.

Unter Verwendung der Versuchsapparatur wurde neben der inneren Reibung des Frischbetons auch das Reibungsverhalten zwischen dem Frischbeton und der Schalung sowie der Verformungswiderstand zwischen dem Frischbeton und der Bewehrung analysiert. Dies erfolgte über die Bestimmung der Auszugskraft eines im Frischbeton befindlichen Schalungselementes mit oder ohne der Anordnung von Bewehrungskonstruktionen.

Das Verformungsverhalten des Frischbetons wurde in zusätzlich durchgeführten Kompressionsversuchen (Ödometerversuch) und Setzversuchen (Schwindversuch) ermittelt.

Im zweiten Abschnitt C2 Modellbildung wurde auf Grundlage der eigenen Materialversuche und der Untersuchungen der Teilprojekte A, B und D ein wirklichkeitsnahes analytisches Modells zur Berechnung des Frischbetondrucks auf lotrechte Schalungen abgeleitet. In diesem Zusammenhang wurden die im Entwurf DIN 18218:2008-01 "Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen" enthaltenen Berechnungsansätze für Betone mit fließfähiger Konsistenz sowie bestehende Berechnungsmodelle für SVB verifiziert.

C.3.2 Verwendete Betone

In den experimentellen Untersuchungen wurden in Anlehnung an die vorgegebenen Richtrezepturen (Angaben aus Teilprojekt A) zunächst 4 Selbstverdichtende Betone und jeweils zwei Betone der Konsistenzklasse F5 und F6 verwendet, vgl. Tabelle C-1. Durch die Wahl der Zemente CEM I 42,5 R und CEM II A/S 52,5 R gegenüber dem ursprünglich vorgesehenen Zement CEM I 32,5 konnte bei den Betonen unerwünschtes übermäßiges Bluten vermieden werden.

Die in Tabelle C-1 aufgeführten angestrebten Zielwerte der Frischbetoneigenschaften wurden durch die Variation des Fließmitteltyps und der Fließmittelmenge eingestellt (Die Nachkommastelle in der Mischungsnummer enthält die Nummer des eingesetzten Fließmittels).

Zusätzlich zu den Richtrezeptur-Betonen wurden Betone untersucht, deren Mischungszusammensetzungen insbesondere hinsichtlich des Leimgehaltes (F6-200), der Zementart (F6-201), des Fließmittels (Nachkommastelle in der Rezepturnummer) und des Wasser-Mehlkorn-Verhältnisses (SVB-300) von den Richtrezepturen abwichen. Folglich veränderten sich auch die rheologischen Eigenschaften sowie zum Teil das Erstarrungsverhalten der Betone.

| Beton | | Richt- | Zielwerte | | | |
|-------|-------|---------------|-------------|-------------------|-------------------------------|--|
| Nr. | | Nr. (ibac) | Ausbreitmaß | Setzfließ- maß | Trichter- auslauf- zeit | Erstarrungs- ende Knetbeutel- verfahren |
| | | | а | sm | t _v | t _{E,KB} |
| | | | [cm] | [cm] | [s] | [h] |
| F5- | 102 | RB F5 | 60 ± 2 | - | - | ca. 5 |
| | 102.2 | RB F5 | 60 ± 2 | - | - | ca. 5 |
| | | | | | | |
| F6- | 200 | - | 68 ± 2 | - | - | - |
| | 200.2 | - | 68 ± 2 | - | - | - |
| | 200.3 | - | 68 ± 2 | - | - | - |
| | 200.4 | - | 68 ± 2 | - | - | - |
| | 200.5 | - | 68 ± 2 | - | - | - |
| | 201 | RB F6 | 68 ± 2 | - | - | ca. 5 |
| | 202.2 | RB F6 | 68 ± 2 | - | - | ca. 5 |
| | | | | | | |
| SVB- | 300 | - | - | 72 ± 2 | - | - |
| | 301 | SVB1 | - | 72 ± 2 | 13 ± 2 | ca. 5 |
| | 301.2 | SVB1 | - | 72 ± 2 | 13 ± 2 | ca. 5 |
| | 302.2 | SVB2 | - | 72 ± 2 | 5 ± 2 | ca. 5 |
| | 303.2 | SVB3 | - | 72 ± 2 | 13 ± 2 | ca. 7,5 |
| | 304.2 | SVB4 | - | 72 ± 2 | 5 ± 2 | ca. 7,5 |

Tabelle C-1:Eingesetzte Betone mit zugehöriger Richtrezepturnummer sowie
angestrebte Zielwerte der Frischbetoneigenschaften

Die genaue Mischungszusammensetzung aller verwendeten Betone enthält Tabelle C-2 und Tabelle C-3.

| Mischungsnummer | | F5-102 | F5-102.2 | F6-200 | F6-200.2 | F6-200.3 | F6-200.4 | F6-200.5 | F6-201 | F6-202.2 |
|-----------------------------------|----------------------|--------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|
| CEM I 42,5 R | | | | | | | | | | |
| (Fa. Dyckerhoff) | [kg/m ³] | 274 | 274 | 336 | 336 | 336 | 336 | 336 | | 274 |
| CEM II A/S-52,5 R | | | | | | | | | | |
| (Fa. Dyckerhoff, Deuna) | [kg/m ³] | | | | | | | | 274 | |
| Steinkohlenflugasche | | | | | | | | | | |
| Herne IV | [kg/m ³] | 137 | 137 | 112 | 112 | 112 | 112 | 112 | 137 | 137 |
| Wasser | | | | | | | | | | |
| (ohne WA der GK) | [kg/m ³] | 165 | 164 | 178,0 | 177,0 | 177,0 | 177,0 | 177,0 | 163,0 | 163,0 |
| Fließmittel 1 | | | | | | | | | | |
| ViskoCrete 1035 (SIKA) | [kg/m ³] | 1,5 | | 1,5 | | | | | 2,7 | |
| Fließmittel 2 | | | | | | | | | | |
| Glenium Sky 592 (BASF) | [kg/m ³] | | 2,0 | | 3,0 | | | | | 3,0 |
| Fließmittel 3 | | | | | | | | | | |
| Muraplast FK 63.17 (MC Bauchemie) | [kg/m ³] | | | | | 3,1 | | | | |
| Fließmittel 4 | | | | | | | | | | |
| Glenium Sky 591 (BASF) | [kg/m ³] | | | | | | 2,6 | 3,5 | | |
| Fließmittel 5 | | | | | | | | | | |
| FM 514 (BASF) | [kg/m ³] | | | | | | | 6,0 | | |
| Stabilisierer | | | | | | | | | | |
| Foxcrete | [kg/m ³] | | | | | | | | | |
| Rheinsand 0/2 mm | [kg/m³] | 646 | 646 | 638 | 638 | 638 | 638 | 638 | 646 | 646 |
| Rheinkies 2/8 mm | [kg/m ³] | 434 | 434 | 413 | 413 | 413 | 413 | 413 | 434 | 434 |
| Rheinkies 8/16 mm | [kg/m ³] | 664 | 664 | 633 | 633 | 633 | 633 | 633 | 664 | 664 |
| w/z-Wert (Masse) | [-] | 0,61 | 0,60 | 0,53 | 0,53 | 0,53 | 0,53 | 0,55 | 0,60 | 0,60 |
| W/MK (Volumen) | [-] | 1,13 | 1,12 | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,17 | 1,13 | 1,12 |
| Leimvolumen | [1] | 314 | 314 | 337 | 337 | 337 | 337 | 344 | 312 | 314 |
| Mehlkorn (MK) | [kg/m ³] | 411 | 411 | 448 | 448 | 448 | 448 | 448 | 411 | 411 |
| Gehalt 0/2 mm im Mörtel | [Vol%] | 44 | 44 | 42 | 42 | 42 | 42 | 41 | 44 | 44 |
| BZS je Zement | [M%] | 50 | 50 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 50 | 50 |

Tabelle C-2: Mischungszusammensetzung der verwendeten Rüttelbetone

| Tabelle C-3: | Mischungszusammensetzung der verwendeten Selbstverdichtenden |
|--------------|--|
| | Betone |

| | 1 | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Mischungsnummer | | SVB-300 | SVB-301 | SVB-301.2 | SVB-302.2 | SVB-303.2 | SVB-304.2 |
| CEM I 42,5 R | | | | | | | |
| (Fa. Dyckerhoff) | [kg/m ³] | | 273 | 273 | 272 | 274 | 273 |
| CEM II A/S-52,5 R | | | | | | | |
| (Fa. Dyckerhoff, Deuna) | [kg/m ³] | 385 | | | | | |
| Steinkohlenflugasche | | | | | | | |
| Herne IV | [kg/m ³] | 193 | 300 | 300 | 300 | 178 | 178 |
| Wasser | | | | | | | |
| (ohne WA der GK) | [kg/m ³] | 187 | 165 | 163 | 198 | 164 | 199 |
| Fließmittel 1 | | | | | | | |
| ViskoCrete 1035 (SIKA) | [kg/m ³] | 3,4 | 3,5 | | | | |
| Fließmittel 2 | | | | | | | |
| Glenium Sky 592 (BASF) | [kg/m ³] | | | 5,6 | 2,8 | 4,5 | 2,8 |
| Fließmittel 3 | | | | | | | |
| Muraplast FK 63.17 (MC Bauchemie) | [kg/m ³] | | | | | | |
| Fließmittel 4 | | | | | | | |
| Glenium Sky 591 (BASF) | [kg/m ³] | | | | | | |
| Fließmittel 5 | | | | | | | |
| FM 514 (BASF) | [kg/m ³] | | | | | | |
| Stabilisierer | | | | | | | |
| Foxcrete | [kg/m ³] | | | | | 0,2 | 0,2 |
| Rheinsand 0/2 mm | [kg/m ³] | 534 | 566 | 566 | 613 | 582 | 639 |
| Rheinkies 2/8 mm | [kg/m ³] | 393 | 393 | 393 | 342 | 439 | 383 |
| Rheinkies 8/16 mm | [kg/m ³] | 602 | 602 | 602 | 524 | 672 | 586 |
| w/z-Wert (Masse) | [-] | 0,49 | 0,61 | 0,61 | 0,73 | 0,61 | 0,74 |
| W/MK (Volumen) | [-] | 0,92 | 0,77 | 0,77 | 0,93 | 1,02 | 1,22 |
| Leimvolumen | [1] | 396 | 384 | 385 | 416 | 333 | 366 |
| Mehlkorn (MK) | [kg/m ³] | 578 | 573 | 573 | 572 | 452 | 451 |
| Gehalt 0/2 mm im Mörtel | [Vol%] | 34 | 36 | 36 | 36 | 40 | 40 |
| BZS je Zement | [M%] | 50 | 110 | 110 | 110 | 65 | 65 |

C.3.3 Überblick Untersuchungsprogramm (experimentelle Untersuchungen)

Im Zuge der Arbeiten zur Ermittlung des **horizontalen Frischbetondrucks** (Seitendruckversuche) durch Simulation eines Betoniervorganges und die nachfolgende Ableitung der inneren Reibung wurden in ca. 40 Simulationsversuchen 2 Mischungsrezepturen der Konsistenzklasse F5, 7 Mischungsrezepturen der Konsistenzklasse F6 sowie 5 Mischungsrezepturen der Konsistenzklasse SVB analysiert (vgl. Tabelle C-4).

Bei jedem verwendeten Beton sollten die Zielbereiche der charakteristischen Frischbetoneigenschaften, wie Ausbreitmaß, Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit nach [C-14] eingehalten werden. Die Erstarrungszeiten der Betone wurden sowohl mit Knetbeutelverfahren nach DIN 18218:2008-01 [C-15] als auch mit Vicat-Penetrationstest nach DIN EN 480-2:1997-02 ermittelt.

Neben der Variation der Mischungszusammensetzung erfolgte die Analyse des Einflusses verschiedener Randbedingungen, wie z. B. Erschütterungen, Vibration, Belastungsverlauf (Betoniergeschwindigkeit 1 bis 8 m/h), Verformungsverhalten der Schalung sowie Frischbetontemperatur, auf die Materialparameter bzw. den Frischbetondruck. Die diesbezüglich an den Mischungsrezepturen untersuchten Einflussparameter sind in Tabelle C-4 dargestellt.

Der Standardversuch der Seitendruckversuche impliziert eine simulierte Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h bis zum Erreichen des Erstarrungsendes nach Knetbeutelverfahren bei einer Betonwichte von 25 kN/m³, starre Schalung, keine Erschütterungen und eine Frischbetontemperatur von 20 °C. Die Abweichungen der Randbedingungen gegenüber dem Standardversuch sind durch die geklammerten Bezeichnungen im Anschluss an die Rezepturnummer, wie z. B. (NS) für nachgebende Schalung, kenntlich gemacht.

In den **Reibungsversuchen** wurden eine Mischungsrezeptur der Konsistenzklasse F5, zwei Mischungsrezepturen der Konsistenzklasse F6 sowie 5 Mischungsrezepturen der Konsistenzklasse SVB eingesetzt (vgl. Tabelle C-5). Die Untersuchungen umfassten insgesamt 17 Versuchsdurchläufe mit mehreren Lastzyklen. Wie bei den Versuchen zur inneren Reibung wurde neben dem rheologischen Verhalten der Einfluss verschiedener Randbedingungen, wie z. B. Bewehrungsgehalt, Erschütterungen, Vibration und Normalspannungszustand analysiert.

Der Standardversuch bei den Reibungsversuchen impliziert mehrere Lastzyklen bis zum Erstarrungsbeginn nach Knetbeutelverfahren mit jeweils einer dreistufigen Vertikallasterhöhung auf ca. 25 kN/m², 80 kN/m² und 240 kN/m², eine Reibungsfläche aus Stahl ohne Bewehrung, keine Erschütterungen und eine Frischbetontemperatur von 20 °C.

Das lastabhängige Verformungsverhalten des Frischbetons wurde in exemplarischen **Kompressionsversuchen** (Ödometerversuchen) an den Betonen F6-202.2 und SVB-300 ermittelt. Zusätzlich wurden Setzversuchen zum Frühschwinden an ausgewählten Betonen durchgeführt.

Tabelle C-4: Generelles Versuchsprogramm der Seitendruckversuche (Hauptversuche)

| Seitendru | ckversu | che | | | | | | | | | |
|-----------|---------|----------|---|-------------------------|----------------------|-----------------------------------|--|--|---|---------------------------------------|---------------------------------|
| Versuchs | ablauf | Standard | Frisch. beton- temperatur 10°C | nachgiebige Schalung | Sofort- belastung | Betonier- geschwin- digkeit | Betonier- geschwindigkeit +Erschütterungen +nachgiebige Schalung | geringe Erschütterung +nachgiebige Schalung | Erschütterung +nachgiebige Schalung | Vibration +nachgiebige Schalung | Vibration +feste Schalung |
| Beton | Nr. | | (Temp) | (NS) | (Dauerl) | (V) | (NS+VIB+V) | (NS+VIB) | (NS+VIBd) | (NS+VVIB) | (VIBd) |
| F5- | 102 | х | | | | x (V4) | | | | | |
| | 102.2 | х | | x | | | | x | x | x | |
| | | | | | | | | | | | |
| F6- | 200 | x | | | x | x (V1, V4, V8) | x (V1) | | x | x | |
| | 200.2 | х | | x | | | | | x | x | |
| | 200.3 | x | | | | | | | | | |
| | 200.4 | x | | | | | | | | | |
| | 200.5 | x | | | | | | | | | |
| | 201 | х | | | | | | | | | |
| | 202.2 | х | x | | | | | | x | x | x |
| | - | | | | | | | | | - | |
| SVB- | 300 | х | | | | | | | x | | |
| | 301 | 2x | | | | | | | | | |
| | 301.2 | х | | | | | | x | x | | |
| | 302.2 | х | | | | | | | x | | |
| | 303.2 | х | | | | | | | 2x | | |
| | 304.2 | х | | | | | | | | | |

Tabelle C-5: Generelles Versuchsprogramm der Reibungsversuche (Hauptversuche) und der Verformungsversuche

| Reibungsve | rsuche | | | Oedometer- versuch | Setzversuch | | |
|----------------|--------|-----------------------------------|--|--|--|---|---|
| Versuchsablauf | | Standard bis t _{A,KB} | mit Bewehrung bis t _{A,KB} | mit Bewehrung +Sofortbelastung bis t _{A,KB} | Bewehrung +Sofortbelastung +Erschütterung bis t _{A,KB} | | |
| Beton | Nr. | (SS) | (SS+Bew) | (SS+Bew+Dauerl) | (SS+Bew+Dauerl+VIB) | | |
| F5- | 102 | | | | | | |
| | 102.2 | x | x | | х | | х |
| | | | | | | | |
| F6- | 200 | | | | | | х |
| | 200.2 | x | x | | | | |
| | 200.3 | | | | | | |
| | 200.4 | | | | | | |
| | 200.5 | | | | | | |
| | 201 | | | | | | |
| | 202.2 | x | x | x | X | x | Х |
| | | | | | | | |
| SVB- | 300 | х | x | | | x | X |
| | 301 | | | | | | |
| | 301.2 | x | x | | | | X |
| | 302.2 | | x | | | | X |
| | 303.2 | x | x | | | | x |
| | 304.2 | | x | | | | |

C.3.4 Versuchseinrichtung

C.3.4.1 Untersuchungen zum Seitendruck und zur Reibung

In den experimentellen Untersuchungen zur Seitendruck und der Reibung wurde eine bereits vorhandene und erprobte Versuchsapparatur eingesetzt, deren Aufbau und Funktionsweise ausführlich in [C-16] beschrieben ist. Um den aus dem Forschungsprojekt resultierenden speziellen Anforderungen Rechnung zu tragen, waren zunächst einige Modifizierungen und Erweiterungen der Versuchsapparatur notwendig.

Die Versuchsapparatur, dargestellt in Bild C-8 bis Bild C-10 und Bild C-13, wird nachfolgend als Kombinierte Versuchs-Apparatur (KVA) bezeichnet. Der eigentliche Schalungskörper besteht aus vier Seitenwänden, einem doppelten Boden sowie einem beweglichen Deckel (inklusive Dichtungssystem). Alle Schalungselemente wurden aus hochwertigen Kunststoffschalungsplatten mit Aluminiumeinlage (Alkus-Platte AL 21, d = 21 mm) hergestellt.

Mittels einer hydraulischen Presse können über den beweglichen Deckel Vertikalspannungen auf die Frischbetonprobe (25x25x25 cm) aufgebracht werden. Um die entsprechenden Vertikalkräfte erfassen zu können, wurde zwischen Hydraulikstempel und Schalungsdeckel eine Kraftmessdose installiert. Die Ermittlung der Horizontalreaktion erfolgte durch Messung der Kräfte, die auf zwei vertikale entkoppelte Schalungselemente wirken. Diese quadratischen Schalungselemente haben eine Seitenlänge von 100x100 mm (vgl. Bild C-8, Pos. 4) und sind jeweils mit einem gewebeverstärkten Kunststoffklebeband am Schalungskörper befestigt. Zwischen den entkoppelten Elementen und der restlichen Seitenwand ist ein etwa 1 mm breiter Spalt, der eine widerstandsfreie Bewegung des Elements ermöglicht.

Bei den beiden anderen sich gegenüberliegenden Seitenwänden besteht die Möglichkeit Schalungsplatten zu wählen, an denen sich schmale rechteckige Öffnungen befinden. Ein bewegliches Element mit definierten Oberflächeneigenschaften, nachfolgend als Schalungsschwert bezeichnet, durchstößt diese Öffnungen und befindet sich somit innerhalb der Frischbetonprobe (vgl. Bild C-9). Über die Kraft (Kraftmessdose Bild C-9, Pos. 11), welche notwendig ist, um eine Relativverschiebung zwischen dem Frischbeton und dem Schalungsschwert hervorzurufen, wird die Reibung zwischen dem Frischbeton und der Schalungsoberfläche quantifiziert. Ein extra erarbeitetes Abstreifersystem verhindert Leim- und Wasseraustritt bei gleichzeitiger Minimierung des systembedingten Auszugswiderstandes des Schalungsschwertes (vgl. Bild C-8, Pos. 9 und Bild C-11).

Der Schalungskörper wird in einem aus Stahlprofilen konstruierten Hauptrahmen platziert, der alle im Versuch auftretenden Kräfte aufnimmt. Die Kraftmessdosen zur Ermittlung des Horizontaldrucks sind über Querrahmen mit dem Hauptrahmen verbunden. Um ein einfacheres Ein- und Ausbauen der Betonproben zu gewährleisten, wurden zwischen dem oberen und unteren Teil des Hauptrahmens vertikale Klemmprofile aus Rechteckstahlrohren angeordnet, die mittels Klemmschrauben den Schalungskasten fixieren und nach dem Versuch schnell gelöst werden können.

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben "Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz" Teilprojekt C – Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau



Bild C-8: Kombinierte Versuchsapparatur im Grundriss



Bild C-9: Kombinierte Versuchsapparatur im Schnitt C-C



Bild C-10: Kombinierte Versuchsapparatur im Schnitt A-A



Bild C-11: Konstruktionsprinzip des Abstreifers (Pos. 9)

Einen wichtigen Punkt stellte die Herstellung der Wasserdichtigkeit der Schalungskonstruktion dar. Um einen überhöhten Wasserverlust an den Elementstößen zu vermeiden, wurden an den kritischen Stellen Silikon-Abdichtungen vorgesehen. Im Bereich des beweglichen Schalungsdeckels verhinderte eine an den Schalungswänden umlaufend mit Gewebeband befestigte Dichtungsfolie den Wasseraustritt (vgl. Bild C-12).

Eine Fettschicht am Schalungsdeckel und am Schalungsboden ermöglichte zum einen die Horizontalbewegung des Frischbetons und unterstützte zum anderen den Abdichtungsprozess. Auf die vertikalen Schalungswände wurde (mittels Lappen) eine dünne Schicht Schalöl aufgetragen.



Bild C-12: Ansicht des mit Beton gefüllten Schalungskastens mit Abdichtungselementen, Messeinrichtungen sowie Lasteinleitungsplatten



Kunststoffschalung 25x25x25 cm und Stahlrahmen

Schalungselement (Stahlschwert)

Bild C-13: Kombinierte Versuchsapparatur (KVA) mit Reibungselement während eines Versuchs

Simulation einer geringeren Schalungssteifigkeit bzw. eines Schalungsversagens

Eine Möglichkeit zur Simulation eines nachgebenden bzw. versagenden Schalsystems bietet das gezielte Lösen der Klemmschrauben (Bild C-8, Pos. 15) und das Verschieben der entkoppelten Schalelemente durch Aufdrehen der entsprechenden Gewindestangen (Bild C-8, Pos. 5). Dadurch kann ein vollständiger Abbau von Vorspannungszuständen innerhalb der Schalung erreicht werden.

Im Fall von Versuchen mit nachgiebiger Schalung wurden die beiden Schalungswände auf den Seiten der horizontallastaufnehmenden Messeinrichtungen nicht mit dem Rest der Schalung verschraubt.

Simulation von Bewehrung beim Reibungsversuch

Zwei an dem Stahl-Schalungsschwert befestigte Bewehrungsstäbe ermöglichen die Simulation des Gleitvorgangs zwischen dem Frischbeton und einer Bewehrung, die normal zum Gleitweg während eines Betoniervorgangs liegt, wie z. B. Bügel in einer Stützenbewehrung oder Querbewehrung in einer Wand (vgl. Bild C-14).



Ansicht der Bewehrung / Querschnitt durch das Schalungsschwert



Bild C-14: Befestigung der Bewehrungsstäbe an dem Stahl-Schalungsschwert

Die zwei glatten Bewehrungsstäbe weisen eine Länge von 10 cm und einen Durchmesser von 8 mm auf. Die Befestigung erfolgt durch 4 mm dicke Stäbe. Der lichte Abstand zwischen Schalungsschwert und Bewehrung beträgt 2,5 cm. Die Bewehrung befindet sich bei Versuchsbeginn mittig zwischen den Schalungswänden

Simulation von Erschütterungen durch Stöße

Die Simulation von Erschütterungen (z. B. durch Einfüllvorgang, Hammerschläge oder sonstigen Anprall) erfolgt durch die stoßartige Belastung der Schalungswände. Der Stoß wurde durch ein 20 cm langes Pendel mit einer Masse von 1 kg erzeugt. Von der Horizontalstellung ausgehend, beschleunigte das Pendel um einen Winkel von 90° bis zum Erreichen der Vertikalstellung, bei der das Gewicht auf einen Holzklotz prallte. Der Holzklotz überträgt den entsprechenden Stoß auf den Mittelteil der Schalungswände (vgl. Bild C-15).

Vertikalschnitt



Bild C-15: Simulation von Erschütterungen durch Stoß

Bei Vernachlässigung der Rückprallwirkung beträgt die in das System je Pendelschlag eingetragene Energie $E \approx 2,0$ J.

Simulation von Erschütterungen durch Rüttler

Um den Einfluss von Vibration und starken Erschütterungen zu analysieren, wurde zusätzlich die Möglichkeit geschaffen, um an der Schalungsaußenseite einen Rüttler mit einen Außendurchmesser von 30 mm, einer Leistung von 700 W und einer Drehzahl von 2700 U/min zu installieren, vgl. Bild C-16. Der an Rohrschelle befestigte Rüttler überträgt die Vibrationen auf die Schalungswand, welche sie wiederum auf den Beton überträgt.



Bild C-16: Kombinierte Versuchsapparatur mit einsatzbereitem Rüttler

Besonderheiten beim Versuchsaufbau zur alleinigen Ermittlung des Seitendruckbeiwertes

Bei den Versuchen zum Seitendruck (ohne Reibung) wurden im Gegensatz zum beschriebenen Messsystem (entkoppeltes Schalungselement und Kraftmessdose) ein Schalungsdruckgeber in eine vertikale Schalungsoberfläche integriert. Somit konnten bei den Versuchen mit nachgebender Schalung unerwünschte Relativverschiebungen zwischen Schalung und Messsystem vermieden werden. Die Schalungsdruckgeber der Fa. Glötzl wiesen genau wie die entkoppelten Schalungselemente Seitenabmessungen von 100x100 mm auf. In Vorversuchen wurden die Seitendruckgeber kalibriert.

Zur Erhöhung der Dichtigkeit der Schalung wurde an der Schalungsinnenseite ein eng anliegender Kunststoffbeutel angeordnet, welcher die eingebaute Betonprobe zusätzlich umhüllte. Das Schalungsschwert entfiel.



Bild C-17: Druckaufnehmer im Lieferzustand (links) und in die Schalung integrierter Druckaufnehmer (rechts)

Oberflächeneigenschaften Stahlschwert

Die Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit des Stahlschwertes sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

| T-L-II. C (. | V | | |
|--|----------------|---------------------------|-------------------------|
| I SUBLIC -D. | Kenngroken der | Unerflachenneschaffennell | nes Schallingsschwertes |
| \mathbf{I} u \mathbf{U} u \mathbf{U} u \mathbf{U} u \mathbf{U} | | Obel machemocochantennen | |

| Schalungsoberfläche | Kurzbez. | Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit ¹⁾ [µm] | | | | | | | |
|--|----------|---|----------|-----------|--|--|--|--|--|
| | | R_a | R_t | R_z | | | | | |
| Stahl | St | 1,3-3,8 | 8,3-18,6 | 11,3-29,8 | | | | | |
| ¹⁾ nach DIN EN ISO 4287 (1998) (Rauheitsprofil), Messgerät Fa. Hommelwerke, | | | | | | | | | |

Turbo Rauheit V6.14, Taster-Typ TK 300, Messbereich 80 μ m, Taststrecke 4,8 mm, Geschwindigkeit 0,5 mm/s, L_c (cut-off) = 0,8 mm, Filter ISO 11562(M1), L_c/L_s = 100

Messgrößen

Die folgenden Messgrößen wurden an der Kombinierten-Versuchsapparatur aufgenommen:

- Vertikalkraft F_{vI} mit Druckmessdose KMD 1
- Horizontalkräfte F_{h1} und F_{vh2} (Seitendruck) mit Druckmessdosen KMD 2 und KMD 3
- alternativ für F_{h2} (KMD 3): Horizontaldruck (Seitendruck) mit Schalungsdruckgeber
- Horizontalkraft F_{r1} (Reibungskraft) mit Druckmessdose KMD 4
- vertikaler Verschiebungsweg sv des Schalungsdeckels mit Wegaufnehmer
- horizontale Verschiebungswege s_{h1} und s_{h2} an den entkoppelten Schalungselementen bzw. dem Schalungsdruckgeber mit Wegaufnehmer
- horizontaler Verschiebungsweg s_{h3} an der Stirnseite des Schalungsschwertes mit Wegaufnehmer

C.3.4.2 Kompressionsversuch

Die experimentellen Untersuchungen zum Kompressionsmodul von Frischbeton wurden auf Grundlage des Oedometerversuchs für Böden durchgeführt.

Auf Grund der Abmessungen der Gesteinskörnung des Frischbetons von bis zu 16 mm, wurden Proctortöpfe mit einem Innendurchmesser von 100 mm und einer Höhe von 172 mm verwendet. Nach dem Befüllen der Proctortöpfe mit Frischbeton wurden die Proben mit einen Stahldeckel (Durchmesser von 99,5 mm) verschlossen. Um ein Austreten von Wasser und Leim zu vermeiden, wurde der Zwischenraum zwischen Behälterinnenwand und Deckelrand mit hochviskosem Wasserpumpenfett abgedichtet.

Die erwünschten Vertikalspannungen konnten über eine Hebeleinrichtung mittels Gewichten auf die Stahlplatte und damit die Betonprobe aufgebracht werden. Die Lasterhöhung durch die Hebelübersetzung erfolgt mit dem Faktor 11. Ein "Kugelgelenk" im Zentrum des Stahldeckels stellt eine zentrische Lasteinleitung sicher. Die aus den Spannungszuständen resultierenden Setzungen wurden mit einer Messuhr der Genauigkeit 1/1000 mm ermittelt.



Bild C-18: Versuchseinrichtung zur Ermittlung des Kompressionsmoduls

C.3.4.3 Oberflächensetzung

Unter Verwendung einer einfachen Versuchsapparatur wurde die Oberflächensetzung des Frischbetons ermittelt, um daraus das Schwinden des Betons in sehr jungem Alter abzuschätzen. Zur Prüfung wird der Frischbeton in einen umgekehrten Kegelstumpf eingebaut, welcher Abmessungen nach DIN EN 12350-5:2000-06 aufweist und am unteren Rand abgedichtet auf einer wasserundurchlässigen Schalung aufsteht.

Der Frischbeton wird ca. 30 min nach erster Wasserzugabe in den Kegelstumpf eingefüllt. Auf die geglättete Oberfläche des Betons wird eine 1 mm dicke Kunststoffplatte mit 19 cm Durchmesser aufgelegt, welche als Lastverteilungsplatte für den Prüfkopf dient. Die Oberflächensetzung wird mit einem zentral angeordneten Wegaufnehmer ermittelt, welcher über einen Ständer am Kegelstumpf befestigt ist. Die Oberflächensetzung wird in der Regel bis zum Zeitpunkt des Erstarrungsendes des Betons bestimmt.



Bild C-19: Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Oberflächensetzung des Frischbetons

C.3.5 Versuchsdurchführung

Die Arbeitsschritte zur Durchführung der Materialversuche sind in den Anlagen detailliert dokumentiert. Der prinzipielle Verlauf der Vertikalbeanspruchung bei den Seitendruckund Reibungsversuchen ist in Bild C-20 bzw. Bild C-21 dargestellt.



Bild C-20: Beanspruchung der Frischbetonprobe in vertikaler Richtung bei den Seitendruckversuchen



Bild C-21: Beanspruchung der Frischbetonprobe in vertikaler Richtung bei den Reibungsversuchen

C.4 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen (Teil C1)

C.4.1 Frischbetoneigenschaften und Erstarrungszeiten

Die im Rahmen der Materialversuche ermittelten Frischbetoneigenschaften sind in Tabelle C-7 und Tabelle C-8 zusammengestellt. Es wird deutlich, dass die Betone eine gute Konsistenzhaltung aufweisen, obwohl die Betone bis zur Prüfung im Ruhezustand belassen wurden und vor der Konsistenzprüfung kein erneutes Durchmischen erfolgte. Bei einer verringerten Frischbetontemperatur [F6-202.2 (Temp10)] war sogar über den gesamten Zeitraum von 120 min kein signifikantes Ansteifen festzustellen.

Tabelle C-7:Frischbetoneigenschaften der in den Seitendruckversuchen
analysierten Betone

| Versuch Nr. | Frisch- beton- temperatur | Ausbreitmaf Setzfließma | 3/ ß | , | , | <i>.</i> | Setzfließ- maß mit Ring | Setzfließ- höhe mit Ring | Trichter- auslauf- zeit | Zeit von Wasser- zugabe bis Einbau |
|----------------------|---------------------------------|----------------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|
| | I _c | a / sm | a / sm | a / sm | a / sm | a / sm | sm _b | n _b | ťV | Δt |
| | t = 0 | t = 0 | t = 30 min | t = 60 min | t = 90 min | t = 120 min | t = 0 | t = 0 | t = 0 | |
| | [°C] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [s] | [h] |
| | | | | | | | | | | |
| F5-102 | 18,6 | 63,5 | 52,0 | 46,5 | 43,0 | | | | | 0,3 |
| F5-102 (V4) | 20,8 | 69,0 | 63,0 | 50,0 | 42,0 | | | | | 0,4 |
| F5-102.2 | 20,7 | 63,5 | 54,5 | 51,5 | 50,0 | 44,5 | | | | 0,4 |
| F5-102.2 (NS) | 21,0 | 59,0 | 54,5 | 51,5 | 50,0 | 44,5 | | | | 0,5 |
| F5-102.2 (NS+VIB) | 22,2 | 57,0 | 54,5 | 54,5 | 51,5 | 49,0 | | | | 0,5 |
| F5-102.2 (NS+VIBd) | 20,1 | 58,5 | 53,0 | 54,5 | 53,5 | 49,5 | | | | 0,4 |
| F5-102.2 (NS+VVIB) | 20,8 | 62,5 | 54,0 | 52,5 | 49,5 | 47,0 | | | | 0,3 |
| F6-200 | 17,8 | 72,0 | 66,0 | 63,0 | 62,5 | 61,0 | 63,5 | ohne Ring | | 0,4 |
| F6-200 (Dauerl) | 18,6 | 62,0 | 50,0 | 45,5 | 41,0 | | | Ť | | 0,3 |
| F6-200 (NS+VIBd) | 20,7 | 72,0 | 59,5 | 55,0 | 52,5 | 48,0 | | | | 0,3 |
| F6-200 (V1) | 20,0 | 70,5 | 56,0 | 53,5 | 46,5 | | | | 1 | 0,4 |
| F6-200 (V4) | 18,6 | 68,0 | 61,0 | 56,5 | 51,0 | | | | | 0,6 |
| F6-200 (V8) | 21,0 | 65,5 | 50,0 | 48,5 | 45,5 | | | | | 0,3 |
| F6-200 (NS+VIB+V1) | 18,3 | 69,0 | 64,0 | 59,0 | 57,5 | 51,0 | | | | 0,5 |
| F6-200 (NS+VVIB)) | 21,7 | 66,5 | 57,5 | 53,0 | 49,5 | 45,5 | | | | 0,5 |
| F6-200.2 | 21,6 | 66,0 | 56,0 | 64,0 | 52,0 | 47,0 | | | | 0,8 |
| F6-200.2 (NS) | 20,2 | 72,0 | 69,0 | 65,0 | 62,5 | 59,5 | | | | 0,4 |
| F6-200.2 (NS+VIBd) | 20,5 | 72,5 | 65,5 | 62,5 | 59,0 | 57,0 | | | | 0,4 |
| F6-200.2 (NS+VVIB) | 21,5 | 71,0 | 59,0 | 54,0 | 53,0 | 52,0 | | | | 0,4 |
| F6-200.3 | 19,7 | 69,5 | 50,0 | 46,0 | 42,0 | 38,5 | | | | 0,4 |
| F6-200.4 | 21,4 | 72,0 | 64,0 | 62,0 | 61,0 | 60,0 | | | | 0,4 |
| F6-200.5 | 22,0 | 65,0 | 59,0 | 56,0 | 54,0 | 52,0 | | | | 0,9 |
| F6-201 | 21,0 | 66,0 | 66,0 | 64,0 | 60,0 | 56,0 | | | | 0,5 |
| F6-202.2 | 21,1 | 71,0 | 63,5 | 62,0 | 64,0 | 58,5 | | | | 0,5 |
| F6-202.2 (Temp10) | 10,7 | 69,0 | 73,5 | 73,0 | 73,0 | 70,0 | 66,5 | ohne Ring | | 0,4 |
| F6-202.2 (NS+VIBd) | 20,9 | 69,0 | 66,0 | 65,0 | 63,0 | 63,0 | | | | 0,3 |
| F6-202.2 (NS+VVIB) | 21,3 | 71,0 | 65,0 | 64,5 | 62,0 | 61,5 | | | | 0,4 |
| F6-202.2 (VIBd) | 20,7 | 66,5 | 65,5 | 63,0 | 64,5 | 63,0 | | | | 0,4 |
| SVB-300 | 20,9 | 73,0 | 70,5 | 68,0 | 66,0 | | 73,0 | 2,2 | 5,7 | 0,6 |
| SVB-300 (NS+VIBd) | 21,9 | 80,0 | 80,5 | 76,0 | 75,5 | 71,5 | 82,0 | 1,6 | 4,2 | 0,6 |
| SVB-301 | 21,3 | 72,0 | 55,0 | 50,5 | 44,5 | ,- | 71,0 | ,- | 17,6 | 1,0 |
| SVB-301a | 21,1 | 76,0 | 62,0 | 55,5 | 52,0 | 49,5 | 73,0 | 2,3 | 14,9 | 0,7 |
| SVB-301.2 | 22,1 | 74,0 | 63,0 | 61,0 | 57,5 | 52,5 | 70,0 | 2,6 | 18,0 | 0,6 |
| SVB-301.2 (NS+VIB) | 22,7 | 76,5 | 73,5 | 73,5 | 71,5 | 75,5 | 74,5 | 2,4 | 16,2 | 0,6 |
| SVB-301.2 (NS+VIBd) | 24,8 | 79,0 | 70,0 | 72,0 | 69,0 | 69,0 | 77,0 | 2,6 | 14,3 | 0,6 |
| SVB-302.2 | 20,8 | 74,0 | 59,0 | 55,0 | 52,5 | 47,5 | 70,0 | 2,8 | 6,9 | 0,5 |
| SVB-302.2 (NS+VIBd) | 23,7 | 73,5 | 71,0 | 69,0 | 68,5 | 67,0 | 72,5 | 2,3 | 6,5 | 0,5 |
| SVB-303.2 | 20,2 | 75,5 | 61,0 | 49,0 | 39,0 | 40,0 | 73,5 | 2,5 | 11,9 | 0,6 |
| SVB-303.2 (NS+VIBd) | 20,8 | 76,5 | 66,5 | 56,5 | 51,0 | 43,5 | 75,0 | 2,7 | 10,7 | 0,6 |
| SVB-303.2a (NS+VIBd) | 23,7 | 74,5 | 71,5 | 70,0 | 66,5 | 66,0 | 73,5 | 2,3 | 6,5 | 0,7 |
| SVB-304.2 | 20,2 | 71,5 | 54,5 | 48,0 | 39,5 | 36,0 | 70,0 | 2,7 | 5,1 | 0,7 |

| Versuch Nr. | Versuch Nr. | | а | | | sm | | t _v | Δt | |
|-----------------|-------------------|-------|----------------|-----------------|------------------|----------------|-----------------|------------------|----------------|-----|
| Mischung Nr. | Randbedingung | Beton | t _o | t ₆₀ | t ₁₂₀ | t _o | t ₆₀ | t ₁₂₀ | t _o | |
| | | [°C] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [s] | [h] |
| F5-102.2 | SS | 20,8 | 59,5 | 57,5 | 57,0 | - | - | - | - | 0,4 |
| F5-102.2 | SS+Bew | 21,5 | 60,0 | 59,5 | 59,5 | - | - | - | - | 0,3 |
| F5-102.2 | SS+Bew+Dauerl+VIB | 22,5 | 56,0 | 52,0 | 46,0 | - | - | - | - | 0,5 |
| F6-200.2 | SS | 21,6 | 70,5 | 69,5 | 68,5 | - | - | - | - | 0,3 |
| F6-200.2 | SS+Bew | 22,6 | 69,0 | 67,5 | 68,5 | - | - | - | - | 0,3 |
| F6-202.2 | SS | 21,8 | 69,0 | 59,5 | 55,0 | - | - | - | - | 0,5 |
| F6-202.2 | SS+Bew | 21,0 | 73,0 | 66,0 | 66,0 | - | - | - | - | 0,5 |
| F6-202.2 | SS+Bew+Dauerl | 22,1 | 70,0 | 69,0 | 67,0 | - | - | - | - | 0,5 |
| F6-202.2 | SS+Bew+Dauerl+VIB | 21,2 | 67,5 | 70,5 | 68,0 | - | - | - | - | 0,4 |
| SVB-300 | SS | 23,0 | - | - | - | 73,0 | 68,0 | 64,0 | 7,2 | 0,4 |
| SVB-300 | SS+Bew | 22,6 | - | - | - | 73,0 | 68,0 | 64,0 | 7,2 | 0,4 |
| SVB-301.2 | SS | 22,2 | - | - | - | 76,0 | 72,0 | 72,0 | 12,4 | 0,5 |
| SVB-301.2 | SS+Bew | 23,4 | - | - | - | 74,0 | 65,5 | 63,5 | 14,9 | 0,6 |
| SVB-302.2 | SS+Bew | 23,3 | - | - | - | 76,0 | 70,0 | 68,0 | 6,2 | 0,5 |
| SVB-303.2 | SS | 21,8 | - | - | - | 78,0 | 78,0 | 77,0 | - | 0,6 |
| SVB-303.2 | SS+Bew | 21,7 | - | - | - | 74,0 | 64,5 | 59,0 | 13,2 | 0,5 |
| SVB-304.2 | SS+Bew | 21,7 | - | - | - | 74,5 | 68,5 | 63,5 | 3,9 | 0,5 |

 Tabelle C-8:
 Frischbetoneigenschaften der in den Reibungsversuchen analysierten Betone

Die Ergebnisse der Prüfungen zum Erstarrungsverhalten enthält Tabelle C-9 sowie Tabelle C-10. In der Regel betrugen die Erstarrungszeiten der Betone nach Knetbeutelverfahren ca. 5,5 Stunden und nach Vicat-Test ca. 7,5 Stunden. Signifikante Überschreitungen dieser Erstarrungszeiten wurden bei Betonen festgestellt, deren Frischbetontemperatur deutlich unter 20°C lag (z. B. F6-202.2 (Temp10)), bei denen das Fließmittel in Kombination mit dem Zement erstarrungsverzögernd wirkte (F6-200.5 und SVB-300), bei denen der Stabilisierer erstarrungsverzögernd wirkte (SVB-303.2 und SVB-304.2) oder die erhöhte aufwiesen w/z-Werte (SVB-302.2 und SVB-304.2). Deutlich höhere Frischbetontemperaturen als 20°C hatten signifikant verringerte Erstarrungszeiten zu Folge.

Tabelle C-9: Erstarrungszeiten der in den Seitendruckversuchen analysierten Betone Image: Seitender S

| Versuch Nr. | Erstarrungszo Knetbeutelve | eiten nach rfahren | | Erstarrungsz Vicat-Test | Faktor | |
|----------------------|---|-------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|---|
| | t _{a,KB} (zerläuft- knetbar) | t _{knetbar,KB} | t _{E, KB} | t _{A, vicat} | t _{E, vicat} | t _{E,vicat} /t _{E,KB} |
| | [h] | [h] | [h] | [h] | [h] | [-] |
| | | | | | | |
| F5-102 | 2,0 | 2,3 | 4,8 | 6,6 | 8,2 | 1,7 |
| F5-102 (V4) | 2,0 | | 4,5 | 6,3 | 7,7 | 1,7 |
| F5-102.2 | 2,3 | 2,7 | 5,2 | 6,4 | 8,0 | 1,5 |
| F5-102.2 (NS) | 3,1 | | 4,8 | 5,5 | 6,5 | 1,4 |
| F5-102.2 (NS+VIB) | 3,5 | | 5,1 | 5,3 | 6,5 | 1,3 |
| F5-102.2 (NS+VIBd) | 4,7 | | 5,0 | 5,5 | 6,5 | 1,3 |
| F5-102.2 (NS+VVIB) | 2,0 | 2,5 | 5,0 | 6,8 | 7,8 | 1,6 |
| | | | | | | |
| F6-200 | 3,8 | 3,1 | 6,3 | 8,1 | 9,7 | 1,5 |
| F6-200 (Dauerl) | 2,0 | 2,5 | 5,3 | 6,5 | 8,2 | 1,6 |
| F6-200 (NS+VIBd) | 3,0 | 3,3 | 5,0 | 6,3 | 7,3 | 1,5 |
| F6-200 (V1) | 2,9 | 3,4 | 5,3 | 6,8 | 8,6 | 1,6 |
| F6-200 (V4) | 3,7 | 4,0 | 5,5 | 7,0 | 8,7 | 1,6 |
| F6-200 (V8) | 2,1 | 2,6 | 3,6 | 5,8 | 6,6 | 1,9 |
| F6-200 (NS+VIB+V1) | 4,2 | | 5,9 | 6,2 | 7,3 | 1,2 |
| F6-200 (NS+VVIB)) | 2,8 | 3,3 | 5,0 | 6,5 | 7,2 | 1,4 |
| F6-200.2 | 3,1 | 3,5 | 5,3 | 6,3 | 7,2 | 1,4 |
| F6-200.2 (NS) | 3,4 | 4,8 | 6,4 | 8,0 | 8,5 | 1,3 |
| F6-200.2 (NS+VIBd) | 3,9 | 4,6 | 6,9 | 7,7 | 8,3 | 1,2 |
| F6-200.2 (NS+VVIB) | 2,9 | 3,4 | 5,7 | Γ,Z | 8,2 | 1,4 |
| F6-200.3 | 1,7 | 2,2 | 4,2 | 5,4 | 0,0 | 1,0 |
| F6-200.4 | 3,3 | 3,0 | 5,0 | 0,5 | 0,0 | 1,2 |
| F6 201 | 7,0 | | 6.0 | 6.2 | 7 1 | 1,4 |
| F6-202 2 | 4,3 | 13 | 0,0 6,0 | 0,3 | 7,1 | 1,2 |
| F6-202.2 (Temp10) | 5.8 | -,0 6 3 | 8.5 | 10.0 | 11.3 | 1,0 |
| F6-202.2 (NS+VIBd) | 3,0 4 1 | 4.6 | 6,6 | 8.6 | 95 | 1,5 |
| F6-202.2 (NS+VVIB) | 4 1 | 4,0 | 6,0 | 8.9 | 9,6 | 1,4 |
| F6-202 2 (VIBd) | 4.3 | .,. | 5.8 | 5.7 | 6.8 | 1,0 |
| | 1,0 | | 0,0 | 0,1 | 0,0 | .,_ |
| SVB-300 | 4.1 | 4.6 | 6.3 | 6.1 | 7.9 | 1.3 |
| SVB-300 (NS+VIBd) | 4,5 | , - | 6,4 | 6,8 | 7,8 | 1,2 |
| SVB-301 | 3.3 | 3.8 | 5.5 | 6.2 | 7.7 | 1.4 |
| SVB-301a | 4,0 | 4,5 | 6,0 | 7,0 | 8,6 | 1,4 |
| SVB-301.2 | 3,5 | 4,0 | 5,5 | 6,8 | 7,8 | 1,4 |
| SVB-301.2 (NS+VIB) | 3,8 | | 5,5 | 5,5 | 7,0 | 1,3 |
| SVB-301.2 (NS+VIBd) | 3,8 | | 5,3 | 5,5 | 6,4 | 1,2 |
| SVB-302.2 | 3,5 | 4,0 | 6,3 | 7,3 | 9,0 | 1,4 |
| SVB-302.2 (NS+VIBd) | 4,0 | | 5,8 | 5,6 | 6,5 | 1,1 |
| SVB-303.2 | 2,1 | 3,1 | 5,9 | 8,6 | 10,1 | 1,7 |
| SVB-303.2 (NS+VIBd) | 4,0 | 4,5 | 7,6 | 9,5 | 10,5 | 1,4 |
| SVB-303.2a (NS+VIBd) | 5,2 | | 6,7 | 6,8 | 8,0 | 1,2 |
| SVB-304.2 | 2,7 | 3,7 | 8,0 | 11,0 | 12,5 | 1,6 |

| Versuch Nr. | | Erstarru | Faktor | | |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|---|
| Mischung Nr. | Randbedingung | t _{A,KB} | t _{E,KB} | t _{E,vicat} | t _{E,vicat} /t _{E,KB} |
| | | [h] | [h] | [h] | [-] |
| F5-102.2 | SS | 3,1 | 5,1 | 7,9 | 1,55 |
| F5-102.2 | SS+Bew | 3,1 | 5,2 | 8,2 | 1,59 |
| F5-102.2 | SS+Bew+Dauerl+VIB | 3,3 | 5,3 | 8,0 | 1,52 |
| F6-200.2 | SS | 4,3 | 6,9 | 10,0 | 1,46 |
| F6-200.2 | SS+Bew | 2,7 | 5,7 | 8,7 | 1,53 |
| F6-202.2 | SS | 2,8 | 5,6 | 8,8 | 1,56 |
| F6-202.2 | SS+Bew | 3,4 | 6,1 | 9,1 | 1,48 |
| F6-202.2 | SS+Bew+Dauerl | 3,5 | 6,1 | 9,1 | 1,48 |
| F6-202.2 | SS+Bew+Dauerl+VIB | 3,8 | 6,1 | 9,5 | 1,56 |
| SVB-300 | SS | 6,0 | 11,0 | 13,0 | 1,18 |
| SVB-300 | SS+Bew | 6,0 | 11,0 | 11,5 | 1,05 |
| SVB-301.2 | SS | 3,8 | 5,5 | 8,3 | 1,50 |
| SVB-301.2 | SS+Bew | 3,8 | 5,2 | 8,0 | 1,54 |
| SVB-302.2 | SS+Bew | 3,8 | 6,5 | 10,0 | 1,54 |
| SVB-303.2 | SS | 4,3 | 7,6 | 11,1 | 1,46 |
| SVB-303.2 | SS+Bew | 3,7 | 7,5 | 10,5 | 1,40 |
| SVB-304.2 | SS+Bew | 5,1 | 9,0 | 13,0 | 1,44 |

Tabelle C-10:Erstarrungszeiten der in den Reibungsversuchen analysierten
Betone

C.4.2 Seitendruckversuche

Der zeitliche Verlauf der gemessenen Horizontalspannungen in Abhängigkeit der Vertikalbelastung und sowie der zugehörige Seitendruckbeiwert λ ist in Bild C-22 beispielhaft für den Versuch SVB-301.2 dargestellt (Ergebnisse aller durchgeführten Versuche enthalten die Anlagen). Der Seitendruckbeiwert λ ist der Quotient aus mittlerer Horizontalspannung und zugehöriger mittlerer Vertikalspannung an der Oberseite der Betonprobe.

$$\lambda = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \tag{C-14}$$

Gut ersichtlich ist in Bild C-22 der stufenförmige Verlauf der Vertikalspannungen, wobei der mittele Anstieg in etwa einer Betoniergeschwindigkeit vom 2 m/h bei einer Betonwichte von 25 kN/m³ entspricht. Der aus der Vertikalbelastung resultierende Horizontaldruck weist zunächst ein hydrostatisches Verhalten auf. Nach einer Stunde ist jedoch bereits ein deutliches Abweichen des Horizontaldrucks von diesem Verlauf festzustellen, was auf einen zunehmenden Aufbau des inneren Verformungswiderstandes des Frischbetons hindeutet. Der Maximalwert des Frischbetondrucks von ca. 100 kN/m² wird näherungsweise bereits zum Zeitpunkt des Erstarrungsbeginns nach Knetbeutelverfahren nach 3,5 h erreicht.

Der Seitendruckbeiwert λ beschreibt beim Versuch SVB-301.2 einen stetig abfallenden Verlauf, nähert sich jedoch mit zunehmender Zeit einem Grenzwert größer Null an.



Bild C-22: Verlauf der gemessenen Horizontalspannungen in Abhängigkeit der Zeit und der Vertikalbelastung sowie der zugehörige Seitendruckbeiwert λ beim Versuch SVB-301.2

Bei den Versuchen mit Erschütterungswirkung (vgl. Beispiel SVB-301.2 (NS+VIBd) in Bild C-23) weist der Horizontaldruck im Gegensatz zum Versuch ohne Erschütterungen über einen vergleichsweise langen Zeitraum hydrostatisches Verhalten auf. Erst im Bereich des Erstarrungsbeginns nach Knetbeutelverfahren weichen die Druckwerte deutlich vom hydrostatischen Verhalten ab. Eine nachgebende Schalung vorausgesetzt, erreicht der Horizontaldruck hier gleichzeitig seinen Maximalwert, der deutlich höher ist als bei den Versuchen ohne Erschütterungswirkung.



Bild C-23: Verlauf der gemessenen Horizontalspannungen in Abhängigkeit der Zeit und der Vertikalbelastung sowie der zugehörige Seitendruckbeiwert λ beim Versuch SVB-301.2 (NS+VIBd)

In Tabelle C-11 sind die ermittelten Horizontaldrücke aller maximalen der Seitendruckversuche zusammengefasst. Zu Vergleichbarkeit besseren Versuchsergebnisse wurde der bezogene maximale Frischbetondruck $\lambda_{tot,E}$ ausgewiesen, wobei $\sigma_{h,max}$ der maximal gemessene horizontale Frischbetondruck ist, v die simulierte Betoniergeschwindigkeit (Steiggeschwindigkeit), γ_c die Frischbetonwichte und t_E das Erstarrungsende des Betons.

$$\lambda_{tot,E} = \frac{\sigma_{h,max}}{\gamma_c \cdot t_E \cdot \nu} \tag{C-15}$$

Der Wert $\lambda_{tot,E}$ kann sowohl auf das Erstarrungsende nach Vicat $t_{E,vicat}$ sowie das Erstarrungsende nach Knetbeutelverfahren $t_{E,KB}$ bezogen werden. Die entsprechenden bezogenen maximalen Frischbetondrücke $\lambda_{tot,E,vivat}$ und $\lambda_{tot,E,KB}$ aller durchgeführten Versuche sind in Tabelle C-11 zusammengefasst.

Tabelle C-11:Gemessener bezogener maximaler horizontaler Frischbetondruck
der in den Seitendruckversuchen analysierten Betone

| Versuch Nr. | maximaler gemessener | $\phi_{\text{tot,E}}$ bezogen auf Erstarrungsende | | | | | | |
|----------------------------------|------------------------------|---|--------------|-------------------|--------------|----------|--|------------|
| | borizontalor nach Vicat Tast | | | | | | | Knetheutel |
| | Frisch- | Tiden vical-rest | | | | | | verfahren |
| | betondruck | | | | | | | Venamen |
| | ф. | ф. — . | φ | φ | φ | sonstige | | ф |
| | Ψh,max | Ψtot,E,vicat | Ψtot,E,vicat | Ψtot,E,vicat | Ψtot,E,vicat | oonougo | | Ψtot,E,KB |
| | | | (Statisch) | (NO+ VIB/VIBd) | oder (VIBd) | | | |
| | | | | | | | | |
| | [kN/m²] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] | | [-] |
| | | | | | | | | |
| F5-102 | 99 | 0,25 | 0,25 | | | | | 0,44 |
| F5-102 (V4) | 191 | 0,26 | 0,26 | | | | | 0,47 |
| F5-102.2 | 96 | 0,25 | 0,25 | | | | | 0,40 |
| F5-102.2 (NS) | 54 | 0,18 | 0,18 | | | | | 0,25 |
| F5-102.2 (NS+VIB) | 113 | 0,38 | | 0,38 | | | | 0,49 |
| F5-102.2 (NS+VIBd) | 137 | 0,45 | | 0,45 | | | | 0,60 |
| F5-102.2 (NS+VVIB) | 216 | 0,57 | | | 0,57 | | | 0,91 |
| | | | | | | | | |
| F6-200 | 114 | 0,25 | 0,25 | | | | | 0,39 |
| F6-200 (Dauerl) | | | | | | 0,67 | | |
| F6-200 (NS+VIBd) | 111 | 0,32 | | 0,32 | | | | 0,47 |
| F6-200 (V1) | 39 | 0,19 | 0,19 | | | | | 0,32 |
| F6-200 (V4) | 174 | 0,22 | 0,22 | | | | | 0,36 |
| F6-200 (V8) | 355 | 0,28 | 0,28 | | | | | 0,55 |
| F6-200 (NS+VIB+V1) | 79 | 0,47 | | 0,47 | | | | 0,59 |
| F6-200 (NS+VVIB)) | 203 | 0,61 | | | 0,61 | | | 0,90 |
| F6-200.2 | 87 | 0,27 | 0,27 | | | | | 0,39 |
| F6-200.2 (NS) | 64 | 0,16 | 0,16 | | | | | 0,21 |
| F6-200.2 (NS+VIBd) | 164 | 0,41 | | 0,41 | | | | 0,50 |
| F6-200.2 (NS+VVIB) | 233 | 0,60 | | | 0,60 | | | 0,89 |
| F6-200.3 | 76 | 0,24 | 0,24 | | | | | 0,41 |
| F6-200.4 | 104 | 0,32 | 0,32 | | | | | 0,40 |
| F6-200.5 | 203 | 0,26 | 0,26 | | | | | 0,37 |
| F6-201 | 100 | 0,30 | 0,30 | | | | | 0,36 |
| F6-202.2 | 120 | 0,29 | 0,29 | | | | | 0,44 |
| F6-202.2 (Temp10) | 141 | 0,26 | 0,26 | | | | | 0,35 |
| F6-202.2 (NS+VIBd) | 186 | 0,41 | | 0,41 | | | | 0,59 |
| F6-202.2 (NS+VVIB) | 267 | 0,58 | | | 0,58 | | | 0,93 |
| F6-202.2 (VIB0) | 187 | 0,58 | | | 0,58 | | | 0,69 |
| SV/P 200 | 100 | 0.25 | 0.25 | | | | | 0.44 |
| SVB-300 | 120 | 0,35 | 0,35 | 0.46 | | | | 0,44 |
| SVB-300 (NS+VIBU) | 107 | 0,40 | 0.27 | 0,40 | | | | 0,38 |
| SVB-301 | 90 | 0,27 | 0,27 | | | | | 0,40 |
| SVB-301 2 | 104 | 0,20 | 0,20 | | | | | 0,39 |
| SVB-301.2 SVB-301.2 (NS+\/IB) | 109 | 0,24 | 0,24 | 0.34 | | | | 0,33 |
| SVB-301.2 (NS+VID) | 109 | 0,34 | | 0,34 | | }} | | 0,44 |
| SVB-301.2 (NOTVIDU) | 133 | 0,47 | 0.26 | 0,47 | | }} | | 0,30 |
| SVB-302.2 (NS+\/IBd) | 120 | 0,20 | 0,20 | 0.45 | | | | 0,42 |
| SVB-302.2 (NOTVIDU) | 134 | 0,45 | 0.25 | 0,45 | | | | 0,51 |
| SVB-303.2 (NS+\/IBd) | 202 | 0,23 | 0,23 | 0.41 | | | | 0,40 |
| SVB-303 2a (NS+V/IBd) | 124 | 0.34 | | 0.34 | | | | 0,38 |
| SVB-304.2 | 136 | 0.23 | 0.23 | 0,04 | | | | 0.37 |
Einen grafischen Überblick über die maximalen horizontalen Frischbetondrücke gibt Bild C-24. Hierbei ist der Horizontaldruck differenziert nach der Konsistenzklasse sowie der Erschütterungsintensität in Abhängigkeit des Produktes von simulierter Betoniergeschwindigkeit v und Erstarrungsende nach Vicat $t_{E,vicat}$ (abzüglich des Zeitraums zwischen Wasserzugabe und Betoneinbau) dargestellt. Neben den Messwerten gibt Bild C-24 den charakteristischen Wert des Frischbetondrucks nach E DIN 18218:2008-01 wieder.

Es zeigt sich, dass der Frischbetondruck bei den Standardversuchen (starre Schalung, ohne von nachträgliche Vibrationsbeanspruchung) weitestgehend unabhängig der Konsistenzklasse näherungsweise linear mit dem Produkt von Betoniergeschwindigkeit und Erstarrungsende $v \cdot t_{E,vicat}$ ansteigt. Insbesondere bei den Versuchen mit Betonen der Konsistenzklasse F5 und F6 waren - unter gleichen Randbedingungen - keine signifikanten Druckverhalten festzustellen. Dies ist insbesondere Unterschiede im darauf zurückzuführen, dass die Mischungsrezepturen der Betone F5 und F6 bis auf die Fließmittelmenge identisch waren. Die erforderliche höhere Fließmittelmenge bzw. die höhere Fließfähigkeit bei den F6-Betonen bewirkte zwar z.T. einen höheren Frischbetondruck. Jedoch ergab sich infolge eines späteren Erstarrungsendes bei den F6-Betonen ähnliche $\lambda_{tot,E}$ -Werte. Es ist allerdings zu beachten, dass in der Praxis die Mischungszusammensetzungen der F5- und F6-Betone deutlich von den in diesem Vorhaben verwendeten Modellrezepturen abweichen können.

Festgestellt wurde des Weiteren ein signifikanter Einfluss der Intensität der dynamischen Anregung. Bei Erschütterungen durch Pendelschlag erhöhten sich die Druckwerte gegenüber dem statischen Wert um bis zu 50 %. Beim Einsatz des Schalungsrüttlers ergaben sich sogar um bis zu 100 % höhere die Horizontaldrücke. Demgegenüber war bei den Versuchen mit nachgebender Schalung und gleichzeitigem Verzicht auf Erschütterungswirkungen eine deutliche Minderung des maximalen Frischbetondrucks auf ca. 2/3 der Werte des Standardversuchs festzustellen.

Die Ergebnisse zum Frischbetondruck bei Erschütterungseinwirkung wurden durch die im Rahmen des Teilprojektes D durchgeführten Kleinkörperversuche sowie den Großversuch bestätigt. Festgestellt wurde in diesen Untersuchungen eine mögliche Wiederverflüssigung des SVB (hin zum hydrostatischen Wert) bis zum Zeitpunkt 0,56 · $t_{E,KB}$ und damit ein $\lambda_{tot,E,KB}$ –Wert von mindestens 0,56.

Ein Vergleich mit den Angaben nach DIN 18218:2008-01 (vgl. Bild C-24 und Bild C-25) zeigt, dass bei allen Konsistenzklassen die Messwerte bei statischer Last stets unterhalb der Normenwerte liegen. Die Druckwerte bei Erschütterungswirkung durch Pendelschlag liegen unterhalb der Normwerte, vorausgesetzt eine nachgebende Schalung wurde simuliert. Lediglich bei einem Beton der Konsistenzklasse F5 wurden um 25 % höhere Werte festgestellt. Es ist jedoch zu beachten, dass die im tatsächlichen Bauteil auftretenden druckmindernden Effekte aus dem Siloeffekt in den Messergebnissen nicht enthalten sind. Im Falle von starken nachträglichen Vibrationen wird der zugehörige normative obere Grenzwert (hydrostatisch bis t_E) stets unterschritten.



Bild C-24: Gemessener maximaler horizontaler Frischbetondruck und Vergleich mit Angaben in E DIN 18218:2008-01 auf Basis des Erstarrungsendes nach Vicat



Bild C-25: Gemessener bezogener maximaler horizontaler Frischbetondruck $\lambda_{tot,E,vicat}$ und Vergleich mit Angaben in E DIN 18218:2008-01 auf Basis des Erstarrungsendes nach Vicat

In Bild C-26 sind die ermittelten Messwerte den charakteristischen Druckwerten nach E DIN 18218:2008-01 unter Verwendung des Erstarrungsendes nach Knetbeutelverfahren gegenübergestellt. Bei den Versuchen mit den Konsistenzklassen F6 und SVB entsprechen die Messwerte bei Erschütterungseinwirkung in etwa den Rechenwerten und liegen bei den statischen Versuchen noch deutlich darunter. Im Gegensatz dazu zeigen die Versuche mit Betonen der Konsistentklasse F5 und Erschütterungswirkung ein Überschreiten der Normwerte. Wie bereits erwähnt, treten jedoch im tatsächlichen Bauteil unter anderem aufgrund des hier nicht berücksichtigten Siloeffektes geringere Drücke auf.



Bild C-26: Gemessener maximaler horizontaler Frischbetondruck und Vergleich mit Angaben in E DIN 18218:2008-01 auf Basis des Erstarrungsendes nach Knetbeutelverfahren

Aus den im Versuch ermittelten Verläufen des Seitendruckbeiwertes kann der, für die Berechnung des Frischbetondrucks mit bodenmechanischen Verfahren erforderliche, Winkel der inneren Reibung φ ermittelt werden. Eine Berechnung von φ ist im Falle der Versuche mit nachgebender Schalung nach dem in [C-16] unterbreiteten Vorschlag möglich. Eine im Beton tatsächlich vorhandene Kohäsionswirkung *c* ist im Reibungswinkel φ_{ges} bereits enthalten.

$$\varphi_{ges} = 2 \cdot \left(-\arctan\left(\sqrt{\lambda}\right) + \frac{\pi}{4} \right) \tag{C-16}$$

C.4.3 Reibungsversuche

In Bild C-27 ist der Verlauf der ermittelten Schubspannungen zwischen Frischbeton und Schalungsschwert τ_m in Abhängigkeit der gemessenen Vertikalund Horizontalspannungen und der Auszugsgeschwindigkeit σ_{v} bzw. σ_h des Schalungsschwertes v_A bzw. des Auszugsweges am Beispiel der Rezeptur SVB-302.2 (SS+Bew) dargestellt. Die mittlere Schubspannung τ_m wurde nach folgender Gleichung ermittelt.

$$\tau_m = \frac{F_P - F_N}{\left(A_{R,h} + A_{R,\nu}\right)} \tag{C-17}$$

mit

| F_P | gemessene | Auszugskraft am | Schalungsschwert |
|-------|-----------|-----------------|------------------|
|-------|-----------|-----------------|------------------|

 F_N gemessene Auszugskraft im Nullversuch





Bild C-27: Verlauf der Schubspannungen und des Reibungsweges in Abhängigkeit der Versuchszeit im Betonalter von ca. 120 min bei Versuch SVB-302.2 (SS+Bew)

Ersichtlich sind in Bild C-27 die unterschiedlichen Laststufen zum Prüfzeitpunkt *t* ca. 120 min. Je Laststufe wird während des Ausziehvorgangs mit der Auszugsgeschwindigkeit von $v_A = 5$ mm/min die maximal mögliche Schubspannungen erreicht. In der Regel konnte nicht zwischen einer Haft- und Gleitreibung differenziert werden. Da durch die Vertikallaststeigerung die Kontaktzone zwischen Frischbeton und Schalungsoberfläche signifikant gestört wurde, ist der Haftanteil in diesem Fall als sehr gering einzuschätzen.

Der mittlere Reibungsbeiwert μ wurde entsprechend Gleichung (C-18) über die Auszugskraft am Schalungsschwert sowie die zugehörigen Normalspannungen und die Netto- Reibungsflächen ermittelt. Der Reibungsbeiwert μ berücksichtigt auch mögliche Reibungswiderstände infolge Kohäsion bzw. Adhäsion; daher ist dieser als Gesamtreibungsbeiwert aufzufassen.

$$\mu = \frac{F_P - F_N}{\left(\sigma_v \cdot A_{R,h} + \sigma_h \cdot A_{R,v}\right)}$$
(C-18)
mit

$$\sigma_v \qquad \sigma_v = \frac{\left(F_v + F_{v0}\right)}{A_0}$$
Vertikalspannung in Schalungsmitte

$$\sigma_h \qquad \sigma_h = \frac{\left(F_{h,l} / A_l + F_{h,r} / A_r\right)}{2}$$
mittlere Horizontalspannung

$$F_v \qquad$$
Vertikalkraft aus Prüfmaschine

$$F_{v0} \qquad$$
Vertikalkraft aus Frischbeton und Lastverteilungsplatten

$$A_0 \qquad$$
effektive horizontale Querschnittsfläche des Schalkastens

$$F_{h,l}; F_{h,r} \qquad$$
gemessene Horizontalkraft links und rechts

$$A_l ; A_r \qquad$$
Effektive Querschnittsfläche der entkoppelten Seitenfenster

Den Verlauf des Reibungsbeiwertes μ nach Gleichung (C-18) in Abhängigkeit der Prüfzeit und des Auszugsweges zeigt Bild C-28 bzw. Bild C-29. Es wird deutlich, dass sich der Reibungswiderstand nach Abschluss des Ausziehvorgangs reduziert und im weiteren Verlauf einen nahezu konstanten Wert erreicht. Der maximale Reibungsbeiwert während des Auszugsvorgangs wird nachfolgend mit μ_{dyn} bezeichnet und der Wert 30 s nach Abschluss des Ausziehvorgangs mit μ_{stat} .

Da in einer realen Schalung die Schergeschwindigkeit zwischen dem Frischbeton und der Oberfläche als sehr gering einzuschätzen ist, wurde für die weiteren Untersuchungen stets dieser "Plateauwert" μ_{stat} verwendet. Der zugehörige Abzugswert aus dem Nullversuch ist ebenfalls konstant. Die Schubspannungen und Reibungsbeiwerte aller Versuche am Frischbeton enthält der Anhang. Die Verringerung der Schubspannungen im Ruhezustand ($v_A = 0$) ist vor allem auf die plastische Viskosität des Frischbetons (Reibungswiderstand infolge einer Schergeschwindigkeit) sowie auf Relaxationsvorgänge im Frischbeton zurückzuführen.



Bild C-28: Verlauf des Reibungsbeiwertes in Abhängigkeit der Versuchszeit und der Vertikal- und Horizontalspannungen im Betonalter von ca. 120 min bei Versuch SVB-302.2 (SS+Bew)



Bild C-29: Verlauf des Reibungsbeiwertes in Abhängigkeit des Reibungsweges und der Horizontalspannung im Betonalter von ca. 120 min bei Versuch SVB-302.2 (SS+Bew)

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse zum Reibungsbeiwert μ von SVB bei der 2. Laststufe ($\sigma_v = 85 \text{ kN/m^2}$) in Abhängigkeit der Zeit nach Betoneinbau *t* bietet Bild C-30. Es zeigen sich deutliche Unterschiede in der Entwicklung des Reibungswiderstandes zwischen den Versuchen bei reiner Oberflächenreibung (SS) und den Versuchen mit Bewehrung (SS+Bew). Zum sehr frühen Prüfzeitpunkt wurden bei fast allen Versuchen noch sehr geringe Reibungswiderstände $\mu \le 0,01$ ermittelt. Abweichend ergab der Versuch SVB-303.2 (SS+Bew) einen deutlich höheren Reibungswiderstand von $\mu \approx 0,02$.

Im weiteren Verlauf stiegen die Reibungsbeiwerte bei den Versuchen ohne Bewehrung nur sehr gering an, obwohl der Beton ein deutliches Ansteifen bzw. die Erhöhung des inneren Reibungswiderstandes aufwies. Lediglich beim Versuch SVB-303.2 (SS) war nach ca. 1,5 Stunden ein signifikanter Anstieg auf $\mu \approx 0,025$ festzustellen. Die geringe Erhöhung des Reibungsbeiwertes im Verlauf der Zeit resultiert aus der Leimschicht, die sich in der Kontaktzone Frischbeton-Schalungsoberfläche ausbildet und als Schmierschicht fungiert, vgl. [C-16]. Die Leimschicht hält über einen sehr langen Zeitraum ihre hohe Fließfähigkeit aufrecht. Erst im Bereich des Erstarrungsbeginns erhöht sich der Reibungswiderstand signifikant.



Bild C-30: Entwicklung des statischen Reibungsbeiwertes bei den Versuchen mit SVB

Bei den Versuchen mit Bewehrung zeigte sich im Gegensatz zu der reinen Oberflächenreibung zum Teil bereits nach 30 Minuten ein deutlicher Anstieg des Reibungswiderstandes. Aus Bild C-30 ist ersichtlich, dass sich der zeitliche Verlauf des Reibungsbeiwertes zwischen den einzelnen Versuchen signifikant unterscheiden kann. Tendenziell weisen die selbstverdichtenden Betone mit geringerem Leimgehalt einen höheren Reibungsbeiwert auf. Des Weiteren zeigte sich, dass bei Betonen mit längeren Erstarrungszeiten (Rezeptur SVB-300) der Anstieg des Reibungsbeiwerts moderater ausfällt. In Bild C-31 sind die gemessenen Reibungsbeiwerte in Abhängigkeit der - auf das Erstarrungsende - bezogenen Zeit $t/t_{E,KB}$ (Erstarrungsende nach Knetbeuteltest abzüglich

des Zeitraums zwischen Wasserzugabe und Betoneinbau) dargestellt. Betone mit gleichem Leimvolumen zeigen nun näherungsweise den gleichen Verlauf des Reibungswiderstandes. Bei ca. 400 l Leimvolumen wird zum Zeitpunkt $t/t_{E,KB} \approx 0,3$ ein Reibungsbeiwert von $\mu = 0,05$ erreicht. Demgegenüber tritt bei 333 l und 388 l Leim dieser Reibungswiderstand bereits bei $t/t_{E,KB} \approx 0,07$ bzw. $t/t_{E,KB} \approx 0,14$ auf. Entsprechende Auswirkungen auf den Frischbetondruck sind zu erwarten und wurden durch die im Teilprojekt A durchgeführten Druckmessungen an den Wandbauteilen bestätigt (siehe auch Kapitel C.5.2).



Bild C-31: Entwicklung des statischen Reibungsbeiwertes bei den Versuchen mit SVB in Abhängigkeit der bezogenen Zeit $t/t_{E,KB}$

Den Versuchsergebnissen sind in Bild C-32 die von Proske [C-16] veröffentlichten zeitlichen Verläufe des Reibungswiderstandes von Selbstverdichtendem Betonen gegenübergestellt, wobei ein Verhältnis $t_{E,vicat} / t_{E,KB} = 1,25$ vorausgesetzt wird. Der angegebene Mittelwert liegt in der Regel unterhalb der Versuchsergebnisse mit Bewehrung. Dies ist damit zu erklären, dass in [C-16] vor allem Betone mit vergleichsweise hohem Leimgehalt analysiert wurden. Die 5%-Quantilwerte der Versuchsergebnisse mit Bewehrung werden durch Gleichung (C-12) sehr gut charakterisiert.

Wird als Referenzwert nicht das Erstarrungsende nach Knetbeuteltest $t_{E,KB}$ sonders nach Vicat-Test $t_{E,vicat}$ herangezogen, ergeben sich größere Abweichungen der Reibungsbeiwerte bei gleichem Leimgehalt (vgl. Bild C-33). Der Ansatz des Knetbeuteltests als Referenzverfahren erscheint daher zur Analyse des Reibungsverhaltens als vorteilhafter.



Bild C-32:Vergleich der ermittelten Reibungsbeiwerte bei den Versuchen mit
SVB mit dem Berechnungsansatz nach Proske [C-16]



Bild C-33:Entwicklung des statischen Reibungsbeiwertes bei den Versuchen mit
SVB in Abhängigkeit der bezogenen Zeit $t/t_{E,vicat}$

In Bild C-34 und Bild C-35 sind den statischen Reibungsbeiwerten μ_{stat} die dynamischen Reibungsbeiwerte μ_{dyn} gegenübergestellt. Festzustellen sind deutlich höhere Reibungswiderstände infolge der Schalungstranslation. Dies gilt gleichermaßen für die Versuche mit und ohne Bewehrung.



Bild C-34: Entwicklung des statischen und dynamischen Reibungsbeiwertes bei den Versuchen mit SVB (unbewehrt) in Abhängigkeit der bezogenen Zeit $t/t_{E,KB}$



Bild C-35: Entwicklung des statischen und dynamischen Reibungsbeiwertes bei den Versuchen mit SVB (bewehrt) in Abhängigkeit der bezogenen Zeit $t/t_{E,KB}$

Die Ergebnisse der Reibungsversuche an den Betonen der Konsistenzklassen F5 und F6 sind in Bild C-36 bzw. Bild C-37 dargestellt. Prinzipiell ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zum Reibungsverhalten von SVB. Unter Berücksichtigung des Leimgehaltes wurden bei den Rüttelbetonen sogar etwas geringere Reibungswiderstände gemessen als bei SVB. Vermutlich bewirken die beim Betoneinbau entstehenden Vibrationen eine Vergrößerung des Leimanteils im Kontaktbereich des Frischbetons und der Schalungsoberfläche bzw. Bewehrung und somit eine Verringerung der des Reibungswiderstandes.



Bild C-36: Entwicklung des statischen Reibungsbeiwertes bei den Versuchen mit Betonen der Konsistenzklasse F5 in Abhängigkeit der bezogenen Zeit $t/t_{E,KB}$

Zusätzlich zu den Standardversuchen wurde der Einfluss von Vibrationen während des Prüfablaufs untersucht. Wurden die Erschütterungen kurz vor den Reibungsversuchen durchgeführt, reduzierten sich die Reibungswiderstände gegenüber den Versuchen ohne Erschütterungen um bis zu 70% (vgl. Bild C-37). Bei einer Erschütterungswirkung im Anschluss an den Ausziehvorgang verminderten sich die festgestellten Reibungsbeiwerte auf Werte von $\mu \approx 0$. Das heißt, der Reibungswiderstand wurde fast vollständig aufgehoben. Allerdings bestand die Möglichkeit durch eine weitere Relativverschiebung der Schalung den ursprünglichen Reibungswiderstand wieder zu erreichen.

Bild C-38 ermöglicht einen Vergleich zwischen den Reibungswiderständen von SVB und den Betonen der Konsistenzklasse F5 und F6 bei einer Differenzierung hinsichtlich Leimvolumen. Während bei SVB ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Leimgehalt und Reibungswiderstand festzustellen ist, weisen die Reibungsbeiwerte beim Rüttelbeton deutliche Streuungen auf. Allerdings liegen die Reibungsbeiwerte mit Bewehrung (SS+Bew) stets deutlich oberhalb des reinen Oberflächenreibungswiderstandes (SS).



Bild C-37: Entwicklung des statischen Reibungsbeiwertes bei den Versuchen mit Betonen der Konsistenzklasse F6 in Abhängigkeit der bezogenen Zeit $t/t_{E,KB}$



Bild C-38: Reibungsbeiwert in Abhängigkeit des Leimgehaltes des Betons zum Zeitpunkt $0,3 t/t_{E,KB}$

C.4.4 Verformungsverhalten des Frischbetons

C.4.4.1 Kompressionsversuche

Die in den Untersuchungen ermittelten Kompressionsmodule sind in Tabelle C-12 zusammengestellt. Der Kompressionsmodul (Sekantenmodul) E_{css} des Frischbetons kann aus dem Quotienten der jeweiligen Längsspannungs- und Längsdehnungsdifferenz $\Delta \sigma$ bzw. $\Delta \varepsilon$ ermittelt werden. Im Anhang Tabelle C-A10 sind die in den Kompressionsversuchen ermittelten Messwerte zusammengestellt.

$$E_{css} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$
(C-19)

| Versuch | FM | Luft- | Probe | Proben- | a/sm | Zeitpunkt | | E_{css} [kN/m ²] | | | |
|----------|--------|--------|-------|---------|------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|--------------|---------------------------|--|
| | [l/m³] | gehalt | | höhe | [cm] | nach Belastung $\Delta \sigma$ | | | | | |
| | | [%] | | | | zugabe [h] | 25 kN/m² | 100 kN/m² | 250 kN/m² | 1000 kN/m ² | |
| | | | P1 | 160,0 | 68,0 | 0,42 | -7143 | -8939 | -19802 | -32990 | |
| F6-202.2 | 2,90 | 2,0 | P2 | 156,0 | 64,0 | 1,00 | -6000 | -9455 | -14182 | | |
| | | | P3 | 160,5 | 55,0 | 2,00 | -8025 | -10031 | -17446 | | |
| | | | | | | | | | | | |
| SVB-300 | 4,38 | 1,8 | P2 | 154,0 | 70,5 | 1,00 | -9625 | -13162 | -19845 | | |
| | | | P3 | 163.0 | 49.5 | 4.42 | -6269 | -9939 | -17050 | | |

Tabelle C-12: Kompressionsmodule des Frischbetons

Nachfolgend sollen die gemessenen Kompressionsmodule mit den Kompressionsmodulen verglichen werden, die sich unter der Annahme einer ausschließlichen Komprimierung des im Frischbeton befindlichen Luftgehaltes ergeben. Dazu sind die folgenden Zusammenhänge heranzuziehen.

$$\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{V}_1 = \boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{V}_2 \tag{C-20}$$

Dabei entspricht P_1 dem atmosphärischen Druck von einem Bar bzw. 100 kN/m² und V_1 dem zugehörigen Luftporengehalt. Der Gesamtdruck P_2 beinhaltet den atmosphärischen Druck und den zusätzlich aufgebrachten Druck. Aufgelöst nach V_2 erhält man den zur jeweiligen Belastung zugehörigen Luftporengehalt.

$$\mathbf{V}_2 = \frac{\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{V}_1}{\boldsymbol{\sigma}_2} \tag{C-21}$$

Die Dehnungsdifferenz $\Delta \varepsilon$ errechnet sich aus der Differenz beider Luftporengehalte.

$$\Delta \varepsilon = \mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2 \tag{C-22}$$

Aus dem zugehörigen Spannungswert $\Delta \sigma$ und der Dehnung $\Delta \varepsilon$ ergibt sich wiederum der Kompressionsmodul E_{css} (Sekantenmodul) zu:

$$E_{css} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{V_1 - V_2}$$
(C-23)

In Tabelle C-13 sind die ermittelten Kompressionsmodule bei Annahme der alleinigen Komprimierung des Luftporenraums zusammengefasst.

Tabelle C-13:Kompressionsmodule bei alleiniger Komprimierung des
Luftporenraumes

| Δσ | | | 25 kN/m² | | 100 kN/m ² | | | 250 kN/m ² | | | |
|----------|--|---|-----------------------|-----------|--|-----------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------|-----------|--|
| Versuch | Luft- gehalt V ₁ [-] | Atmos- phären- druck σ _{at} [kN/m ²] | V ₂ [-] | Δε [-] | E _{css} [kN/m ²] | V ₂ [-] | Δε [-] | E _{css} [kN/m²] | V ₂ [-] | Δε [-] | E _{css} [kN/m ²] |
| F6-202.2 | 0,020 | 100 | 0,016 | 0,0040 | 6250 | 0,010 | 0,0100 | 10000 | 0,006 | 0,0143 | 17500 |
| SVB-300 | 0,018 | 100 | 0,014 | 0,0036 | 6944 | 0,009 | 0,0090 | 11111 | 0,005 | 0,0129 | 19444 |

Vergleicht man die Kompressionsmodule resultierend aus der Komprimierung des Luftporenraumes mit den Ergebnissen aus den durchgeführten Versuchen, so ist zu erkennen, dass die Werte in etwa übereinstimmen.

Dass das Kompressionsvermögen des Frischbetons in jungem Betonalter weitestgehend vom Luftporengehalt des Betons beeinflusst wird, verdeutlicht ebenfalls Bild C-39 in dem die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aus Versuch und Berechnungsansatz dargestellt sind.



Bild C-39: Spannungs-Dehnungs-Beziehung im Kompressionsversuch und theoretischer Verlauf bei Komprimierung des Luftporenraums

Bei bekanntem Luftporengehalt des Frischbetons kann nun der Kompressionsmodul des Frischbetons in Abhängigkeit vom jeweils einwirkenden Gesamtdruck ermittelt werden. In Bild C-40 ist der Verlauf sowohl des Sekantenmoduls E_{css} als auch des Tangentenmoduls E_{cst} für einen Frischbeton mit einem Luftporengehalt (unter Atmosphärendruck) von 2 % dargestellt. Der Tangentenmodul wird hierbei durch Gleichung (C-25) beschrieben.

Aus

$$\sigma_2 = \frac{V_1 \cdot \sigma_1}{V_2} \tag{C-24}$$

und dessen Ableitung

$$\sigma_2(V_2)' = E_{cst} = \frac{V_1 \cdot \sigma_1}{(V_2)^2}$$
(C-25)

ergibt sich mit

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot \sigma_1}{\sigma_2} \tag{C-26}$$

 E_{cst} zu

$$E_{cst} = \frac{(\sigma_2)^2}{\sigma_1 \cdot V_1} = \frac{(\sigma_2)^2}{\sigma_{at} \cdot V_{at}} = \frac{(\sigma_2)^2}{100 \cdot V_{at}} \quad \text{[kN/m^2]}.$$
 (C-27)



Bild C-40: Zusammenhang zwischen Gesamtdruck (Atmosphärendruck + Überdruck) und Kompressionsmodul (als Sekanten- und Tangentenmodul) des Frischbetons

C.4.4.2 <u>Oberflächensetzung</u>

Aus den gemessenen Oberflächensetzungen s_{setz} wurden die Schwinddehnungen ε_c des Frischbetons im sehr jungen Betonalter vereinfacht mit folgender Beziehung abgeschätzt und deren zeitlicher Verlauf in Bild C-41 dargestellt.

$$\varepsilon_c = -\frac{s_{setz}}{200 \ mm} \quad [-] \tag{C-28}$$

Es zeigt sich ein starkes Schwinden insbesondere zum Zeitpunkt kurz nach Messbeginn. Im weiteren Verlauf schwächt sich der Schwindverlauf ab. Zum Zeitpunkt des Erstarrungsendes weisen die Betone Schwindverkürzungen von 0,0015 bis 0,0025 auf. Die ermittelten Ergebnisse bestätigen das in [C-17] dokumentierte Schwindverhalten von SVB.



Bild C-41: Frühschwinden ab einem Betonalter von 30 min bis zum Erstarrungsende des Betons nach Knetbeutelverfahren

Die großen Schwindverformungen im Zeitraum kurz nach Messbeginn können neben den chemischen Reaktionen auch auf die verzögerte Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen zurückgeführt werden.

C.5 Modellbildung (Teil C2)

C.5.1 Modellentwicklung

Die Erarbeitung eines neuen Berechnungsmodells zur Bestimmung der Schalungsbelastung durch fließfähige Betone basiert auf den durchgeführten experimentellen Versuchen zur Entwicklung des Seitendruckbeiwerts bzw. des horizontalen Frischbetondrucks in Abhängigkeit der Vertikalbelastung. Zunächst wird der Betoneinbau von "oben" betrachtet. Aus den Versuchen wurde der bezogene maximale Frischbetondruck $\lambda_{tot,E,vicat}$ abgeleitet, wobei $\sigma_{h,max}$ der maximal gemessene horizontale Frischbetondruck ist, v die simulierte Betoniergeschwindigkeit (Steiggeschwindigkeit), γ_c die Frischbetonwichte und $t_{E,vicat}$ das Erstarrungsende des Betons ermittelt mit Vicat-Test entsprechend DIN EN 480-2:2006-11.

$$\lambda_{tot,E,vicat} = \frac{\sigma_{h,max}}{\gamma_c \cdot t_{E,vicat} \cdot \nu}$$
(C-29)

Für die Berechung des Frischbetondrucks wird vorgeschlagen, den bezogenen Frischbetondruck $\lambda_{tot,E,vicat}$ innerhalb der Konsistenzklasse nicht als konstant anzunehmen, sondern in Abhängigkeit der Höhe h_E zu variieren, vgl. Bild C-42. Der Wert h_E entspricht der Betonierhöhe, die bei Erreichen des Erstarrungsendes des in die Schalung eingebrachten Betons erreicht wird. Es ergeben sich damit Abweichungen zum Modell mit konstantem $\lambda_{tot,E,vicat}$ -Wert auf dem die Rechenwerte des Normenentwurf E DIN 18218:2008-01 [C-3] (Konsistenzklasse F5, F6 und SVB) basieren.



Bild C-42: Vorschlag für den Verlauf des bezogenen Frischbetondrucks $\lambda_{tot, E, vicat}$ für Betone der Konsistenzklasse F5, F6 und SVB

Durch den gewählten Ansatz soll der Einfluss von gewollten und ungewollten Vibrationen und Erschütterungen auf den Frischbetondruck Rechnung getragen werden. Je kleiner der Wert h_E , desto größer ist der bezogene Frischbetondruck $\lambda_{tot,E,vicat}$. Insbesondere da der Abstand zwischen dem Ort der mechanischen Anregung und dem Ort des Maximalwertes des Frischbetondrucks mit kleinerem h_E geringer und damit die mechanische Anregung im kritischen Bereich größer wird, erhöht sich der bezogene Frischbetondruck. Im Gegensatz dazu verringert sich bei einem großen Wert h_E der Einfluss von Erschütterung und Vibration und damit auch der Wert $\lambda_{tot,E,vicat}$. Die Simulationsversuche ergaben keine signifikanten Abweichungen zwischen den Werten für die Betone der Konsistenzklassen F5 und F6. Aus diesem Grund wird zunächst für beide Konsistenzklassen dasselbe Modell gewählt.

Im Gegensatz dazu werden beim SVB geringere - insbesondere aus dem Einbauvorgang resultierende - Erschütterungseinflüsse vorausgesetzt. Damit ergeben sich insgesamt niedrigere $\lambda_{tot,E,vicat}$ – Werte.

Der druckmindernde Einfluss aus der Silowirkung wurde im Modell zunächst nicht berücksichtigt, da die Betone der Konsistenzklassen F5 und F6 teilweise mithilfe starker mechanischer Verdichtung eingebaut werden. Die aus der Verdichtung resultierenden Vibrationen können eine signifikante Verminderung bzw. eine vollständige Reduzierung des Reibungswiderstandes zwischen Frischbeton und Bewehrung bewirken (vgl. Abschnitt C.4.3). Mögliche positive Effekte infolge der Silowirkung fließen bei der Ermittlung der Modellunsicherheiten ein (vgl. Abschnitt C.5.3).

Eine Gegenüberstellung der Modellwerte mit den aus verschiedenen Bauteilversuchen ermittelten $\lambda_{tot,E}$ –Werten auf Basis des maximal gemessenen Frischbetondrucks zeigt Bild C-43. Alternativ zum Erstarrungsende $t_{E,vicat}$ kann das um 25 % erhöhte Erstarrungsende nach Knetbeuteltest $t_{E,KB}$ entsprechend E DIN 18218:2008-01 herangezogen werden.

$$\lambda_{tot,E,vicat} = \frac{\sigma_{h,max}}{\gamma_c \cdot t_{E,vicat} \cdot v} \approx \frac{\sigma_{h,max}}{\gamma_c \cdot 1,25 \cdot t_{E,KB} \cdot v}$$
(C-30)

Insgesamt wird der Wert $\lambda_{tot,E}$ durch den Modellansatz gut beschrieben. Oftmals liegen die Messwerte jedoch weit unter den Modellwerten. Dies liegt zum Teil daran, dass Betone mit nur kurzer Verarbeitbarkeitszeit, die für den Praxiseinsatz ungeeignet erscheinen, nicht die rechnerischen Frischbetondrücke erreichen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Messwerte zum Teil nicht den absoluten Maximalwert darstellen, der bei einer größeren Betonierhöhe wahrscheinlich erreicht worden wäre.



Bild C-43: Vergleich des Berechnungsmodells für den maximalen bezogenen Frischbetondruck der Konsistenzklasse F5, F6 und SVB mit Messungen an Bauteilen und Simulationsergebnissen an Kleinkörpern

Überschreitungen der Modellwerte konnten eindeutig auf überdurchschnittliche Erschütterungswirkungen aus dem Einbauprozess, zum Beispiel durch starke Vibrationsverdichtung oder hohe Einbauleistung sowie Fallhöhe, zurückgeführt werden. Weiterhin liegen die Messwerte der Simulationsversuche bei starken Erschütterungen im Bereich einer simulierten Höhe von $h_E > 5$ m deutlich über den Modellwerten.

Der Verlauf des maximalen horizontalen Frischbetondrucks entsprechend der gewählten Modelle ist in Bild C-44 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Maximalwert des horizontalen Frischbetondrucks einen linearen Verlauf in Anhängigkeit des Produktes von Betoniergeschwindigkeit v und Erstarrungsende $t_{E,vicat}$ beschreibt. Die entsprechenden analytischen Gleichungen ergeben sich zu:

$$\sigma_{h,\max} = (1m + 0.18 \cdot v \cdot t_{E,vicat}) \cdot \gamma_c \text{ für F5- und F6-Betone}$$
(C-31)

$$\sigma_{h,\max} = (0.8m + 0.16 \cdot v \cdot t_{E,vicat}) \cdot \gamma_c \text{ für SVB}$$
(C-32)

Der Mindestwert des Frischbetondrucks bei F5- und F6-Betonen von $\gamma_c \cdot 1$ m ergibt sich aus den Auswirkungen im Wirkungsbereich der Rüttler. Bei SVB resultiert der Mindestwert aus der Annahme einer stetigen Verflüssigungswirkung des Betons während des Betoneinbaus bis in eine Tiefe von bis zu 80 cm im Bereich des Einbauortes.

Unter Ansatz einer Betonwichte von $\gamma_c = 25 \text{ kN/m^3}$ gelten folgende analytische Zusammenhänge:

$$\sigma_{h,\max} = 25kN/m^2 + 4.5 \cdot v \cdot t_{E,vicat} \text{ für F5- und F6-Betone}$$
(C-33)
$$\sigma_{h,\max} = 20kN/m^2 + 4.0 \cdot v \cdot t_{E,vicat} \text{ für SVB}$$
(C-34)

Aus Bild C-44 wird ersichtlich, dass eine gute Korrelation zwischen Berechnungsmodell und Messwerten vorliegt, wenn starke Erschütterungen ausgeschlossen werden.



Bild C-44: Modellvorschlag für den Verlauf des maximalen horizontalen Frischbetondrucks $\sigma_{h,max}$ sowie Messwerte

Bezüglich der Druckverteilung über die Schalungshöhe wird der Ansatz von E DIN 18218:2008-01 weiterverfolgt (vgl. Bild C-45). Dementsprechend ist der Frischbetondruck bis zum Erreichen des Maximalwertes bzw. der zugehörigen Betonierhöhe h_s als hydrostatisch wirkend anzusetzen. Der maximale Frischbetondruck ist im weiteren Verlauf über die Höhe $h_E = v \cdot t_E$ als konstant wirkend anzunehmen und reduziert sich erst bei dem Erreichen des Erstarrungsende des Betons auf den Wert Null (vgl. Bild C-45). Tatsächlich erfolgt eine Reduzierung des Frischbetondrucks bereits deutlich vor dem Erreichen des Erstarrungsendes des Frischbetondrucks bereits deutlich vor dem Erreichen des Erstarrungsendes des Frischbetons. Hinsichtlich der Bemessung von Schalung und Rüstung ist dieser Ansatz jedoch von großem Vorteil, da durch die vorhandenen "Sicherheiten" Streuungen von Erstarrungsende t_E und Betoniergeschwindigkeit v bzw. der Höhe h_E abgedeckt werden können.



Bild C-45: Verteilung des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe

Genauere Betrachtungen zum Einfluss der Schalungskonstruktionen auf den Verlauf des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe werden in [C-16] vorgenommen. Danach ist eine Verringerung des Frischbetondrucks auf den Wert Null lediglich durch ein Aufheben der im Schalungssystem eingeprägten Vorverformung möglich. Dies wird durch Schwinden des Betons bzw. eine Verformung der Schalung nach dem Erreichen des Maximaldrucks ermöglicht. Bestätigung fanden diese Zusammenhänge durch die in den Teilprojekten durchgeführten Großversuche (Teilprojekt A, B und D) und hierbei insbesondere bei den Versuchen mit steifer und nachgiebiger Schalung des Teilprojekts D.

Einen Vergleich des - nach dem vorgestellten Berechnungsansatz auf eine Schalung einwirkenden – berechneten maximalen Frischbetondrucks mit den Messwerten ist in Bild C-46 dargestellt. Es zeigt sich eine gute Korrelation von Rechen- und Messwerten. Das Bestimmtheitsmaß R^2 bezogen auf die eigenen Bauteilversuche und Literaturangaben beträgt 0,74.

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben "Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz" Teilprojekt C – Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau



Bild C-46: Vergleich des Frischbetondrucks nach Berechnungsmodell mit den Messwerten des horizontalen Frischbetondrucks aller Versuche



Bild C-47: Vergleich des Frischbetondrucks nach Berechnungsmodell mit den Messwerten des horizontalen Frischbetondrucks (Simulationsversuche ohne Erschütterungen und Vibration)

C.5.2 Berechnungsansatz unter Berücksichtigung der Silotheorie

Die in Teilprojekt A im Rahmen der Wandversuche mit Selbstverdichtendem Beton gewonnenen Messwerte wurden mit den Rechenwerten auf Grundlage des allgemeinen Berechnungsansatzes nach [C-16] (vgl. Abschnitt C.2.2) verglichen. Einbezogen wurden dabei die Wandversuche bei Betoneinbau von "oben" mit Kübel und einer planmäßigen Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h (Wände 1 bis 4). Die maximale Betonierhöhe betrug 3,3 m und die Dicke des Betonbauteils 24 cm. Die Wand war mit zwei Bewehrungsmatten Q 180 A je Wandseite nur leicht bewehrt.

Der in Gleichung (C-9) geforderte zeitliche Verlauf der Materialkennwerte Seitendruckbeiwert $\lambda(t)$ und Reibungskoeffizient $\mu(t)$ wurde aus den Ergebnissen der Materialversuche abgeleitet. Bei der Nachrechnung wurden jeweils die im Materialversuch (mit Bewehrung) festgestellten Kennwerte für $\mu(t)$ angesetzt. Betone mit gleichem Leimgehalt wurden zusammengefasst, da diese ein näherungsweise gleiches Reibungsverhalten aufwiesen (vgl. Bild C-48 und Gleichungen (C-35), (C-36), (C-37)).



Bild C-48: Analytische Beschreibung des Reibungswiderstandes zwischen Frischbeton und Schalung inkl. Bewehrung

$$\mu_{MW330}(t) = 1.5 \cdot \left(\frac{t}{t_E}\right)^{1.25} \quad \text{für 3301Leim}$$

$$\mu_{MW365}(t) = 2.25 \cdot \left(\frac{t}{t_E}\right)^{1.75} \quad \text{für 3651Leim}$$
(C-36)

$$\mu_{MW400}(t) = 4.5 \cdot \left(\frac{t}{t_E}\right)^{3.1} \quad \text{für 400 1 Leim}$$
(C-37)

mit $t_E = t_{E,vicat} = 1,25 \cdot t_{E,KB}$

Für den Seitendruckbeiwert $\lambda(t)$ wurde ein einheitlicher Verlauf auf Basis der Versuchsergebnisse angenommen (vgl. Gleichung (C-38)).

$$\lambda_{MW}(t) = 1 - \frac{t}{t_{E,KB}} \tag{C-38}$$

Zusätzlich erfolgte eine Berechnung des Frischbetonsdrucks auf Grundlage des in Abschnitt C.5.1 abgeleiteten analytischen Modells sowie des Modells unter Berücksichtigung des Siloeffektes nach Proske [C-16] unter Ansatz der Mittelwerte der Materialparameter $\lambda(t)$ und $\mu(t)$.

(C-39)

(C-40)

Reibung mit Bewehrung nach [C-16] (Mittelwert)

$$\mu_{MW, \text{Pr}oske}(t) = 2.0 \cdot \left(\frac{t}{t_E}\right)^{2.5}$$

Seitendruckverlauf nach [C-16] (Mittelwert)

$$\lambda_{MW,Pr\,oske}(t) = 1 + 0.109 \frac{t}{t_E} - 2.233 \left(\frac{t}{t_E}\right)^2 - 0.658 \left(\frac{t}{t_E}\right)^3 + 3.457 \left(\frac{t}{t_E}\right)^4 - 1.562 \left(\frac{t}{t_E}\right)^5$$

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Bild C-49 zusammengefasst. Dem Messwert des maximalen Frischbetondrucks ist jeweils der Rechenwert des maximalen Frischbetondrucks gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass bei Ansatz der vollen Reibung die Rechenwerte des Frischbetondrucks sehr gut mit den Messwerten übereinstimmen. Lediglich bei dem Wandversuch Wand 3 bzw. dem Beton SVB-203.2 liegen die Messwerte deutlich oberhalb der Rechenwerte. Dies ist insbesondere auf den Drucksprung nach dem Ende des Betoniervorgangs zurückzuführen, welcher vermutlich durch eine mechanische Anregung, verbunden mit dem lokalen Aufheben des Reibungswiderstandes, hervorgerufen wurde. Deutlich wurde hier die hohe Sensibilität schlanker Systeme auf Erschütterungen. Verstärkt wurde die Sensibilität durch den geringen Bewehrungsgehalt des Bauteils (vgl. Teilprojekt A).

Wird die druckreduzierende Wirkung der Wandreibung vernachlässigt, liegen alle Messwerte unterhalb der Rechenwerte, allerdings bestehen zum Teil deutliche Abweichungen. Dies gilt umso mehr, wenn die Berechnung nach dem in Abschnitt C.5.1 abgeleiteten Modellvorschlag erfolgt. Die Berechnung nach dem Modell von Proske [C-16] auf Basis der Mittelwerte liefert vergleichsweise realistische Ergebnisse. Die Unterschätzung des Frischbetondrucks ist mit den sehr kleinen Betoniergeschwindigkeiten verbunden mit den kleinen Bauteilabmessungen des Wandversuchs zu erklären. Die niedrige Einbauleistung impliziert geringe Erschütterungswirkungen und damit gegenüber einer hohen Einbauleistung einen geringeren Frischbetondruck.



Bild C-49: Vergleich des berechneten Frischbetondrucks von SVB nach der Silotheorie mit den Messwerten an Wänden aus Teilprojekt A (ibac)

C.5.3 Berechnungsvorschlag und Kalibrierung der Sicherheitselemente

Die Bemessung von Schalung und Rüstung muss unter Beachtung der Anforderungen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit dieser Konstruktionen erfolgen. Die Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bemessung nach dem semi-probabilistischen Bemessungskonzept kann auf Grundlage von DIN 1055-100:2001-03 durchgeführt werden. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der statistischen Kenngrößen der Basisvariablen, wie z. B. Betoniergeschwindigkeit und Erstarrungszeiten, sowie der Modellunsicherheit. Da hierzu bisher vergleichsweise geringe Erkenntnisse vorliegen, sind weiterführende Untersuchungen zur Streuung der Basisvariablen unerlässlich. Hierbei müssen insbesondere die aus dem Baubetrieb hervorgerufenen Einflüsse einer genaueren Betrachtung unterzogen werden.

In einem ersten Schritt wurden auf Grundlage des bisherigen Erkenntnisstandes Sicherheitselemente für die Bemessung von Schalung und Rüstung ermittelt. Als gegeben wurde der Teilsicherheitsbeiwert auf der Einwirkungsseite mit $\gamma_F = 1,5$ angenommen. Die Versagenswahrscheinlichkeit der Schalung wurde zu 10⁻⁴ festgelegt, d. h. 1 Versagen der Schalung bei 10000 Bemessungsfällen. Der Zielwert des Zuverlässigkeitsniveaus beträgt entsprechend $\beta = 3,7$ (Annahme einer normalverteilten Grenzzustandsfunktion).

Der charakteristische Wert des bei der Bemessung anzusetzenden maximalen Frischbetondrucks $\sigma_{hk,max}$ wurde nach DIN 1055-100 (2001), Anhang B, über eine vollständige probabilistische Berechnung (Stufe III) mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation ermittelt. Die hierfür verwendete Grenzzustandsfunktion wurde aus der allgemeinen Beziehung zwischen Einwirkung *E* und den Widerstand *R* abgeleitet.

$$g = R - E$$
 Grenzzustandsfunktion (C-41)

Die Grenzzustandsfunktion für die Verwendung von SVB beschreibt Gleichung (C-42) und für die F5- und F6-Betone Gleichung (C-43). Die in der Grenzzustandsfunktion enthaltenen Basisvariablen sind in Tabelle C-14 und Tabelle C-15 zusammengestellt. Der Einfluss des Siloeffektes bzw. der Querschnittsgeometrie und des Bewehrungsgehaltes des herzustellenden Bauteils wurde in der Grenzzustandsfunktion nicht explizit berücksichtigt.

(C-42)

(C-43)

Grenzzustandsfunktion für SVB¹⁾

$$g = \left(f1 + f2 \cdot \overline{v} \cdot \overline{\gamma_c} \cdot \overline{t_{E,vicat}}\right) \cdot \gamma_F \cdot \gamma_R \cdot \frac{R_m}{R_k} - \left(0.8m + 0.16 \cdot v \cdot t_{E,vicat}\right) \cdot \gamma_c \cdot c \cdot u \cdot \theta_E$$

Grenzzustandsfunktion für F5- und F6-Beton¹⁾

$$g = \left(f1 + f2 \cdot \overline{v} \cdot \overline{\gamma_c} \cdot \overline{t_{E,vicat}}\right) \cdot \gamma_F \cdot \gamma_R \cdot \frac{R_m}{R_k}$$
$$-\left(1m + 0.18 \cdot v \cdot t_{E,vicat}\right) \cdot \gamma_c \cdot c \cdot u \cdot \theta_E$$

¹⁾Zeichenerklärung siehe Tabelle C-14 und Tabelle C-15

Die Festlegung der statistischen Kenngrößen der Basisvariablen erfolgte auf Grundlage von Messdaten eigener Versuche sowie von Literaturangaben (vgl. auch [C-16]). Die größten Abweichungen sind bei der mittleren Betoniergeschwindigkeit v mit einem Variationskoeffizienten von V = 0.25 zu erwarten, da deren Planung oftmals auf Grundlage der Geometrie des zu betonierenden Bauteils und die Kapazität der Mischfahrzeuge erfolgt und eine Überwachung auf der Baustelle Schwierigkeiten bereitet. Große Streuungen sind ebenfalls bei den Erstarrungszeiten t_E zu erwarten, da die eingesetzten Fließmittel zum Teil sehr sensibel auf Schwankungen innerhalb der Mischungsrezeptur sowie des Herstellprozesses reagieren und dadurch die Erstarrungszeiten stark beeinflusst werden können. Ebenfalls sind die durch die Prüfung der Erstarrungszeiten (Knetbeutelverfahren, Vicat-Test) hervorgerufenen Abweichungen nicht zu vernachlässigen. Für Selbstverdichtenden Beton wurden insgesamt größere Streuungen von t_E angesetzt als für F5- und F6-Betone, da das System SVB oftmals sensibler auf Schwankungen von Ausgangsstoffen und Randbedingungen reagiert als die Rüttelbetone.

Die Modellunsicherheiten bzw. Modellsicherheiten θ_E wurden getrennt nach den Konsistenzklassen aus den Abweichungen zwischen vorliegenden Druckmessungen und den zugehörigen Rechenwerten des Frischbetondrucks ermittelt. Dabei wurden sowohl die in den Teilprojekten A, B und D gewonnenen Messergebnisse als auch in der Literatur dokumentierte Messungen einbezogen.

Auf der Einwirkungsseite wurden weiterhin die Betonwichte γ_c sowie mögliche Einflüsse aus der Schnittgrößenermittlung als streuende Größen einbezogen. Zur Berücksichtigung sonstiger, in den Modellunsicherheiten möglicherweise nicht ausreichend enthaltener Einflüsse, wie z. B. Erschütterungen, Bauteilgeometrie oder Mischungszusammensetzung, wurde der Faktor *u* eingeführt. Es ist dabei zu bemerken, dass das Auftreten sehr starker ungewollter Erschütterungen einen außergewöhnlichen Lastfall darstellt, welcher bei der Kalibrierung des Berechnungsvorschlags unter Ansatz des Teilsicherheitsbeiwertes von $\gamma_F = 1,5$ nicht berücksichtigt wurde.

Bei der Kalibrierung wurde eine Funktion zur Beschreibung des charakteristischen Wertes des Frischbetondrucks mit folgender Form vorgegeben:

$$\sigma_{hk,max} = f1 + f2 \cdot v \cdot \gamma_c \cdot t_{E,vicat}$$
(C-44)

Für SVB und die Rüttelbetone der Konsistenzklasse F5 und F6 wurde ein einheitlicher charakteristischer Mindestwert *f*1 in Abhängigkeit der Betonwichte von $\gamma_c \cdot 1$ m (25 kN/m² bei $\gamma_c = 25$ kN/m³) festgelegt, da im Bereich sehr kleiner Betoniergeschwindigkeiten der Frischbetondruck im Wesentlichen durch den Einbauvorgang beeinflusst wird (Rütteltiefe, Einfülltechnologie). Wenn bei SVB signifikante Erschütterungen aus dem Einbauprozess auszuschließen sind, wird ein Wert *f*1 von $\gamma_c \cdot 0.8$ m (20 kN/m² bei $\gamma_c = 25$ kN/m³) als sinnvoll erachtet.

Der Parameter f^2 wurde unter Verwendung der vollständigen probabilistischen Berechungsmethode kalibriert. Alle Basisvariablen wurden dabei als normalverteilt

angenommen. Die Kalibrierung des Wertes f2 erfolgte für den praxisüblichen Bereich des charakteristischen Frischbetondrucks von 60 bis 80 kN/m², dem auch im Mittel die Modellunsicherheiten zugrunde liegen. Im Bereich höherer charakteristischer Frischbetondrücke ergäben sich geringere f2-Werte (sichere Seite). Insgesamt kann jedoch von einem näherungsweise gleichmäßigen Sicherheitsniveau ausgegangen werden.

| Tabelle C-14: | Basisvariablen der Einwirkungsseite für die Kalibrierung der |
|---------------|--|
| | charakteristischen Werte des Frischbetondrucks |

| Basisvariable E SVB, F6- und | Cinwirkung F5-Beton | Mittelwert | Standard- abweichung | Variations- koeffizient | |
|--|------------------------|------------|-------------------------|----------------------------|--------|
| | т | S | V | | |
| | | | | | [-] |
| Einwirkung | | | | | |
| Betonwichte bei Normalbeton | γ _c | [kN/m³] | 23,5 | 0,5 | 0,021 |
| Betoniergeschwindigkeit | v | [m/h] | 1,0 | 0,25 | 0,25 |
| Schnittgrößenermittlung | С | [-] | 1,0 | 0,10 | 0,10 |
| <u>SVB</u> | | | | | |
| Erstarrungsende nach DIN EN 480-2 (2006) | $t_{E,vicat}$ | [h] | 7,0 | 1,75 | 0,25 |
| Modellunsicherheit | θ_E | [-] | 0,77 | 0,21 | 0,27 |
| Sonstige Unsicherheiten mit Erschütterungen (ohne Erschütterungen) | и | [-] | 1,15 (1,00) | 0 0 | 0 0 |
| <u>F6-Beton</u> | | | | | |
| Erstarrungsende nach DIN EN 480-2 (2006) | $t_{E,vicat}$ | [h] | 7,0 | 1,4 | 0,20 |
| Modellunsicherheit | θ_E | [-] | 0,96 | 0,19 | 0,20 |
| Sonstige Unsicherheiten (z. B. Erschütterungen) | и | [-] | 1,00 | 0 | 0 |
| <u>F5-Beton</u> | | | | | |
| Erstarrungsende nach DIN EN 480-2 (2006) | $t_{E,vicat}$ | [h] | 7,0 | 1,4 | 0,20 |
| Modellunsicherheit | θ_E | [-] | 0,75 | 0,10 | 0,14 |
| Sonstige Unsicherheiten (z. B. Erschütterungen) | и | [-] | 1,10 | 0 | 0 |

Hinsichtlich des Erstarrungsendes ist zu beachten, dass dem Berechnungsmodell die Erstarrungszeiten $t_{E,vicat}$ nach DIN EN 480-2:2006-11 zugrunde liegen. Die Modellunsicherheit wurde jedoch auf Basis der Erstarrungszeiten, abzüglich des Zeitraums von Wasserzugabe bis Einbau (effektive Erstarrungszeit $t_{E,eff,vicat}$), ermittelt. Der Zeitraum bis zum Betoneinbau ist damit als zusätzliches Sicherheitselement anzusehen.

| Basisvariable V SVB, F6- und | Viderstand F5-Beton | Mittelwert | Standard- abweichung | Variations- koeffizient | |
|---|--------------------------|------------|-------------------------|----------------------------|-------|
| | | т | S | V | |
| | | | | | [-] |
| Widerstand | | | | | |
| Teilsicherheitsbeiwert (Einwirkung) | γ _F | [-] | 1,5 | 0 | 0 |
| Teilsicherheitsbeiwert (Widerstand) | γ _{<i>R</i>} | [-] | 1,1 | 0 | 0 |
| Verhältnis Mittelwert zu charakteristischem Wert des Materials (Baustahl) | R_m/R_k | [-] | 1,1 | 0,03 | 0,027 |
| charakteristische Werte: | | | | | |
| Rechenwert des Erstarrungsendes nach DIN EN 480-2 (2006) | $\overline{t_{E,vicat}}$ | [h] | 7,0 | 0 | 0 |
| Rechenwert der Betonwichte bei Normalbeton | $\overline{\gamma_c}$ | [kN/m³] | 23,5 | 0 | 0 |
| Rechenwert der Betoniergeschwindigkeit | \overline{v} | [m/h] | 1,0 | 0 | 0 |
| Mindestdruckf1[kN/m²] | | [kN/m²] | $\overline{\gamma_c}$ | 0 | 0 |
| Druckanstieg | f2 | [-] | gesucht | 0 | 0 |

Tabelle C-15:Basisvariablen der Widerstandsseite für die Kalibrierung der
charakteristischen Werte des Frischbetondrucks

Es ergeben sich durch die Kalibrierung folgende Gleichungen zum charakteristischen Wert des maximalen Frischbetondrucks (vgl. Bild C-50):

für SVB, allgemein:

$$\sigma_{hk,\max} = h_s \cdot \gamma_c = \left(1m + 0,26 \cdot v \cdot t_{E,vicat}\right) \cdot \gamma_c$$

für SVB, signifikante Erschütterungen ausgeschlossen: (C-46)

$$\sigma_{hk,\max} = h_s \cdot \gamma_c = (0.8m + 0.24 \cdot v \cdot t_{E,vicat}) \cdot \gamma_c$$

für F6-Beton:

$$\sigma_{hk,\max} = h_s \cdot \gamma_c = (1m + 0.30 \cdot v \cdot t_{E,vicat}) \cdot \gamma_c$$

für F5-Beton:

$$\sigma_{hk,\max} = h_s \cdot \gamma_c = \left(1m + 0.24 \cdot v \cdot t_{E,vicat}\right) \cdot \gamma_c$$

Wie beim Berechnungsmodell liegen die Werte des Frischbetondrucks von SVB unter denen der F6-Betone. Demgegenüber unterschreitet der charakteristische Wert für die F5-Betone sowohl die Druckverläufe für die F6-Betone als auch für SVB. Zu begründen ist dieses Verhalten mit der kleineren Modellunsicherheit bei F5-Beton sowie geringen

(C-45)

(C-47)

(C-48)

Streuungen der Erstarrungszeiten t_E . Sind bei SVB signifikante Erschütterungen auszuschließen liegen deren Druckwerte noch unterhalb von F5-Beton. Die stärkere Vibration bei F5-Beton bewirkt in diesem Fall einen höheren Frischbetondruckanteil als die bessere Fließfähigkeit von SVB.



Bild C-50: Charakteristische Werte des maximalen horizontalen Frischbetondrucks $\sigma_{hk,max}$ sowie Messwerte

Werden die Erstarrungszeiten mit dem Knetbeutelverfahren nach E DIN 18218:2008-01 bestimmt, können auf Grundlage des Zusammenhanges $t_{E,vicat} = 1,25 \cdot t_{E,KB}$ folgende Beziehungen angewendet werden:

(C-49)

(C-50)

(C-51)

für SVB, allgemein:

$$\sigma_{hk,\max} = h_s \cdot \gamma_c = (1m + 0.325 \cdot v \cdot t_{E,KB}) \cdot \gamma_c$$

für F6-Beton:

$$\sigma_{hk,\max} = h_s \cdot \gamma_c = (1m + 0.375 \cdot v \cdot t_{E,KB}) \cdot \gamma_c$$

für F5-Beton:

$$\sigma_{hk,\max} = h_s \cdot \gamma_c = (1m + 0.30 \cdot v \cdot t_{E,KB}) \cdot \gamma_c$$

Es bestand die Forderung, dass der Berechnungsansatz auch ein ungewolltes Eintauchen des Rüttlers bis in eine Tiefe von bis zu 2 m abdecken soll. In den durchgeführten Materialversuchen (siehe Abschnitt C.4.2) wurde festgestellt, dass eine vollständige Wiederverflüssigung des Frischbetons lediglich bis zu einem Betonalter von ca. $0,65 \cdot t_{E,vicat}$ bzw. einer Betonierhöhe von $0,65 \cdot h_E$ möglich ist. Die daraus resultierenden möglichen Frischbetondrücke sind in Bild C-50 dargestellt. Aus Bild C-50 ist ersichtlich, dass die

charakteristischen Rechenwerte des Frischbetondrucks für die F5- und F6-Betone den beschriebenen Lastfall im Wesentlichen abdecken. Die geringfügigen Überschreitungen sowie die auftretenden Streuungen von Erstarrungsende und Betoniergeschwindigkeit können durch den Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_F = 1,5$ ausreichend abgesichert werden, da der Lastfall eine außergewöhnliche Beanspruchung darstellt (vgl. Bild C-51). Des Weiteren ist zu bemerken, dass durch Innenrüttler nur in sehr begrenzten Bereichen eine Wiederverflüssigung möglich ist, die außerdem nur kurzfristig wirkt.

Das Auftreten ungewollter starker Erschütterungen, z. B. Anprall durch Betonkübel oder andauernde mechanische Erregung der Bewehrung durch Vibration bzw. Betonierschlauch, kann ebenfalls als außergewöhnliche Einwirkung angesehen werden. Bei Annahme einer maximalen Versagenswahrscheinlichkeit von 10^{-2} im Falle des Auftretens solch einer Einwirkung ergibt sich aus der vollständigen probabilistischen Analyse, unter Annahme sonst gleicher Kennwerte der Basisvariablen, für SVB ein Faktor *u* von 1,65 (Standardwert u = 1,15). Damit ist eine Zunahme des Frischbetondrucks infolge dynamischer Belastung um nochmals 45% möglich ohne das angestrebte Sicherheitsniveau zu unterschreiten. Bei F6-Betonen ergibt sich eine mögliche Erhöhung um ca. 40% und bei F5-Betonen um 50%.

In Bild C-51 ist der Rechenwert des Frischbetondrucks bei Annahme von $\gamma_F = 1,5$ unter Ansatz der Mittelwerte der Modelleingangsparameter dargestellt. Es zeigt sich, dass der gemessene Frischbetondruck selbst bei starker Vibrationseinwirkung die Rechenwerte nicht signifikant überschreitet.



Bild C-51: Bemessungswerte und charakteristische Werte des maximalen horizontalen Frischbetondrucks $\sigma_{hd,max}$ bzw. $\sigma_{hk,max}$

C.5.4 Vergleich des Berechnungsvorschlags mit dem Berechnungsansatz nach Silotheorie

Ein Vergleich des vorgestellten Berechnungsvorschlags für SVB mit dem auf der Silotheorie basierenden Berechnungsmodell nach [C-16], vgl. Abschnitt C.2.2, ist in Bild C-52 dargestellt. Nach der Silotheorie ergeben sich unterschiedliche Frischbetondrücke in Abhängigkeit der Querschnittsgeometrie des herzustellenden Betonbauteils. Eine geringere Schalungsbreite *b* bewirkt einen geringeren Frischbetondruck; gleiches gilt für einen höheren Bewehrungsgehalt des Bauteils.



Bild C-52: Vergleich des maximalen Frischbetondrucks nach dem Modellvorschlag von SVB (sowie der charakteristischen Werte $\sigma_{hk,max}$) mit dem Berechnungsmodell unter Berücksichtigung der Silotheorie nach [C-16]

Es zeigt sich, dass der Frischbetondruck nach dem Modellvorschlag in der Größenordnung von bewehrten Bauteilen mit geringer Bauteilbreite liegt. Dies ist insbesondere damit zu begründen, dass die nach der Silotheorie erarbeiteten Kurvenscharen auf Grundlage der charakteristischen Werte der Wandreibung μ und des Seitendruckbeiwerts λ berechnet wurden. Der Modellvorschlag basiert demgegenüber auf Mittelwerten der Materialparameter. Lediglich bei sehr kleinen h_E -Werten wird der Frischbetondruck durch die Wahl des Mindestwertes für $\sigma_{h, max}$ deutlich überschätzt.

Der zur Bemessung vorgeschlagene charakteristische Wert des Frischbetondrucks liegt im praxisrelevanten Bereich meist oberhalb der Rechenwerte nach Silotheorie. Gegenüber schmalen bewehrten Bauteilen sind sehr große Abweichungen festzustellen. Es ist jedoch zu beachten, dass bei Bauteilen mit kleiner Querschnittsbreite eine größere Streuung der Betoniergeschwindigkeit zu erwarten ist als bei breiten Bauteilen. Auch der Einfluss ungewollter Erschütterungen ist bei schmaleren Bauteilen als höher einzuschätzen. Daher kann der vorgestellte, vom Bauteilquerschnitt unabhängige, Modellvorschlag für eine praktische Bemessung von Schalungen als geeignet angesehen werden. Bestätigung findet dies durch einen Vergleich des rechnerischen Frischbetondrucks mit Ergebnissen eigener Bauteilmessungen, Literaturangaben und Bauteilmessungen der Forschungspartner.

C.5.5 Vergleich des Berechnungsvorschlags mit E DIN 18218:2008-01

Die charakteristischen Werte des Berechnungsvorschlags für SVB sowie für die F5- und F6-Betone sind in Bild C-53 den Angaben von E DIN 18218:2008-01 gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass der Mindestwert des Frischbetondrucks beim Berechnungsvorschlag mit 25 kN/m² etwas geringer ist als nach E DIN18218:2008-01 mit 30 kN/m². Ab einem Wert von ca. $h_E = 1$ m überschreiten die Werte des Berechnungsvorschlags die Normangaben. Danach ergeben sich zum Teil signifikante Abweichungen, was auf die stärkere Berücksichtigung von dynamischen Effekten im Berechnungsvorschlag und Normwert tritt bei $h_E = 5,0$ m (F6-Beton), $h_E = 6,25$ m (SVB) und $h_E = 9,1$ m (F5-Beton) auf. Nachfolgend liegen die Werte des Berechnungsvorschlags stets unterhalb der Normangaben.

Insgesamt verringern sich gegenüber dem Normenvorschlag die Abstände zwischen den Konsistenzklassen, was durch die Materialversuche Bestätigung fand. Für die praktische Anwendung sind im Bereich hoher Frischbetondrücke insbesondere bei Betonen der Konsistenzklasse F6 und SVB höhere Betoniergeschwindigkeiten möglich. Bei F5-Beton ergeben sich nur geringfügige Änderungen.



Bild C-53: Vergleich des Berechnungsvorschlags für $\sigma_{hk,max}$ mit den Angaben nach E DIN 18218:2008-01

Beim Betoneinbau von SVB durch Pumpen von "unten", dass heißt die Einbaustelle liegt des oberen Betonspiegels, muss nach E DIN unterhalb 18218:2008-01 als Wert mindestens hydrostatischer charakteristischer Frischbetondruck über die Schalungshöhe angesetzt werden. In den durchgeführten Bauteilversuchen (Teilprojekt A, Wand 9-11, Seite A-41 und A-43) überschritten die Messwerte bei diesem Einbauverfahren die hydrostatischen Druckwerte um weniger als 15%. Aufgrund der vergleichsweise geringen Streuungen der Einwirkungen und dem Ansatz eines Teilsicherheitsbeiwertes für die Bemessung von $\gamma_F = 1.5$ können die Normangaben nach derzeitigem Erkenntnisstand als ausreichend bewertet werden, um das vorgegebene Sicherheitsniveau einzuhalten.

C.6 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Die Arbeiten des Teilprojekts C untergliederten sich in die zwei Abschnitte "Untersuchung von Materialparametern" und "Modellbildung".

ersten Abschnitt wurden verschiedene Materialparameter des Frischbetons Im um auf dieser Basis experimentell ermittelt, im zweiten Abschnitt einen Berechnungsvorschlag zur wirklichkeitsnahen Bestimmung des Frischbetondrucks auf lotrechte Schalungen erarbeiten zu können. Ein Schwerpunkt der experimentellen der Untersuchungen lag auf der Bestimmung zeitlichen Entwicklung des Seitendruckbeiwertes (Verhältnis Horizontal- zu Vertikalspannung) bzw. des inneren Reibungswiderstandes. Des Weiteren war die Reibung zwischen dem Frischbeton und der Schalung sowie der Reibungswiderstand zwischen dem Frischbeton und der Bewehrung Gegenstand der Forschung. Die Untersuchungen zum Seitendruckbeiwert und zur Reibung wurden unter Verwendung einer bewährten Prüfapparatur an Frischbetonproben mit den Abmessungen 25x25x25 cm durchgeführt.

Im Rahmen der Materialversuche wurde der Einfluss verschiedener Einflussparameter auf das Materialverhalten bzw. den Frischbetondruck systematisch analysiert, dazu zählen insbesondere die Konsistenzklasse. die rheologischen Kenngrößen, die Betoniergeschwindigkeit, die Verformungsfähigkeit der Schalung sowie Erschütterungen und Vibrationen. Festgestellt wurde ein signifikanter Einfluss der Mischungszusammensetzung (Leimgehalt), des Ansteif- und Erstarrungsverhaltens, der Betoniergeschwindigkeit, der Schalungsverformung sowie von Erschütterungen und Vibrationen auf den Seitendruckbeiwert bzw. den Frischbetondruck. Die Reibung wird neben der Mischungszusammensetzung (Leimgehalt) und dem Ansteifund Erstarrungsverhalten insbesondere durch Erschütterungen sowie die Bewehrung beeinflusst. Der Einfluss der Frischbetonkonsistenz war demgegenüber vergleichsweise gering.

Zusätzlich zum vorgesehenen Versuchsprogramm wurden Tastversuche zur Verformungsfähigkeit des Frischbetons unter Lastbeanspruchung (Kompressionsversuch) und ohne Belastung (Frühschwinden) durchgeführt. Es wurde bestätigt, dass die Kompressionsfähigkeit des Frischbetons bis zum Erreichen des Erstarrungsbeginns hauptsächlich durch den Luftgehalt des Frischbetons beeinflusst wird. Die ermittelten Schwindverkürzungen des Frischbetons vom Zeitpunkt des Betoneinbaus bis zum Erreichen des Erstarrungsendes des Betons erreichten Werte von bis zu 0,0025.

Im zweiten Abschnitt "Modellbildung" wurde auf Grundlage der Materialversuche ein vereinfachtes analytisches Modell zur Bestimmung des Frischbetondrucks auf lotrechte Schalungen erarbeitet. Die Modelleingangsgrößen sind die Konsistenzklasse, die mittlere Betoniergeschwindigkeit, die Erstarrungszeit (Erstarrungsende), die Betonwichte und die Schalungshöhe. Die Berechnung des Frischbetondrucks unter Berücksichtigung der Silotheorie unter Einbeziehung der experimentell ermittelten Materialparameter ergab Frischbetondrücke, die durch die Bauteilergebnisse (insbesondere Teilprojekt A) bestätigt

werden konnten. Allerdings trat der Einfluss möglicher Erschütterungen auf den Reibungswiderstand und damit auf den Frischbetondruck deutlich hervor.

Der für die praktische Anwendung nachfolgend ausgearbeitete Bemessungsvorschlag auf Grundlage des vereinfachten Modells berücksichtigt Anforderungen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Schalungskonstruktionen. Einbezogen wurden bei der Ermittlung der Sicherheitselemente weiterhin die Untersuchungsergebnisse aller Forschungsstellen sowie Literaturangaben. Gegenüber dem Normenentwurf E DIN 18218:2008-01 ergeben sich hinsichtlich des maximalen Frischbetondrucks im praxisrelevanten Bereich geringfügige Änderungen. Insbesondere bei den Betonen der Konsistenzklasse F6 und SVB werden bei höheren Betoniergeschwindigkeiten bzw. Erstarrungszeiten geringere Frischbetondrücke als bisher vorgeschlagen. Die höheren Frischbetondrücke bei geringen Betoniergeschwindigkeiten resultieren aus dem geforderten Mindestwert infolge unplanmäßig großer Rütteltiefen.

Um den Frischbetondruck fließfähiger Betonen noch wirklichkeitsnäher vorherbestimmen zu können, sind weiterführende experimentelle Materialversuche am Frischbeton erforderlich. Insbesondere rheologische Messungen an Frischbeton mit Hilfe von Rheometern, bei denen der Scherwiderstand des Frischbetons unter verschiedenen Normalspannungszuständen ermittelt werden kann, sind dazu zwingend notwendig.

Zur wirklichkeitsnahen Abschätzung der auf Schalungen mit beliebiger Bauteilgeometrie einwirkenden Belastung ist die Verwendung komplexer numerische Verfahren, z. B. Finite-Elemente-Methode, unerlässlich. Voraussetzung ist die Auswahl bzw. die Entwicklung geeigneter Materialgesetze sowie die Kalibrierung des Rechenmodells. In diesem Zusammenhang werden ergänzende Materialversuche zum lastabhängigen und lastunabhängigen Verformungsverhalten des Frischbetons als notwendig angesehen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere zum Frischbetondruck bei Einsatz von Betonen der Konsistenzklasse F1 bis F4, da die bekannten Materialgesetze und Berechnungsmodelle sehr widersprüchlich sind und sich das Materialverhalten durch die Verwendung neuartiger Ausgangsstoffe (Fließmittel und Betonzusatzstoffe) zum Teil signifikant verändert hat. In diesem Zusammenhang sollte überprüft werden, ob der in DIN 18218:2008-01 enthaltene Umrechnungsfaktor zwischen den Erstarrungszeiten nach Knetbeuteltest und Vicat-Versuch ($t_{E,vicat} = 1,25 \cdot t_{E,KB}$) für die Anwendung von Betonen der Konsistenzklasse F1 bis F5 ggf. angepasst werden muss.

Der Schwerpunkt zukünftiger Forschungsaktivitäten im Bereich Sicherheit und Zuverlässigkeit muss auf der Untersuchung der Streuung der Modelleingangsparameter liegen, wobei insbesondere die Betoniergeschwindigkeit und die Erstarrungszeiten von Interesse sind. Daneben sollten die Modellunsicherheiten genauer analysiert werden. Notwendig sind hierbei vor allem weitere Messungen des Frischbetondrucks an hohen Bauteilen auf Baustellen. Durch einen Vergleich der geplanten angestrebten Eingangswerte mit den tatsächlich erzielten Größen ist die Ableitung von statischen Kenngrößen möglich. Für eine fundierte sicherheitstheoretische Betrachtung sollten weiterhin Überlegungen zum angestrebten Sicherheitsniveau vorgenommen werden.
Großes Potential enthält die mögliche Reduzierung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_F bei hydrostatischem Druckansatz. Durch die Aktivierung unnötiger Tragreserven könnte der Einsatzbereich der Schalungssysteme erweitert werden.

C.7 Literaturverzeichnis

- [C-1] Specht, M.: Die Belastung von Schalung und Rüstung durch Frischbeton. Werner-Verlag, Düsseldorf, 1973.
- [C-2] Ritchie, A.G.B.: The triaxial testing of fresh concrete. Magazine of concrete Research, Vol. 14, Nr. 40, 1962: 37-42.
- [C-3] Djelal, C.; Vanhove, Y.; De Caro, P. Magnin, A.: Role of demoulding agents during self-compacting concrete casting in formwork. Minerals and Structures, Vol. 35, September-October, 2003: 470-476.
- [C-4] Vanhove, J., et al.: Study of Self-Compacting Concrete Pressure on Formwork. In: Proceedings of "The Second International Symposium" of Self – Compacting – Concrete, COMS Engineering Corporation, Fukui/ Japan, 2001: 585-594.
- [C-5] Billberg, P.: Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete. In: Proceedings of "The Third International Symposium" of Self – Compacting – Concrete, RILEM Publications S.A.R.L, Reykjavik, Iceland, 2003: 271-280.
- [C-6] Graubner, C.-A.; Proske, T.: Formwork Pressure A new Concept for the Calculation. Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, ISBN 0-924659-64-5, Chicago, 2005.
- [C-7] Graubner, C.-A.; Proske, T.: Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf das Entlüftungsverhalten sowie den entstehenden Schalungsdruck bei Verwendung von selbstverdichtendem Beton. DAfStb-Forschungsvorhaben, Abschlussbericht, TU Darmstadt, September, 2002.
- [C-8] Graubner, C.-A. et al.: Sachstandsbericht Frischbetondruck fließfähiger Betone. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 567, Berlin, 2006.
- [C-9] Ovarlez, G.; Roussel, N.: A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork. Materials and Structures, RILEM Publications SARL, Vol. 39, 2006.
- [C-10] Specht M.: Theorie des Frischbetondrucks gegenwärtiger Stand und ungeklärte Probleme. Bautechnik, Heft 3 (1987), Ernst und Sohn Verlag, 1987: 73-78.
- [C-11] GSV: GSV-Richtlinie für die Erteilung von GSV-Zeichen für Rahmenschalungstafeln für vertikale Bauteile (Wände und Stützen). Güteschutzverband Betonschalungen e.V., Oktober, 2000.
- [C-12] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie, Selbstverdichtender Beton, Änderungen und Ergänzungen zu DIN 1045-1:2001-07, DIN 1045-2: 2001-07 sowie DIN 1045-3: 2001-07. Berlin, November, 2003.
- [C-13] Reinhardt, H.-W. et al.: Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB). Deutscher Ausschuss f
 ür Stahlbeton, Beuth Verlag, Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses f
 ür Stahlbeton, Heft 516, Berlin, 2001.

- [C-14] DAfStb (2003): DAfStb-Richtlinie, Selbstverdichtender Beton, Änderungen und Ergänzungen zu DIN 1045-1:2001-07, DIN 1045-2: 2001-07 sowie DIN 1045-3: 2001-07. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, November, 2003.
- [C-15] E DIN 18218:2008-01: Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen. Normenentwurf. Berlin, Januar, 2008.
- [C-16] Proske, T.: Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton Ein wirklichkeitsnahes Modell zu Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Eigenverlag, 2007.
- [C-17] Grünewald, S.; Walraven, J. C.: Affecting parameters on surface settlement of self-compacting concrete. In: Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, 2007: 437-442.

C.8 Danksagung

Für das Gelingen dieser Teilprojektes möchten sich die Projektverantwortlichen bei allen Förderern des Forschungsprojektes für die freundliche Unterstützung bedanken. Ergänzend zu den im Hauptteil des Berichtes bereits genannten Partnern wurde die Forschungsarbeit im Teilprojekt C durch die Mitwirkung der folgenden Einrichtungen ermöglicht:



Darmstadt, 30.11.2008

Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner

Dr.-Ing. T. Proske

C.9 Anlagen

| | (Reibulig | (sversuche) | | | | | |
|-----------|-------------------|-----------------|---------|----------|---------|-------|---------|
| Mischung | | | | | | | |
| Nr. | Randbedingung | Fließmittel | | Stabil. | | Temp. | (t = 0) |
| | | Bezeichnung | Masse | Bez. | Masse | Luft | Beton |
| | | | [kg/m³] | | [kg/m³] | [°C] | [°C] |
| F5-102.2 | SS | Glenium Sky 592 | 2,1 | | | 20,0 | 20,8 |
| F5-102.2 | SS+Bew | Glenium Sky 592 | 1,9 | | | 20,0 | 21,5 |
| F5-102.2 | SS+Bew+Dauerl+VIB | Glenium Sky 592 | 1,9 | | | 21,9 | 22,5 |
| F6-200.2 | SS | Glenium Sky 592 | 2,7 | | | 20,4 | 21,6 |
| F6-200.2 | SS+Bew | Glenium Sky 592 | 2,7 | | | 20,8 | 22,6 |
| F6-202.2 | SS | Glenium Sky 592 | 3,2 | | | 20,5 | 21,8 |
| F6-202.2 | SS+Bew | Glenium Sky 592 | 3,1 | | | 20,5 | 21,0 |
| F6-202.2 | SS+Bew+Dauerl | Glenium Sky 592 | 2,9 | | | 20,4 | 22,1 |
| F6-202.2 | SS+Bew+Dauerl+VIB | Glenium Sky 592 | 2,7 | | | 20,4 | 21,2 |
| SVB-300 | SS | ViscoCrete 1035 | 4,5 | | | 21,0 | 23,0 |
| SVB-300 | SS+Bew | ViscoCrete 1035 | 4,5 | | | 22,0 | 22,6 |
| SVB-301.2 | SS | Glenium Sky 592 | 4,7 | | | 20,0 | 22,2 |
| SVB-301.2 | SS+Bew | Glenium Sky 592 | 5,3 | | | 20,9 | 23,4 |
| SVB-302.2 | SS+Bew | Glenium Sky 592 | 3,2 | | | 20,6 | 23,3 |
| SVB-303.2 | SS | Glenium Sky 592 | 4,4 | | | 20,5 | 21,8 |
| SVB-303.2 | SS+Bew | Glenium Sky 592 | 4,2 | | | 20,7 | 22,9 |
| SVB-303.2 | SS+Bew | Glenium Sky 592 | 4,5 | Foxcrete | 0,13 | 20,2 | 21,7 |
| SVB-304.2 | SS+Bew | Glenium Sky 592 | 3,2 | Foxcrete | 0,18 | 19,6 | 21,7 |

Tabelle C-A1:Masse Betonzusatzmittel und Temperaturverhältnisse
(Reibungsversuche)

Detaillierte Beschreibung der Versuchsdurchführung

Nachfolgend sind die Arbeitsschritte zur Durchführung der Materialversuche detailliert dargestellt.

Betonherstellung

Es wurden jeweils 55 Liter Frischbeton (40 Liter bei Versuchen zur Ermittlung des Kompressionsmoduls) in einen Einwellen-Zwangsmischer hergestellt. Folgendes Mischregime wurde gewählt.

- 1.1 Gesteinskörnungen in Mischer geben 0,5 min mischen
- 1.2 Zugabe Zement und Flugasche 0,5 min mischen
- 1.3 Zugabe Wasser 1 min mischen
- 1.4 Zugabe Fließmittel 3 min mischen
- 1.5 Korrektur durch Fließmittel oder Stabilisierer 2 min mischen
- 1.6 ggf. weitere Korrektur 2 min mischen

Frischbetonprüfungen

- 2.1 Bestimmung der Frischbetontemperatur (nach Mischungsfertigstellung sowie kontinuierliche Messung in der Schalung bis zum Erstarrungsende des Betons)
- 2.2 Bei Betonen der Konsistenzklasse F5 und F6: Bestimmung des Ausbreitmaßes *a* entsprechend DIN EN 12350-5:2000-06 sofort nach Mischungsfertigstellung
- 2.3 Bei SVB: Bestimmung des Setzfließmaßes *sm* entsprechend DAfStb -Richtlinie Selbstverdichtender Beton (2003) sofort nach Mischungsfertigstellung
- 2.4 Bei SVB: Bestimmung des Setzfließmaßes mit Blockierring sm_b entsprechend DAfStb - Richtlinie Selbstverdichtender Beton (2003) und zugehörige Setzhöhe h_b [C-16] sofort nach 2.3
- 2.5 Bei SVB: Trichterauslaufzeit t_v nach DAfStb Richtlinie Selbstverdichtender Beton (2003) sofort nach 2.4
- 2.6 Ggf. Überprüfung des Luftporengehaltes mit LP-Topf sofort nach 2.2 bzw. 2.5
- 2.7 Bei Betonen der Konsistenzklasse F5 und F6: Prüfung des Ausbreitmaßes *a* bei den Betonen der Konsistenzklasse F5 und F6 in Abständen von 30, 60, 90 und ggf. 120 Minuten nach Betoneinbau in die Kombinierte Versuchsapparatur, im Gegensatz zum normativen Ausbreitmaßversuch erfolgte kein Durchmischen vor der Prüfung sowie lediglich eine reduzierte Verdichtung mit dem Holzstößel
- 2.8 Bei SVB: Prüfung des Setzfließmaßes *sm* bei den Betonen der Konsistenzklasse SVB in Abständen von 30, 60, 90 und ggf. 120 Minuten

nach Betoneinbau in die Kombinierte Versuchsapparatur, es erfolgte kein Durchmischen des Betons vor der Prüfung

- 2.9 Prüfung der Erstarrungszeiten mit Vicat-Test entsprechend DIN EN 480 2:2006-11, Herstellung des Vicat-Prüfkörpers aus einem Mörtel, der vom Frischbeton mit einem 4-mm-Quadratlochsieb abgesiebt wurde
- 2.10 Prüfung der Erstarrungszeiten des Betons mit dem Knetbeutelverfahren nach E DIN 18218:2008-01

Standardversuch zur Ermittlung des Seitendruckbeiwertes

- 3.1 Einbau des Frischbetons in die Schalung, bei Rüttelbetonen der Konsistenzklasse F5 - F6 Verdichtung unter Verwendung des Holzstößels entsprechend DIN EN 12350-5:2000-06, bei SVB keine Verdichtung, bei Rüttelbetonen der Konsistenzklasse F1 - F4 Verdichtung unter Verwendung eines Innenvibrators Ø 30 mm mit einer Leistung von 700 W und einer Drehzahl von 2700 U/min,
- 3.2 Schließen der Dichtungsfolie
- 3.3 Schließen des Deckels
- 3.4 Aufsetzen der Lastverteilungsplatte aus Stahl
- 3.5 Positionierung aller Wegaufnehmer
- 3.6 Ggf. Einbau des Frischbetons in den Setztrichter (für die Schwindmessungen)
- 3.7 Nullen aller Messgrößen, Start der Messung
- 3.8 Aufbringen einer Vertikalbelastung von F_v = 1,5 kN entspricht σ_v = 24 kN/m²
- 3.9 Erhöhung der Vertikalbelastung im Abstand von 15 min bis zum Erreichen des Erstarrungsendes nach dem Knetbeutelverfahren Bei Simulation einer Betoniergeschwindigkeit von v = 2 m/h (Standard): $\Delta F_v = 0.75 \text{ kN}$ bei $\Delta t = 15 \text{ min}$, Lasterhöhungsschritte werden bei abweichenden Betoniergeschwindigkeiten angepasst
- 3.10 Bei Erreichen des Erstarrungsendes nach dem Knetbeutelverfahren Erhöhung der Vertikallast auf $F_v = 20/30/40/50/60$ kN
- 3.11 Entlastung und Ausbau der Frischbetonprobe

Seitendruckversuch als Dauerlastversuch (Dauerl)

Durchführung von 3.1 bis 3.7, Ersetzen von 3.8 bis 3.10 durch

- 3.8.a Aufbringen einer Vertikalbelastung von $F_v = 10$ kN, entspricht $\sigma_v = 160$ kN/m²
- 3.9.a Nach 24 h Erhöhung der Vertikalbelastung auf $F_v = 30/40/50/60$ kN

Seitendruckversuch mit nachgebender Schalung (NS)

Ersetzen von 3.9 durch:

3.9.b Erhöhung der Vertikalbelastung im Abstand von 15 min bis zum Erreichen des Erstarrungsendes nach dem Knetbeutelverfahren, Bei Simulation einer Betoniergeschwindigkeit von v = 2 m/h (Standard): $\Delta F_v = 0.75$ kN bei $\Delta t = 15$ min, Lasterhöhungsschritte werden bei abweichenden Betoniergeschwindigkeiten angepasst,

immer nach $\Delta t = 60$ min (also nach 60, 120, 180 min etc...) jeweils 2 min nach Lasterhöhung warten, danach Horizontalverschiebung der entkoppelten Schalungselemente und der zugehörigen Seitenwände um s = 1 mm durch gezieltes Aufdrehen der Justiergewinde und der Klemmschrauben.

Seitendruckversuch mit nachgebender Schalung und Erschütterung (NS+VIBd)

Ersetzen von 3.9 durch:

3.9.c Erhöhung der Vertikalbelastung im Abstand von 15 min bis zum Erreichen des Erstarrungsendes nach dem Knetbeutelverfahren, Bei Simulation einer Betoniergeschwindigkeit von v = 2 m/h (Standard): $\Delta F_v = 0,75$ kN bei $\Delta t = 15$ min, Lasterhöhungsschritte werden bei abweichenden Betoniergeschwindigkeiten angepasst,

nach Lasterhöhung zwei Minuten warten, dann Erschütterung mit Pendelschlägen bis zum Erreichen des hydrostatischen Spannungszustandes, jedoch maximal 10 Schläge, erstmals durchführen wenn Seitendruck vom hydrostatischen Spannungszustand um mehr als 10 % abweicht,

immer nach $\Delta t = 60$ min (also nach 60, 120, 180 min etc...) jeweils 2 min nach Lasterhöhung warten, dann Horizontalverschiebung der entkoppelten Schalungselemente und der zugehörigen Seitenwände um s = 1 mm durch gezieltes Aufdrehen der Justiergewinde und der Klemmschrauben, 2 min warten und danach wiederholte Erschütterung mit Pendelgewicht von 1 kg mit maximal 10 Schlägen

Bei Versuchen mit *nachgebender Schalung und geringen Erschütterung* (*NS+VIB*) beträgt der zeitliche Abstand zwischen den Erschütterungen nicht 15 min sondern 60 min.

Seitendruckversuch mit nachgebender Schalung und Vibration (NS+VVIB)

Ersetzen von 3.9 durch:

3.9.d Erhöhung der Vertikalbelastung im Abstand von 15 min bis zum Erreichen des Erstarrungsendes nach dem Knetbeutelverfahren, Bei Simulation einer Betoniergeschwindigkeit von v = 2 m/h (Standard): $\Delta F_v = 0,75$ kN bei $\Delta t = 15$ min, Lasterhöhungsschritte werden bei abweichenden Betoniergeschwindigkeiten angepasst,

nach Lasterhöhung zwei Minuten warten, dann Vibration durch Einschalten des an der Schalung befestigten Rüttlers bis Erreichen des

hydrostatischen Spannungszustandes, jedoch maximal 10 Sekunden, erstmals durchführen wenn Seitendruck vom hydrostatischen Spannungszustand um mehr als 10 % abweicht

immer nach $\Delta t = 60$ min (also nach 60, 120, 180 min etc...) jeweils 2 min nach Lasterhöhung warten, dann Horizontalverschiebung der entkoppelten Schalungselemente und der zugehörigen Seitenwände um s = 1 mm durch gezieltes Aufdrehen der Justiergewinde und der Klemmschrauben, 2 min warten und danach wiederholte Vibration mit Schalungsrüttler

Standardversuch zur Ermittlung des Reibungsbeiwertes

- 4.1 Nullmessung (d.h. Ermittlung der Auszugskraft ohne Betonfüllung mit einer Verschiebungsgeschwindigkeit von 5 mm/min über einen Weg von 1,5 mm und danach 60 s im Ruhezustand)
- 4.2 Einbau des Frischbetons in die Schalung
- 4.3 Schließen der Dichtungsfolie
- 4.4 Schließen des Deckels
- 4.5 Positionierung aller Wegaufnehmer
- 4.6 Nullen aller Messgrößen, Start der Messung
- 4.7 Auszug des Schalungsschwertes mit einer Verschiebungsgeschwindigkeit von 5 mm/min über einen Weg von 1,5 mm
- 4.8 Wartezeit 1 min
- 4.9 Aufsetzen der Lastverteilungsplatte aus Stahl
- 4.10 Auffahren einer Vertikalbelastung von 1,5 kN
- 4.11 Wiederholung von 4.7 bis 4.8
- 4.12 Auffahren einer Vertikalbelastung von 5 kN
- 4.13 Wiederholung von 4.7 bis 4.8
- 4.14 Auffahren einer Vertikalbelastung von 15 kN
- 4.15 Wiederholung von 4.7 bis 4.8
- 4.16 Entlastung, Ausbau der Lastverteilungsplatte
- 4.17 1 h nach Wasserzugabe Wiederholung von 4.9 bis 4.16
- 4.18 Wiederholung von 4.9 bis 4.16 im Abstand von 30 min bzw. 1 h (je nach Erstarrungsverhalten) bis zum Erreichen der Konsistenz "zerläuft bis knetbar" nach dem Knetbeutelverfahren, ggf. Prüfung bis zum Erstarrungsende nach Vicat
- 4.19 Ausbau der Frischbetonprobe

Versuchsdurchführung zur Ermittlung des Reibungsbeiwertes unter Dauerlast (Dauerl)

Ersetzen von 4.10 bis 4.18 durch:

4.10.a Auffahren einer Vertikalbelastung von 5 kN

- 4.11.a Wiederholung von 4.7
- 4.12.a Wiederholung von 4.7 im Abstand von 30 min bzw. 1 h bis zum Erreichen der Konsistenz "zerläuft bis knetbar" nach dem Knetbeutelverfahren

Versuchsdurchführung zur Ermittlung des Reibungsbeiwertes unter Dauerlast und Vibrationseinwirkung (Dauerl+VIB)

Ersetzen von 4.10 bis 4.18 durch:

- 4.10.b Auffahren einer Vertikalbelastung von 5 kN
- 4.11.b 10 Pendelschläge
- 4.12.b 30 s Wartezeit
- 4.12.b Wiederholung von 4.7
- 4.13.b 30 s Wartezeit
- 4.14.b 10 Pendelschläge
- 4.15.b Wiederholung von 4.11.b bis 4.14.b im Abstand von 30 min bzw. 1 h bis zum Erreichen der Konsistenz "zerläuft bis knetbar" nach dem Knetbeutelverfahren

Versuch zur Ermittlung des Kompressionsmoduls

- 5.1 Einbau des Frischbetons in drei Proctortöpfe
- 5.2 Verschließen der Proctortöpfe mit Deckel inklusive Dichtungsfett
- 5.3 Einbau des 1. Proctortopfs,
- 5.4 Einbau der Messuhr, Notieren des Messuhrwertes
- 5.5 Belastung der Frischbetonprobe mit 25 kN/m², Notieren des Messwertes
- 5.6 Erhöhung der Belastung auf 100 kN/m², Notieren des Messwertes
- 5.7 Erhöhung der Belastung auf 250 kN/m², Notieren des Messwertes
- 5.8 Entlasten auf 100 kN/m², Notieren des Messwertes
- 5.9 Entlasten auf 25 kN/m², Notieren des Messwertes
- 5.10 Komplette Entlastung
- 5.11 Wiederholung der Schritte 5.5 bis 5.7
- 5.12 Erhöhen der Last auf 1000 kN/m², Notieren des Messwertes
- 5.13 Ausbau der Frischbetonprobe
- 5.14 Eine Stunde nach Wasserzugabe: Einbau des 2. Proctortopfes
- 5.15 Durchführen der Schritte 5.4 bis 5.13
- 5.16 Zum Zeitpunkt des Erstarrunsbeginns nach Knetbeutelverfahren: Einbau des 3. Proctortopfes
- 5.17 Durchführen der Schritte 5.4 bis 5.13



Bild C-A1: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F5-102



Bild C-A2: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F5-102 (V4)



Bild C-A3: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F5-102.2



Bild C-A4: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F5-102.2 (NS)



Bild C-A5: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F5-102.2 (NS+VIB)



Bild C-A6: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F5-102.2 (NS+VIBd)



Bild C-A7: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F5-102.2 (NS+VVIB)



Bild C-A8: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-200



Bild C-A9: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-200 (Dauerl)



Bild C-A10: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-202 (NS+VIBd)



Bild C-A11: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-200 (V1)



Bild C-A12: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-200 (V4)



Bild C-A13: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-200 (V8)



Bild C-A14: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-202 (NS+VIB+V1)



Bild C-A15: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-200 (NS+VVIB)



Bild C-A16: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-200.2



Bild C-A17: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-200.2 (NS)



Bild C-A18: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-200.2 (NS+VIBb)



Bild C-A19: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-200.2 (NS+VVIB)



Bild C-A20: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-200.3



Bild C-A21: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-200.4



Bild C-A22: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-200.5



Bild C-A23: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-201



Bild C-A24: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-202.2



Bild C-A25: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-202.2 (Temp10)



Bild C-A26: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-202.2 (NS+VIBb)



Bild C-A27: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-202.2 (NS+VVIB)



Bild C-A28: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch F6-202.2 (VIBd)



Bild C-A29: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch SVB-300



Bild C-A30: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch SVB-300 (NS+VIBd)



Bild C-A31: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch SVB-301



Bild C-A32: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch SVB-301a



Bild C-A33: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch SVB-301.2



Bild C-A34: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch SVB-301.2 (NS+VIB)



Bild C-A35: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch SVB-301.2 (NS+VIBd)



Bild C-A36: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch SVB-302.2



Bild C-A37: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch SVB-302.2 (NS+VIBd)



Bild C-A38: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch SVB-303.2



Bild C-A39: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch SVB-303.2 (NS+VIBd)



Bild C-A40: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch SVB-303.2a (NS+VIBd)



Bild C-A41: Zeitliche Entwicklung von Vertikal- und Horizontalspannung sowie zugehöriger Seitendruckbeiwert bei Versuch SVB-304.2

| Versuch | sonstiges | Zeitpunkt | | | Laststufe 30 | | | | | |
|---------------------|--|-----------------------------|---|-------------------------|----------------------------|---------|--------------|------|----------------------|-------------------|
| | | Zeit nach Wasserzugabe t | Zeit nach Betoneinbau t _{eff} | t/t _{E,KB,eff} | t/t _{E,eff,vicat} | σν | σ_{h} | λ | µ _{dyn,max} | μ _{stat} |
| | | [min] | [min] | | | [kN/m²] | [kN/m²] | [-] | [-] | [-] |
| F5-102.2 | Δt | 25 | 0 | 0,00 | 0,00 | 25,1 | 25,3 | 1,01 | 0,030 | 0,007 |
| (SS) | | 60 | 35 | 0,12 | 0,08 | 22,4 | 27,5 | 1,23 | 0,035 | 0,003 |
| | | 120 | 95 | 0,34 | 0,21 | 22,4 | 26,6 | 1,19 | 0,044 | 0,022 |
| | t _{A.KB} | 185 | 160 | 0,57 | 0,36 | 23,3 | 25,1 | 1,08 | 0,052 | 0,032 |
| | | | | | | | | | | |
| F5-102.2 | Δt | 15 | 0 | 0,00 | 0,00 | 27,4 | 23,0 | 0,84 | 0,030 | 0,001 |
| (SS+Bew) | | 60 | 45 | 0,15 | 0,09 | 24,4 | 24,8 | 1,01 | 0,046 | 0,025 |
| | | 120 | 105 | 0,36 | 0,22 | 22,4 | 22,7 | 1,01 | 0,079 | 0,046 |
| | t _{A.KB} | 185 | 170 | 0,58 | 0,36 | 23,5 | 22,7 | 0,97 | 0,287 | 0,220 |
| | | | | | | | | | | |
| F5-102.2 | Erschütterung vor Messung, Δ t | 31 | 0 | 0,00 | 0,00 | 28,3 | 26,9 | 0,95 | 0,031 | 0,001 |
| (SS+Bew+Dauerl+VIB) | Erschütterung vor Messung | 60 | 29 | 0,10 | 0,06 | - | - | - | - | - |
| | Erschütterung vor Messung | 120 | 89 | 0,31 | 0,20 | - | - | - | - | - |
| | Erschütterung vor Messung | 180 | 149 | 0,52 | 0,33 | - | - | - | - | - |
| | Erschütterung vor Messung, t _{A.KB} | 196 | 165 | 0,58 | 0,37 | - | - | - | - | - |
| | nach erneuter Erschütterung, | 31 | 0 | 0,00 | 0,00 | - | - | - | - | - |
| | nach erneuter Erschütterung | 60 | 29 | 0,10 | 0,06 | - | - | - | - | - |
| | nach erneuter Erschütterung | 120 | 89 | 0,31 | 0,20 | - | - | - | - | - |
| | nach erneuter Erschütterung | 180 | 149 | 0,52 | 0,33 | - | - | - | - | - |
| | nach erneuter Erschütterung, t _{A,KB} | 196 | 165 | 0,58 | 0,37 | - | - | - | - | - |
| | • | | | | | | | | | |
| F6-200.2 | Δt | 15 | 0 | 0,00 | 0,00 | 27,2 | 28,1 | 1,03 | 0,030 | 0,011 |
| (SS) | | 60 | 45 | 0,11 | 0,08 | 23,3 | 26,3 | 1,13 | 0,035 | 0,010 |
| | | 120 | 105 | 0,26 | 0,18 | 22,4 | 23,9 | 1,07 | 0,052 | 0,009 |
| | | 180 | 165 | 0,42 | 0,28 | 21,4 | 20,8 | 0,97 | 0,059 | 0,032 |
| | | 240 | 225 | 0,57 | 0,38 | 22,4 | 22,3 | 1,00 | 0,071 | 0,041 |
| | t _{A.KB} | 258 | 243 | 0,61 | 0,42 | 23,3 | 22,3 | 0,96 | 0,084 | 0,040 |
| | | | | | | | | | | |
| F6-200.2 | Δt | 18 | 0 | 0,00 | 0,00 | 26,2 | 24,5 | 0,93 | 0,023 | 0,001 |
| (SS+Bew) | | 60 | 42 | 0,13 | 0,08 | 21,4 | 24,2 | 1,13 | 0,053 | 0,004 |
| | | 120 | 102 | 0,32 | 0,20 | 23,4 | 24,5 | 1,04 | 0,093 | 0,063 |
| | t _{A,KB} | 163 | 145 | 0,45 | 0,29 | 24,4 | 26,9 | 1,10 | 0,313 | 0,260 |
| | | 180 | 162 | 0,50 | 0,32 | 23,5 | 25,7 | 1,09 | 0,870 | 0,810 |

Tabelle C-A2:Ergebnisse der Reibungsversuche Teil 1

| Tabelle C-A3: | Ergebnisse der | Reibungsversuc | he Teil 2 |
|---------------|----------------|------------------|-----------|
| | Li geomose dei | iterbuilgsverbut | |

| Versuch | sonstiges | Laststufe | 85 | | | Laststufe 240 | | | | | | |
|---------------------|--|-----------|--------------|------|-----------------|-------------------|---------|--------------|------|----------------------|-------------------|--|
| | | σν | σ_{h} | λ | $\mu_{dyn,max}$ | μ _{stat} | σν | σ_{h} | λ | µ _{dyn,max} | μ _{stat} | |
| | | [kN/m²] | [kN/m²] | [-] | [-] | [-] | [kN/m²] | [kN/m²] | [-] | [-] | [-] | |
| F5-102.2 | Δt | 87,4 | 84,4 | 0,97 | 0,015 | 0,002 | 247 | 241 | 0,97 | 0,012 | 0,007 | |
| (SS) | | 84,6 | 89,0 | 1,05 | 0,019 | 0,008 | 241,4 | 237,4 | 0,98 | 0,016 | 0,013 | |
| | | 81,4 | 81,3 | 1,00 | 0,021 | 0,008 | 243,5 | 219,2 | 0,90 | 0,031 | 0,025 | |
| | t _{A-KB} | 84,6 | 77,4 | 0,91 | 0,043 | 0,032 | 242,5 | 174,0 | 0,72 | 0,102 | 0,081 | |
| | | | | | | | | | | | | |
| F5-102.2 | Δt | 85,4 | 74,6 | 0,87 | 0,024 | 0,015 | 246,4 | 214,4 | 0,87 | 0,020 | 0,013 | |
| (SS+Bew) | | 80,5 | 72,5 | 0,90 | 0,033 | 0,023 | 241,6 | 209,5 | 0,87 | 0,036 | 0,028 | |
| | | 81,6 | 71,3 | 0,87 | 0,084 | 0,069 | 249,8 | 187,2 | 0,75 | 0,116 | 0,101 | |
| | t _{A-KB} | 84,6 | 65,8 | 0,78 | 0,330 | 0,290 | 243,7 | 143,1 | 0,59 | 0,305 | 0,290 | |
| | | | | | | | | | | | | |
| F5-102.2 | Erschütterung vor Messung, Δ t | 88,5 | 87,1 | 0,99 | 0,024 | 0,010 | - | - | - | - | - | |
| (SS+Bew+Dauerl+VIB) | Erschütterung vor Messung | 83,7 | 84,4 | 1,01 | 0,020 | 0,010 | - | - | - | - | - | |
| | Erschütterung vor Messung | 96,83 | 98,2 | 1,01 | 0,062 | 0,050 | - | - | - | - | - | |
| | Erschütterung vor Messung | 103,02 | 101,52 | 0,99 | 0,205 | 0,183 | - | - | - | - | - | |
| | Erschütterung vor Messung, t _{A,KB} | 103,97 | 103,38 | 0,99 | 0,341 | 0,308 | - | - | - | - | - | |
| | nach erneuter Erschütterung, | 88,5 | 87,1 | 0,99 | - | 0,000 | - | - | - | - | - | |
| | nach erneuter Erschütterung | 83,7 | 84,4 | 1,01 | - | 0,000 | - | - | - | - | - | |
| | nach erneuter Erschütterung | 96,83 | 98,2 | 1,01 | - | 0,000 | - | - | - | - | - | |
| | nach erneuter Erschütterung | 100 | 100 | 1,00 | - | 0,025 | - | - | - | - | - | |
| | nach erneuter Erschütterung, t _{A.KB} | 100 | 100 | 1,00 | - | 0,073 | - | - | - | - | - | |
| | - | | - | - | - | - | | - | - | - | | |
| F6-200.2 | Δt | 90,5 | 94,2 | 1,04 | 0,021 | 0,004 | 245,4 | 248,6 | 1,01 | 0,016 | 0,010 | |
| (SS) | | 83,5 | 86,8 | 1,04 | 0,016 | 0,010 | 243,5 | 241,0 | 0,99 | 0,016 | 0,012 | |
| | | 87,6 | 58,9 | 0,67 | 0,021 | 0,016 | 241,6 | 219,9 | 0,91 | 0,025 | 0,017 | |
| | | 82,5 | 74,6 | 0,90 | 0,031 | 0,024 | 243,5 | 180,8 | 0,74 | 0,053 | 0,495 | |
| | | 88,6 | 76,4 | 0,86 | 0,041 | 0,019 | 243,5 | 156,6 | 0,64 | 0,085 | 0,077 | |
| | t _{A,KB} | 89,7 | 74,6 | 0,83 | 0,042 | 0,028 | 244,6 | 144,0 | 0,59 | 0,122 | 0,111 | |
| | | | | | | - | | | | - | | |
| F6-200.2 | Δt | 86,4 | 82,9 | 0,96 | 0,019 | 0,003 | 251,6 | 244,6 | 0,97 | 0,015 | 0,011 | |
| (SS+Bew) | | 82,5 | 83,2 | 1,01 | 0,031 | 0,013 | 241,6 | 237,3 | 0,98 | 0,027 | 0,018 | |
| | | 86,7 | 84,7 | 0,98 | 0,095 | 0,077 | 246,7 | 226,9 | 0,92 | 0,103 | 0,093 | |
| | t _{A.KB} | 83,7 | 66,7 | 0,80 | 0,338 | 0,306 | 241,6 | 135,2 | 0,56 | 0,280 | 0,265 | |
| | | 81,6 | 73,4 | 0,90 | 0,662 | 0,627 | 241,6 | 171,6 | 0,71 | 0,536 | 0,510 | |

Tabelle C-A4:Ergebnisse der Reibungsversuche Teil 3

| Versuch | sonstiges | Zeitpunkt | | | | Laststufe 30 | | | | | | |
|---------------------|---|-----------------------------|---|-------------------------|----------------------------|--------------|--------------|------|----------------------|-------------------|--|--|
| | | Zeit nach Wasserzugabe t | Zeit nach Betoneinbau t _{eff} | t/t _{E,KB,eff} | t/t _{E,eff,vicat} | σν | σ_{h} | λ | μ _{dyn,max} | ₽ _{stat} | | |
| | | [min] | [min] | | | [kN/m²] | [kN/m²] | [-] | [-] | [-] | | |
| F6-202.2 | Δt | 28,2 | 0 | 0,00 | 0,00 | 27,2 | 25,1 | 0,92 | 0,015 | 0,008 | | |
| (SS) | | 60 | 31,8 | 0,10 | 0,06 | 24,4 | 25,1 | 1,03 | 0,052 | 0,032 | | |
| | | 120 | 91,8 | 0,30 | 0,18 | 24,4 | 25,7 | 1,05 | 0,051 | 0,036 | | |
| | t _{A,KB} | 165 | 136,8 | 0,44 | 0,27 | 28,6 | 29,7 | 1,04 | 0,054 | 0,031 | | |
| | | 180 | 151,8 | 0,49 | 0,30 | 24,4 | 24,5 | 1,00 | 0,052 | 0,032 | | |
| | | | - | | | | | | | - | | |
| F6-202.2 | Δt | 28 | 0 | 0,00 | 0,00 | 27,0 | 22,6 | 0,84 | 0,045 | 0,029 | | |
| (SS+Bew) | | 60 | 32 | 0,09 | 0,06 | 22,4 | 22,6 | 1,01 | 0,080 | 0,053 | | |
| | | 120 | 92 | 0,27 | 0,18 | 21,4 | 20,2 | 0,94 | 0,395 | 0,313 | | |
| | t _{A,KB} | 202,8 | 175 | 0,51 | 0,34 | 23,3 | 17,2 | 0,74 | 2,050 | 1,890 | | |
| | | | | | | | | | | - | | |
| F6-202.2 | Δt | 27 | 0 | 0,00 | 0,00 | - | - | - | - | - | | |
| (SS+Bew+Dauerl) | | 60 | 33 | 0,10 | 0,06 | - | - | | - | - | | |
| | | 120 | 93 | 0,27 | 0,18 | - | - | - | - | - | | |
| | | 180 | 153 | 0,45 | 0,30 | - | - | - | - | - | | |
| | t _{A,KB} | 212 | 185 | 0,54 | 0,36 | - | - | - | - | - | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| F6-202.2 | Erschütterung vor Messung, A t | 22 | 0 | 0,00 | 0,00 | - | - | - | - | - | | |
| (SS+Bew+DauerI+VIB) | Erschütterung vor Messung | 60 | 38 | 0,11 | 0,07 | - | - | - | - | - | | |
| | Erschütterung vor Messung | 120 | 98 | 0,28 | 0,18 | - | - | | - | - | | |
| | Erschütterung vor Messung | 180 | 158 | 0,46 | 0,29 | - | - | - | - | - | | |
| | Erschütterung vor Messung, t _{A,KB} | 227 | 205 | 0,60 | 0,37 | - | - | - | - | - | | |
| | Erschütterung nach Messung, Δ t | 22 | 0 | 0,00 | 0,00 | - | - | ŀ | - | - | | |
| | Erschütterung nach Messung | 60 | 38 | 0,11 | 0,07 | - | - | | - | - | | |
| | Erschütterung nach Messung | 120 | 98 | 0,28 | 0,18 | - | - | - | - | - | | |
| | Erschütterung nach Messung | 180 | 158 | 0,46 | 0,29 | - | - | - | - | - | | |
| | Erschütterung nach Messung, t _{A.KB} | 227 | 205 | 0,60 | 0,37 | - | - | - | - | - | | |

Tabelle C-A5:Ergebnisse der Reibungsversuche Teil 4

| Versuch | sonstiges | Laststufe | 85 | | | Laststufe 240 | | | | | |
|---------------------|--|------------|--------------|------|-----------------|-------------------|---------|--------------|------|-----------------|-------------------|
| | | σ_v | σ_{h} | λ | $\mu_{dyn,max}$ | μ _{stat} | σν | σ_{h} | λ | $\mu_{dyn,max}$ | μ _{stat} |
| | | [kN/m²] | [kN/m²] | [-] | [-] | [-] | [kN/m²] | [kN/m²] | [-] | [-] | [-] |
| F6-202.2 | Δt | 84,3 | 79,9 | 0,95 | 0,014 | 0,009 | 244,3 | 233,3 | 0,95 | 0,009 | 0,007 |
| (SS) | | 81,6 | 81,6 | 1,00 | 0,014 | 0,008 | 240,5 | 229,1 | 0,95 | 0,010 | 0,007 |
| | | 81,4 | 77,7 | 0,95 | 0,021 | 0,015 | 240,5 | 216,2 | 0,90 | 0,017 | 0,013 |
| | t _{A,KB} | 82,5 | 75,9 | 0,92 | 0,024 | 0,017 | 239,5 | 191,5 | 0,80 | 0,032 | 0,027 |
| | | 81,6 | 74,6 | 0,91 | 0,025 | 0,018 | 239,5 | 197,2 | 0,82 | 0,034 | 0,028 |
| | | | | | | | | | | | |
| F6-202.2 | Δt | 92,0 | 81,2 | 0,88 | 0,022 | 0,015 | 249,0 | 219,0 | 0,88 | 0,021 | 0,016 |
| (SS+Bew) | | 80,5 | 64,0 | 0,80 | 0,043 | 0,030 | 242,5 | 108,2 | 0,45 | 0,046 | 0,038 |
| | | 82,5 | 69,8 | 0,85 | 0,199 | 0,180 | 246,7 | 95,1 | 0,39 | 0,182 | 0,165 |
| | t _{A,KB} | 83,5 | 49,0 | 0,59 | 1,070 | 0,990 | - | - | - | - | - |
| | | | - | | | - | | 1 | | | |
| F6-202.2 | Δt | 84,5 | 83,0 | 0,98 | 0,016 | 0,010 | - | - | - | - | - |
| (SS+Bew+Dauerl) | | 89,0 | 80,0 | 0,90 | 0,036 | 0,026 | - | - | - | - | - |
| | | 90,5 | 76,5 | 0,85 | 0,139 | 0,117 | - | - | - | - | - |
| | | 86,5 | 68,5 | 0,79 | 0,398 | 0,369 | - | - | - | - | |
| | t _{A,KB} | 86,5 | 66,6 | 0,77 | 0,570 | 0,530 | - | - | - | - | - |
| | 1 | | r | r | r | r | | | | | - |
| F6-202.2 | Erschütterung vor Messung, ∆ t | 84,5 | 84,8 | 1,00 | 0,016 | 0,007 | - | - | - | - | - |
| (SS+Bew+DauerI+VIB) | Erschütterung vor Messung | 87,8 | 88,4 | 1,01 | 0,024 | 0,012 | - | - | - | - | - |
| | Erschütterung vor Messung | 94,9 | 91,8 | 0,97 | 0,048 | 0,034 | - | - | - | - | - |
| | Erschütterung vor Messung | 95,9 | 91,5 | 0,95 | 0,109 | 0,088 | - | - | - | - | - |
| | Erschütterung vor Messung, t _{A.KB} | 93,8 | 87,5 | 0,93 | 0,178 | 0,155 | - | - | - | - | - |
| | Erschütterung nach Messung, | 84,5 | 84,8 | 1,00 | - | 0,000 | - | - | - | - | - |
| | Erschütterung nach Messung | 87,8 | 88,4 | 1,01 | - | 0,002 | - | - | - | - | - |
| | Erschütterung nach Messung | 94,9 | 91,8 | 0,97 | - | 0,001 | - | - | - | - | - |
| | Erschütterung nach Messung | 95,9 | 91,5 | 0,95 | - | 0,007 | - | - | - | - | - |
| 1 | Erschütterung nach Messung, take | 93.8 | 87.5 | 0.93 | - | 0.005 | - | - | - | - | - |

Tabelle C-A6:Ergebnisse der Reibungsversuche Teil 5

| Versuch | sonstiges | Zeitpunkt | | | | Laststufe 30 | | | | |
|-----------|-------------------|-----------------------------|---|-------------------------|----------------------------|--------------|--------------|------|-----------------|-------------------|
| | | Zeit nach Wasserzugabe t | Zeit nach Betoneinbau t _{eff} | t/t _{E,KB,eff} | t/t _{E,eff,vicat} | σν | σ_{h} | λ | $\mu_{dyn,max}$ | μ _{stat} |
| | | [min] | [min] | | | [kN/m²] | [kN/m²] | [-] | [-] | [-] |
| SVB-300 | Δt | 21 | 0 | 0,00 | 0,00 | 28 | 27 | 0,96 | 0,005 | 0,000 |
| (SS) | | 120 | 99 | 0,15 | 0,13 | 28 | 27 | 0,96 | 0,025 | 0,010 |
| | | 180 | 159 | 0,25 | 0,21 | 28 | 27 | 0,96 | 0,038 | 0,011 |
| | | 240 | 219 | 0,34 | 0,29 | 28 | 27 | 0,96 | 0,042 | 0,018 |
| | | 300 | 279 | 0,44 | 0,37 | 28 | 27 | 0,96 | 0,049 | 0,025 |
| | t _{A.KB} | 360 | 339 | 0,53 | 0,45 | 28 | 27 | 0,96 | 0,056 | 0,031 |
| | | | | | | | 1 | | | |
| SVB-300 | Δt | 20 | 0 | 0,00 | 0,00 | 27,5 | 27,5 | 1,00 | 0,007 | 0,001 |
| (SS+Bew) | | 60 | 40 | 0,06 | 0,06 | 27,5 | 27,5 | 1,00 | 0,011 | 0,002 |
| | | 120 | 100 | 0,16 | 0,15 | 27,5 | 27,5 | 1,00 | 0,027 | 0,016 |
| | | 180 | 160 | 0,25 | 0,24 | 27,5 | 27,5 | 1,00 | 0,061 | 0,031 |
| | | 240 | 220 | 0,34 | 0,33 | 27,5 | 27,5 | 1,00 | 0,110 | 0,076 |
| | | 300 | 280 | 0,44 | 0,42 | 27,5 | 27,5 | 1,00 | 0,289 | 0,232 |
| | t _{A,KB} | 360 | 340 | 0,53 | 0,51 | 27,5 | 27,5 | 1,00 | 0,390 | 0,250 |
| | 1 | | | | | | | | | |
| SVB-301.2 | Δt | 30 | 0 | 0,00 | 0,00 | 26,2 | 24,5 | 0,93 | 0,009 | 0,005 |
| (SS) | | 60 | 30 | 0,09 | 0,06 | 22,4 | 24,1 | 1,08 | 0,036 | 0,016 |
| | | 120 | 90 | 0,26 | 0,17 | 22,4 | 25,1 | 1,12 | 0,043 | 0,007 |
| | | 180 | 150 | 0,44 | 0,29 | 22,4 | 25,1 | 1,12 | 0,064 | 0,018 |
| | t _{A,KB} | 230 | 200 | 0,59 | 0,39 | 22,4 | 24,8 | 1,11 | 0,047 | 0,007 |
| | | 240 | 210 | 0,62 | 0,41 | 27,4 | 26,6 | 0,97 | 0,053 | 0,032 |
| | | | | | | | | | | |
| SVB-301.2 | Δι | 35 | 0 | 0,00 | 0,00 | 25,3 | 26,0 | 1,03 | 0,045 | 0,008 |
| (22+R6M) | | 60 | 25 | 0,09 | 0,06 | 23,5 | 28,4 | 1,21 | 0,051 | 0,030 |
| | | 120 | 85 | 0,31 | 0,19 | 22,5 | 26,6 | 1,18 | 0,073 | 0,050 |
| | | 180 | 145 | 0,52 | 0,33 | 22,4 | 26,9 | 1,20 | 0,263 | 0,211 |
| | t _{A.KB} | 225 | 190 | 0,69 | 0,43 | 24,4 | 30,2 | 1,24 | 0,889 | 0,807 |

Tabelle C-A7:Ergebnisse der Reibungsversuche Teil 6

| Versuch | sonstiges | Laststufe | 85 | | | Laststufe 240 | | | | | | |
|-----------|-------------------|------------|--------------|------|----------------------|-------------------|---------|--------------|------|----------------------|-------------------|--|
| | | σ_v | σ_{h} | λ | μ _{dyn,max} | μ _{stat} | σν | σ_{h} | λ | μ _{dyn,max} | μ _{stat} | |
| | | [kN/m²] | [kN/m²] | [-] | [-] | [-] | [kN/m²] | [kN/m²] | [-] | [-] | [-] | |
| SVB-300 | Δt | 86 | 85 | 0,99 | 0,007 | 0,000 | 254 | 253 | 1,00 | 0,003 | 0,000 | |
| (SS) | | 86 | 85 | 0,99 | 0,008 | 0,004 | 254 | 253 | 1,00 | 0,004 | 0,001 | |
| | | 86 | 85 | 0,99 | 0,013 | 0,003 | 241 | 235 | 0,98 | 0,007 | 0,003 | |
| | | 86 | 85 | 0,99 | 0,015 | 0,008 | 241 | 235 | 0,98 | 0,011 | 0,006 | |
| | | 86 | 85 | 0,99 | 0,017 | 0,010 | 254 | 235 | 0,93 | 0,019 | 0,011 | |
| | t _{A.KB} | 86 | 80 | 0,93 | 0,030 | 0,019 | 256 | 214 | 0,84 | 0,046 | 0,031 | |
| | | | | | | | | | | | | |
| SVB-300 | Δt | 87,5 | 87,5 | 1,00 | 0,003 | 0,001 | 246 | 246 | 1,00 | 0,001 | 0,000 | |
| (SS+Bew) | | 87,5 | 87,5 | 1,00 | 0,005 | 0,000 | 246 | 246 | 1,00 | 0,002 | 0,001 | |
| | | 87,5 | 87,5 | 1,00 | 0,013 | 0,005 | 246 | 246 | 1,00 | 0,005 | 0,002 | |
| | | 87,5 | 87,5 | 1,00 | 0,034 | 0,020 | 246 | 246 | 1,00 | 0,020 | 0,010 | |
| | | 87,5 | 87,5 | 1,00 | 0,090 | 0,073 | 237 | 233 | 0,98 | 0,059 | 0,050 | |
| | | 87,5 | 87,5 | 1,00 | 0,226 | 0,196 | 241 | 222 | 0,92 | 0,137 | 0,132 | |
| | t _{A,KB} | 83 | 80 | 0,96 | 0,365 | 0,267 | 231 | 197 | 0,85 | 0,212 | 0,188 | |
| | | | | | | | | | | | | |
| SVB-301.2 | Δt | 86,4 | 84,4 | 0,98 | 0,007 | 0,002 | 250,5 | 245,9 | 0,98 | 0,010 | 0,004 | |
| (SS) | | 88,7 | 92,6 | 1,04 | 0,013 | 0,004 | 241,6 | 240,6 | 1,00 | 0,007 | 0,001 | |
| | | 89,7 | 91,8 | 1,02 | 0,015 | 0,003 | 243,7 | 235,8 | 0,97 | 0,008 | 0,005 | |
| | | 82,5 | 85,3 | 1,03 | 0,018 | 0,012 | 245,7 | 214,1 | 0,87 | 0,018 | 0,012 | |
| | t _{A.KB} | 81,6 | 81,6 | 1,00 | 0,027 | 0,005 | 248,7 | 209,1 | 0,84 | 0,025 | 0,018 | |
| | | 92,6 | 89,0 | 0,96 | 0,021 | 0,005 | 251,6 | 203,3 | 0,81 | 0,031 | 0,023 | |
| | | | | | | | | | | | | |
| SVB-301.2 | Δt | 91,6 | 92,1 | 1,00 | 0,019 | 0,005 | 249,6 | 249,9 | 1,00 | 0,016 | 0,011 | |
| (SS+Bew) | | 86,7 | 92,4 | 1,07 | 0,025 | 0,006 | 246,7 | 249,2 | 1,01 | 0,017 | 0,014 | |
| | | 83,7 | 89,9 | 1,07 | 0,067 | 0,053 | 242,7 | 237,0 | 0,98 | 0,057 | 0,043 | |
| | | 86,7 | 84,7 | 0,98 | 0,310 | 0,270 | 245,7 | 189,0 | 0,77 | 0,260 | 0,245 | |
| | t _{a KB} | 89,7 | 82,2 | 0,92 | 0,550 | 0,520 | 246,7 | 161,7 | 0,66 | 0,449 | 0,435 | |

Tabelle C-A8:Ergebnisse der Reibungsversuche Teil 7

| Versuch | sonstiges | Zeitpunkt | | | | Laststufe 30 | | | | | | |
|-----------|-------------------|-----------------------------|---|-------------------------|----------------------------|--------------|--------------|------|----------------------|-------------------|--|--|
| | | Zeit nach Wasserzugabe t | Zeit nach Betoneinbau t _{eff} | t/t _{E,KB,eff} | t/t _{E,eff,vicat} | σν | σ_{h} | λ | µ _{dyn,max} | μ _{stat} | | |
| | | [min] | [min] | | | [kN/m²] | [kN/m²] | [-] | [-] | [-] | | |
| SVB-302.2 | Δt | 30 | 0 | 0,00 | 0,00 | 27,4 | 27,8 | 1,02 | 0,031 | 0,017 | | |
| (SS+Bew) | | 60 | 30 | 0,08 | 0,05 | 23,5 | 25,4 | 1,08 | 0,053 | 0,009 | | |
| | | 120 | 90 | 0,25 | 0,16 | 24,4 | 24,4 | 1,00 | 0,069 | 0,043 | | |
| | | 180 | 150 | 0,42 | 0,26 | 23,5 | 23,2 | 0,99 | 0,280 | 0,230 | | |
| | t _{A,KB} | 225 | 195 | 0,54 | 0,34 | 22,5 | 25,4 | 1,13 | 0,900 | 0,830 | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| SVB-303.2 | Δt | 33 | 0 | 0,00 | 0,00 | 28,3 | 24,5 | 0,87 | 0,028 | 0,008 | | |
| (SS) | | 60 | 27 | 0,06 | 0,04 | 21,4 | 24,5 | 1,14 | 0,042 | 0,003 | | |
| | | 120 | 87 | 0,21 | 0,14 | 23,3 | 23,6 | 1,01 | 0,057 | 0,039 | | |
| | | 180 | 147 | 0,35 | 0,23 | 22,4 | 21,7 | 0,97 | 0,095 | 0,049 | | |
| | | 240 | 207 | 0,49 | 0,33 | 23,3 | 24,5 | 1,05 | 0,085 | 0,061 | | |
| | t _{A,KB} | 260 | 227 | 0,54 | 0,36 | 23,3 | 24,5 | 1,05 | 0,089 | 0,049 | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| SVB-303.2 | Δt | 30 | 0 | 0,00 | 0,00 | 26,2 | 21,7 | 0,83 | 0,038 | 0,008 | | |
| (SS+Bew) | | 60 | 30 | 0,07 | 0,05 | 23,5 | 26,6 | 1,13 | 0,094 | 0,055 | | |
| | | 120 | 90 | 0,21 | 0,15 | 24,4 | 27,2 | 1,11 | 0,218 | 0,190 | | |
| | | 180 | 150 | 0,36 | 0,25 | 23,5 | 26,6 | 1,13 | 0,630 | 0,540 | | |
| | t _{A,KB} | 220 | 190 | 0,45 | 0,32 | 23,5 | 28,8 | 1,22 | 0,820 | 0,720 | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| SVB-304.2 | Δt | 27 | 0 | 0,00 | 0,00 | 26,2 | 24,4 | 0,93 | 0,028 | 0,010 | | |
| (SS+Bew) | | 60 | 33 | 0,06 | 0,04 | 23,5 | 25,7 | 1,09 | 0,046 | 0,024 | | |
| | | 120 | 93 | 0,18 | 0,12 | 21,4 | 23,5 | 1,10 | 0,110 | 0,080 | | |
| | | 180 | 153 | 0,30 | 0,20 | 22,4 | 25,1 | 1,12 | 0,223 | 0,200 | | |
| | | 240 | 213 | 0,42 | 0,28 | 21,4 | 24,4 | 1,14 | 0,752 | 0,720 | | |
| | t _{A.KB} | 305 | 278 | 0,54 | 0,37 | 22,5 | 26,3 | 1,17 | 1,531 | 1,480 | | |

Tabelle C-A9:Ergebnisse der Reibungsversuche Teil 8

| Versuch | sonstiges | Laststufe | 85 | | | | Laststufe 240 | | | | | |
|-----------|-------------------|------------|----------------|------|----------------------|-------------------|----------------------|--------------|------|----------------------|-------------------|--|
| | | σ_v | σ _h | λ | µ _{dyn,max} | μ _{stat} | σν | σ_{h} | λ | µ _{dyn,max} | μ _{stat} | |
| | | [kN/m²] | [kN/m²] | [-] | [-] | [-] | [kN/m ²] | [kN/m²] | [-] | [-] | [-] | |
| SVB-302.2 | Δt | 87,5 | 89,0 | 1,02 | 0,016 | 0,011 | 248,5 | 238,2 | 0,96 | 0,001 | 0,007 | |
| (SS+Bew) | | 88,7 | 87,2 | 0,98 | 0,022 | 0,012 | 243,7 | 231,5 | 0,95 | 0,015 | 0,011 | |
| | | 79,5 | 78,0 | 0,98 | 0,048 | 0,033 | 242,7 | 223,2 | 0,92 | 0,037 | 0,300 | |
| | | 84,6 | 74,0 | 0,87 | 0,245 | 0,223 | 240,6 | 176,4 | 0,73 | 0,210 | 0,199 | |
| | t _{A.KB} | 83,7 | 71,5 | 0,85 | 0,570 | 0,552 | 242,7 | 150,5 | 0,62 | 0,396 | 0,368 | |
| | | | | | | | | | - | | | |
| SVB-303.2 | Δt | 88,5 | 90,2 | 1,02 | 0,018 | 0,001 | 248,5 | 252,9 | 1,02 | 0,009 | 0,004 | |
| (SS) | | 84,6 | 90,0 | 1,06 | 0,015 | 0,001 | 423,7 | 252,4 | 0,60 | 0,013 | 0,009 | |
| | | 84,6 | 85,1 | 1,01 | 0,037 | 0,026 | 238,4 | 234,3 | 0,98 | 0,033 | 0,021 | |
| | | 83,5 | 82,9 | 0,99 | 0,040 | 0,029 | 241,6 | 211,6 | 0,88 | 0,046 | 0,034 | |
| | | 87,6 | 79,6 | 0,91 | 0,052 | 0,039 | 240,5 | 176,8 | 0,74 | 0,082 | 0,072 | |
| | t _{A,KB} | 81,6 | 81,7 | 1,00 | 0,035 | 0,025 | 239,5 | 182,9 | 0,76 | 0,069 | 0,055 | |
| | | | - | | - | | | | | - | - | |
| SVB-303.2 | Δt | 90,5 | 66,1 | 0,73 | 0,033 | 0,019 | 246,6 | 244,1 | 0,99 | 0,025 | 0,019 | |
| (SS+Bew) | | 83,7 | 87,4 | 1,05 | 0,073 | 0,057 | 240,6 | 239,5 | 1,00 | 0,061 | 0,052 | |
| | | 90,8 | 93,6 | 1,03 | 0,170 | 0,144 | 243,7 | 234,9 | 0,96 | 0,120 | 0,110 | |
| | | 81,6 | 84,4 | 1,03 | 0,390 | 0,350 | 242,7 | 215,0 | 0,89 | 0,235 | 0,220 | |
| | t _{A.KB} | 84,6 | 87,5 | 1,03 | 0,478 | 0,438 | 241,6 | 206,1 | 0,85 | 0,290 | 0,280 | |
| | | | | - | - | | | - | - | - | - | |
| SVB-304.2 | Δt | 85,4 | 86,0 | 1,01 | 0,017 | 0,009 | 247,5 | 246,8 | 1,00 | 0,012 | 0,010 | |
| (SS+Bew) | | 83,7 | 87,1 | 1,04 | 0,032 | 0,022 | 241,6 | 237,0 | 0,98 | 0,022 | 0,015 | |
| | | 81,6 | 82,0 | 1,00 | 0,085 | 0,067 | 240,6 | 225,7 | 0,94 | 0,062 | 0,057 | |
| | | 81,6 | 79,8 | 0,98 | 0,192 | 0,178 | 244,6 | 209,8 | 0,86 | 0,137 | 0,124 | |
| | | 80,6 | 73,4 | 0,91 | 0,445 | 0,425 | 240,6 | 168,2 | 0,70 | 0,312 | 0,238 | |
| | t _{A.KB} | 81,6 | 64,2 | 0,79 | 0,804 | 0,790 | 240,6 | 136,1 | 0,57 | 0,575 | 0,562 | |

| Beton | Luft- | Probe | a/sm | | | | | | Mess | swert | | | | | |
|-------|--------|-------|------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|---------|----------|-------|
| | gehalt | | | | I | Belastun | g | | E | Entlastun | g | | Wiederb | elastung | 5 |
| | | | | 0 | 25 | 100 | 250 | 1000 | 100 | 25 | 0 | 25 | 100 | 250 | 1000 |
| | | | | kN/m² | kN/m² | kN/m² | kN/m² | kN/m² | kN/m² | kN/m² | kN/m² | kN/m² | kN/m² | kN/m² | kN/m² |
| | [%] | | [cm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
| EC | | P1 | 68,0 | 15,00 | 14,44 | 13,21 | 12,98 | 10,15 | 10,39 | 10,91 | 11,39 | 11,25 | 10,70 | 10,13 | 9,03 |
| 202 2 | 2,0 | P2 | 64,0 | 15,00 | 14,35 | 13,35 | 12,25 | х | 12,40 | 12,88 | 13,42 | 13,10 | 12,35 | 11,60 | х |
| 202.2 | | P3 | 55,0 | 15,00 | 14,50 | 13,40 | 12,70 | х | 12,77 | 13,37 | 13,87 | 13,53 | 12,85 | 12,21 | х |
| CVD | | P1 | 71,0 | 15,00 | 14,75 | 14,08 | 13,50 | х | 13,70 | 14,16 | 14,46 | 14,25 | 13,82 | 13,35 | 12,70 |
| 300 | 1,8 | P2 | 70,5 | 15,00 | 14,60 | 13,83 | 13,06 | х | 13,30 | 13,91 | 14,34 | 14,05 | 13,37 | 12,82 | 11,54 |
| 500 | | P3 | 49,5 | 15,00 | 14,35 | 13,36 | 12,61 | х | 12,83 | 13,65 | 14,20 | 13,84 | 12,84 | 12,25 | 11,16 |

Tabelle C-A10:Erge

Ergebnisse Kompressionsversuche

Teilprojekt D

Einfluss von Erschütterungen auf frischen und jungen selbstverdichtenden Beton (SVB) sowie auf den sich einstellenden Frischbetondruck bei rotationssymmetrischen Schalungen (Rundbehälter)

von

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Konrad Zilch Dipl.-Ing. Jan Lingemann, Dipl.-Ing. Christian Stettner

Technische Universität München; Institut für Massivbau

Jun.-Prof. Dr.-Ing. F. Dehn Dipl.-Ing. A. König, Dipl.-Wirtsch.-Ing. K. Pistol

Universität Leipzig; Institut für Mineralogie, Kristallographie und Materialwissenschaft
Inhaltsverzeichnis Schlussbericht Teilprojekt D

| D.1 | Einleitung | 3 |
|------------|---|-----|
| D.1.1 | Problemstellung zum Teilantrag D | 3 |
| D.1.2 | Zielsetzung des Teilantrags D | 5 |
| D.2 | Ausgangsbasis und Grundlagen für Teilprojekt D | 6 |
| D.2.1 | Rheologisches Verhalten von Frischbeton mit fließfähiger Konsiste | nz6 |
| D.2.2 | Erschütterungen im Bauwesen | 9 |
| D.2.3 | Auswirkungen von Erschütterungen | 12 |
| D.3 | Durchgeführte Arbeiten | 14 |
| D.3.1 | Überblick Untersuchungsprogramm | 14 |
| D.3.2 | Materialversuche (Phase A) | 15 |
| D.3 | 3.2.1 Versuchseinrichtung | 15 |
| D.3 | 3.2.2 Versuchsdurchführung | 16 |
| D.3.3 | Kleinkörperversuche (Phase B) | 18 |
| D.3 | 3.3.1 Versuchseinrichtung | 18 |
| D.3 | 3.3.2 Versuchsdurchführung | 19 |
| D.3.4 | Großversuch (Phase C) | 20 |
| D.3 | 3.4.1 Versuchseinrichtung | 20 |
| D.3 | 3.4.2 Versuchsdurchführung | 22 |
| D.4 | Ergebnisse | 23 |
| D.4.1 | Materialversuche | 23 |
| D.4.2 | Kleinkörperversuche | 25 |
| D.4.3 | Großversuch | 26 |
| D.5 | Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf | 30 |
| D.6 | Literaturverzeichnis | 32 |
| D.7 | Danksagung | 33 |
| D.8 | Anlagen | 34 |
| D.8.1 | Ergebnisse Phase A | 35 |
| D.8 | 8.1.1 Erstarrungsverhalten ohne Erschütterungen | 35 |
| D.8 | 8.1.2 Entwickelte Rezepturen | 36 |
| D.8 | 8.1.3 Frischbetoneigenschaften (ohne/ mit Erschütterungen) | 39 |
| D.8.2 | Ergebnisse Phase B | 40 |
| D.8 | 8.2.1 Frischbetonkennwerte | 40 |
| D.8 | 8.2.2 Kenngrößen der Einwirkungen | 40 |
| D.8.3 | Ergebnisse Phase C | 46 |
| D.8 | 8.3.1 Versuchsaufbau | 46 |
| D.8 | 8.3.2 Frischbetonkennwerte | 46 |
| D.8 | 8.3.3 Kenngrößen der Einwirkungen | 49 |
| D.8 | 8.3.4 Übersicht Frischbetondruckmessungen | 52 |
| D.8 | 8.3.5 Übersicht Ergebnisse Beschleunigungsmessungen | 54 |

D.1 Einleitung

D.1.1 Problemstellung zum Teilantrag D

Unter Einsatz von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz können erhöhte Anforderungen an die zu betonierenden Bauteile durch eine verbesserte Verarbeitbarkeit und Einbaubarkeit erfüllt werden. Ein großer Vorteil liegt im Entfallen von Verdichtungsarbeit bei der Verwendung fließfähiger Betone. Eine Verflüssigung durch Vibrationen ist aufgrund der vorhandenen fließfähigen Konsistenz nicht erforderlich. Planmäßig werden somit keine Erschütterungen in den Frischbeton eingebracht.

Untersuchungen zu Einflüssen von unplanmäßigen Erschütterungen auf den Beton, durch z.B. [D-1], [D-2], [D-3], liegen derzeit nur vereinzelt vor. In [D-3] wurde der Einfluss von Erschütterungen auf die Festigkeitsentwicklung des Betons untersucht. Mögliche Auswirkungen von Störungen in der Festigkeitsentwicklung von Betonen durch Erschütterungen können eine verminderte Verbundfestigkeit zwischen Stahl und Beton, sowie eine Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit des Bauwerkes sein.

In der Praxis wurde mehrfach ein Einfluss von Erschütterungen auf den sich einstellenden Frischbetondruck beobachtet. Der Frischbetondruck bildet für die Dimensionierung von Schalungen den maßgeblichen Lastfall. Gemäß des derzeit vorliegenden Normenentwurfes [D-4] zur Ermittlung der Belastungen aus Frischbetondruck auf Schalungen wird gefordert, dass der hydrostatische Druck in einer Höhe des noch nicht erstarrten Betons anzusetzen ist, sofern der Beton in dieser Zeit Erschütterungen ausgesetzt ist, welche in der Größe von dynamischen Einwirkungen durch den Betrieb von Außenrüttlern liegen. Der Grund hierfür liegt in einer vermuteten Verflüssigung des Betons durch den Eintrag dynamischer Einwirkungen (Wiederanregung). Eine quantitative Einordnung von Belastungen aus stoßartigen Erschütterungen, die z.B. durch den Anprall von Betonierkübeln, Bewegung von Personal auf Arbeitsbühnen, entstehen können, ist aufgrund mangelnder Untersuchungsergebnisse nicht möglich.

Bei einer Wiederanregung des Betons können höhere Beanspruchungen entstehen als bei der Bemessung der Schalung angesetzt wurden. Im Besonderen seien hier selbsttragende, rotationssymmetrische Schalungskonstruktionen genannt, welche planmäßig nur für geringe asymmetrische Belastungen dimensioniert werden. Eine lokale Verflüssigung des Betons durch dynamische Einwirkungen erzeugt ein über den Umfang ungleichmäßiges Lastbild. Die stützende Eigenschaft der rotationssymmetrischen Belastung wird somit reduziert, es entstehen dadurch lokal erhöhte Beanspruchungen für die Konstruktion. Die beschreibenden Größen für das sich einstellende Lastbild ist der Betrag der Last im Bereich mit wiederverflüssigtem Beton, die Ausbreitung der Wiederverflüssigung über den Umfang, sowie die Lastgröße im unangeregten Bereich unter Berücksichtigung der Verformbarkeit des Systems (s. Bild D-1).



Bild D-1: Schematische Darstellung eines Lastverteilung im Grundriss mit lokaler Verflüssigung im Vergleich zu einer symmetrischer Belastung

Eine Untersuchung des Einflusses von Erschütterungen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften ist aufgrund dessen möglicher Auswirkungen auf die Standsicherheit der Baubehelfe und die Qualität des fertig gestellten Bauwerkes erforderlich.

D.1.2 Zielsetzung des Teilantrags D

Der Einfluss der Erschütterungen auf die Frischbetoneigenschaften von selbstverdichtenden Betonen wurde mehrfach beobachtet. Auswirkungen der veränderten Frischbetoneigenschaften auf den sich einstellenden Frischbetondruck sollen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durch Bauteilversuche mit lotrechten und geraden Schalungen systematisch untersucht werden. Dadurch soll eine Grundlage geschaffen werden, die gewonnenen Ergebnisse auf ein Belastungsbild für rotationssymmetrische Systeme zu übertragen. In den folgenden Untersuchungsschwerpunkten sollen hierfür neue Erkenntnisse gewonnen werden:

Untersuchung des Einflusses von Erschütterungen auf die Materialeigenschaften und die Struktur von frischem und jungem SVB

Ermittlung des Einflusses von Erschütterungen auf den Frischbetondruck sowie der Ausbreitung von Erschütterungen innerhalb des Betons

Untersuchung des Einflusses der Verformbarkeit der Schalung auf den Frischbetondruck

D.2 Ausgangsbasis und Grundlagen für Teilprojekt D

D.2.1 Rheologisches Verhalten von Frischbeton mit fließfähiger Konsistenz

die Verwendung anorganischer, pulverförmiger Betonzusatzstoffe Durch und hochwirksamer Betonzusatzmittel, wie Fließmittel sowie Stabilisierer (Sedimentationsreduzierer), gelingt die Herstellung selbstverdichtender. entmischungsfreier Betone, die allein durch die Schwerkraft entlüften und bis zum Niveauausgleich selbstständig fließen.

Grundsätzlich wird zwischen drei verschiedenen Rezepturprinzipien unterschieden: dem Mehlkorn-, dem Stabilisierer- und dem Kombinationstyp, wobei ausschließlich die beiden erstgenannten Typen in diesem Projekt zum Einsatz kamen. Beim Mehlkorntyp wird durch eine präzise Mehlkornzusammenstellung und durch einen höheren Mehlkorngehalt eine ausreichend hohe Viskosität erreicht, die einer Entmischungsneigung entgegenwirkt. Zusätzlich wird das Größtkorn auf max. 16 mm begrenzt. Beim Stabilisierertyp gelingt die Herstellung eines entmischungsfreien, selbstverdichtenden Betons, durch die Verwendung von wasserbindenden, chemischen Zusätzen – den sogen. Stabilisierer. Der Mehlkorngehalt entspricht einem Normalbeton. Neben beiden Rezepturprinzipien wurde durch die Variation des Wassergehaltes der Viskositätsgrad verändert. Entsprechend wurde zwischen hochviskos (Trichterauslaufzeit: 13 +/- 2s) und niederviskos (Trichterauslaufzeit: 5 +/- 1s) unterschieden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens waren neben dem rheologischen Verhalten die parallel ablaufenden chemischen Erhärtungsvorgänge entscheidend. Sofort nach der Wasserzugabe kommt es an der Zementkornoberfläche zur Hydratation, bei der erste Reaktionsprodukte entstehen. Vor allem auf den C₃A-Klinkerphasen bilden sich unter Mitwirkung des Sulfatträgers faserförmigen, mikrokristalline Ettringitkristalle. Nach ca. 1h kommt es durch den vollständigen Verbrauch des Sulfatträgers zur dormanten Periode. Gleichzeitig bilden sich auf der C₃S-Oberfläche erste langfaserige CSH-Phasen und Portlanditkristalle. Durch die geringe Größe der gebildeten Phasen können vorhandene Hohlräume nicht überbrückt werden. Bis zur Bildung ausreichender Phasen mit entsprechenden Bindungskräften besitzt der Frischbeton ein plastisches Verhalten.

Prinzipiell wird beim zeitlichen Verlauf des Fließverhaltens zwischen thixotropen und rheopexen Stoffen unterschieden, wobei im Allgemeinen Betone eine thixotropes Verhalten besitzen. Der Begriff Thixotropie beschreibt die Abnahme der Viskosität infolge mechanischer Beanspruchungen. Über die entstehende Bruchfläche A_b im Scherdiagramm (Bild D-2) kann die thixotrope Energie quantifiziert werden. Je größer die Bruchfläche ist, umso deutlicher tritt eine Wiederverflüssigung ein.



Bild D-2: Links: Zeitabhängige Fließverhalten eines thixotropen und rheopexen Stoffes; Rechts: Scherdiagramm eines thixotropen Stoffes mit entsprechenden Quantifizierung des thixotropen Verhaltens [D-8]

Mikroskopisch kann das thixotrope Verhalten mit der Reduktion vorhandener Bindungskräfte erklärt werden. So konnte in [D-9] ein direkter Zusammenhang zwischen dem C₃A-Zementklinkergehalt und dem thixotropen Verhalten festgestellt werden. Mit zunehmendem C₃A-Gehalt steigt ab der zweiten Stunde mit der dynamischen Viskosität das thixotrope Verhalten durch die Mehrzahl an ersten Hydratationsprodukten (Ettringit) an.



Gerade bei fließfähigen Betonen konnte ein deutliches thixotropes Verhalten beobachtet werden. Aufgrund der Vielzahl an chemisch und physikalisch parallel ablaufenden Vorgängen konnte der Grund für das ausgeprägte thixotrope Verhalten noch nicht eindeutig geklärt werden.

Es ist zu vermuten, dass ein Großteil des zugegebenen Wassers vom Mehlkorn adsorbiert wird, so dass in den ersten Stunden weniger Wasser für die Entstehung erster Hydratationsprodukte zur Verfügung steht.

Das deutliche thixotrope Verhalten kann ebenfalls durch den hohen Fließmittelgehalt und denn damit verbundenen "Depoteffekt" erklärt werden. So können nicht alle Fließmittelpolymere direkt nach ihrer Zugabe vollständig an den positiv geladenen Zementpartikeln und an den ersten Hydratationsprodukten (Ettringit) adsorbiert werden. Entsprechend ihrer Ladungsdichte liegen ein Teil der Polymere wirkungslos in der Porenlösung und können zu späteren Zeitpunkten aktiviert werden.

Durch Messungen der Scherspannung/ Schergeschwindigkeitsbeziehungen an Zementleimen konnten Wallevik und Iversen (1997) [D-10] deutlich zeigen, dass Betonzusatzmittel, wie Fließmittel oder Luftporenbildner das thixotrope Verhalten beeinflussen.

D.2.2 Erschütterungen im Bauwesen

Als Erschütterungen werden gemäß [D-5] mechanische Schwingungen fester Körper bezeichnet, welche eine potentiell schädigende oder belästigende Wirkung besitzen. Es wird unterschieden zwischen kurzzeitigen Erschütterungen und Dauererschütterungen. Kurzzeitige Erschütterungen können aufgrund deren Häufigkeit keine Materialermüdungserscheinungen hervorrufen, auch ist eine Resonanzerzeugung in der angeregten Struktur nicht möglich.

Mechanische Schwingungen werden durch dynamische Prozesse erzeugt. Die auf das Bauteil einwirkenden dynamischen Prozesse können wie folgt gegliedert werden:



Bild D-4: Übersicht dynamische Prozesse im Bauwesen

Ein Beispiel für periodische Einwirkungsprozesse ist die Anregung durch einen Innenrüttler. Diskrete Impulseinwirkungen, erzeugt durch einen Anprall eines Betonierkübels oder das Einklopfen von Schalungen, sind den nicht-periodischen Schwingungen zuzuordnen.

Kenngrößen

Die Kenngrößen einer mechanischen Schwingung, welche durch einwirkende Erschütterungen im Bauteil erzeugt werden, sollen im Folgenden am Beispiel einer freien, harmonischen Schwingung des Einmassenschwingers erläutert werden.



Bild D-5: Schwingungsverlauf ungedämpfter Einmassenschwinger

Die mathematische Lösung der Differentialgleichung für erzwungene Schwingungen setzt sich aus einem harmonischen und partikulären Lösungsanteil zusammen. Der partikuläre Anteil verschwindet im weiteren Schwingungsverlauf bei kurzzeitigen Einwirkungen (z.B. diskrete Impulseinwirkung). Das System schwingt in der angeregten Eigenfrequenz weiter.

Der harmonische Anteil der Schwingung ermittelt sich aus folgender Gleichung:

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \tag{D-1}$$

| x | Schwingweg[m] |
|--|--|
| t | Zeit[s] |
| $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ | Kreiseigenfrequenz des Systems [rad/s] |
| $f = \frac{1}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}}$ | Eigenfrequenz des Systems $\left[\frac{1}{s}\right]$ |
| k | Federsteifigkeit des Systems $\left[\frac{N}{m} = \frac{kg}{s^2}\right]$ |
| m | Masse des schwingenden Systems [kg] |
| Т | Schwingungsdauer [s] |
| А | Schwingungsamplitude[m] |
| φ | Phasenverschiebung [rad] |

Zur dynamischen Analyse eines schwingfähigen Systems ist eine Messung des Schwingungsverlaufes, der Geschwindigkeit oder der Beschleunigungen am Bauteil erforderlich. Bei einer Messung der Beschleunigungsverläufe kann durch Integration die Geschwindigkeit und der Schwingweg des Systems ermittelt werden. Aus obiger Gleichung ist ersichtlich, dass Art und Größe der Schwingung abhängig von der Steifigkeit und der Masse des Bauteiles sind. Eine Dämpfung kann proportional zur Geschwindigkeit (viskose Dämpfung) sowie proportional zum Schwingweg (Coulombsche Reibung) im Modell berücksichtigt werden. Eine hohe Dämpfung des Systems bewirkt ein rasches Abklingen der Schwingung.

D.2.3 Auswirkungen von Erschütterungen

Über die Kontaktfläche zwischen Schalung und Beton wird die in die Schalung eingebrachte Schwingungsenergie in den Beton übertragen. Der Eintrag von Erschütterungen in Betonbauteile kann deren Gebrauchswert durch eine Beeinträchtigung der Standsicherheit oder Gebrauchstauglichkeit vermindern.

Wirken Erschütterungen auf frischen, jungen Beton ist der Zeitpunkt der Erschütterung entscheidend für die Auswirkungen auf den Baustoff. Sofern der Beton noch nicht erhärtet ist, kann die zugeführte Energie eine Nachverdichtung und damit einhergehend, eine Festigkeits- und Dichtigkeitserhöhung des Betons bewirken.

Ist aufgrund des fortgeschrittenen Erhärtungsprozesses kein Fließen des Betons mehr möglich, entstehen Spannungen im Baustoff, welche Gefügelockerungen und Risse nach sich ziehen können [D-3]. Eine Beurteilung der Relevanz von Erschütterungen auf den Gebrauchswert von baulichen Anlagen kann nach [D-5] erfolgen.

In Abhängigkeit von der Fundamenteigenfrequenz werden für kurzzeitige Erschütterungen Grenzwerte von v = 3 bis 50 mm/s für die maximale Schwinggeschwindigkeit angegeben. Grenzwerte für Erschütterungen zur Vermeidung eines Einflusses auf die Frischbetoneigenschaften des Betons liegen derzeit nicht vor.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur Wirkungsweise von Verdichtungsgeräten wurde die Ausbreitung von Wellen im Beton wissenschaftlich untersucht [D-6],[D-7]. Da es sich bei einer Verdichtung mit Innenrüttlern um eine schnelle Folge von kleinen Impulsen im Beton handelt, können die dort getroffenen Erkenntnisse zum Werkstoffverhalten als Anhaltspunkt für die Vorgänge im Beton bei Einwirkungen von kurzzeitigen Erschütterungen herangezogen werden.

Während des Verdichtungsvorgangs von Rüttelbeton durch Innenrüttler lässt sich die Ausbreitung der Energie zeitlich in zwei Phasen einteilen. Zu Beginn erfolgt eine Anregung der in ihrer Größe unterschiedlichen Gesteinskörner in der geschütteten Betonmasse mit deren jeweiligen Eigenfrequenz. Die Reibung zwischen den einzelnen Bestandteilen wird durch die mechanische Anregung aufgehoben, mit der Folge, dass die Hohlräume durch eine Sackung der Betonmasse geschlossen werden können. Bei Zuführung weiterer Verdichtungsarbeit (Phase 2) verhält sich der Beton wie eine zähe Flüssigkeit und kann die Schwingungen aus dem Verdichtungsgerät über eine größere Länge übertragen. Die eingebrachten Schwingungen erzeugen im Zementleim hydraulische Drücke, welche die Bindungskräfte zwischen den Gesteinskörnern aufheben und zu einer weiteren Verdichtung der Masse und einem Aufsteigen der eingeschlossenen Luft führen. Im größeren Abstand zur Erregerquelle nehmen die Schwingungen im Beton ab. Gemäß den Untersuchungen in [D-6] kann eine exponentielle Abnahme der Schwingungen in Entfernung zur Erregerquelle angenommen werden. Der Dämpfungskoeffizient, als Maß der Abnahme der Schwingung, ist abhängig von der Rezeptur des Betons und der Dichte zum Zeitpunkt der Erschütterung. Der Wirkungsbereich des Rüttlers endet dort, wo die Bindungen zwischen den Gesteinskörnern durch die eingebrachten hydraulischen Drücke nicht mehr gelöst werden können.

Überträgt man die Kenntnisse aus der Betonverdichtung auf die Vorgänge bei Erschütterungen bei fließfähigen Betonen, so ist die Ausbreitung der Erschütterungen der Phase zwei während der Betonverdichtung zuzuordnen. Der Grund hierfür liegt in der flüssigen Konsistenz des Betons. Eine Verdichtung von Hohlräumen ist nicht mehr erforderlich, eine Übertragung der Schwingungen durch den Zementleim ist möglich.

Bei vorhandenem thixotropen Baustoffverhalten entstehen im Beton Bindungskräfte, die eine Steifigkeit und damit verbunden einen Rückgang des Frischbetondrucks bewirken. Erfährt der Beton dynamische Belastungen entstehen im Zementleim hydraulische Drücke (analog zur Betonverdichtung), die die stützenden Bindungen zerstören. Es kommt zu einer Wiederverflüssigung des Betons und einem Wiederanstieg des Frischbetondrucks.

D.3 Durchgeführte Arbeiten

D.3.1 Überblick Untersuchungsprogramm

Zum Erreichen des Untersuchungszieles (D.1.2) wurde das Untersuchungsprogramm in drei Phasen aufgeteilt:

Phase A: Beeinflussung der Materialeigenschaften von SVB durch Erschütterungen (Materialversuche)

Phase B: Beeinflussung des Frischbetondruckes von SVB durch Erschütterungen (Modellversuche)

Phase C: Beeinflussung des Frischbetondruckes von SVB durch Erschütterungen (Großversuch)

In der Phase A sollte der Einfluss von mechanischen Schwingungen auf die rheologischen Eigenschaften verschiedener Rezepturen verifiziert werden. Auf Grundlage der Ergebnisse wurde eine Rezeptur für die Modellversuche in Phase B und den Großversuch in Phase C ausgewählt.

Bei den Modellversuchen handelte es sich um Wandscheiben im Kleinmaßstab (h = 1,35 m), die mit entsprechenden Drucksensoren zur direkten Ermittlung des Frischbetondruckes ausgestattet waren. In Vorgriff auf den Großversuch in Phase C wurden unter konstanten Randbedingungen (Frischbetoneigenschaften, Betoniergeschwindigkeit, etc.) der Erschütterungszeitpunkt und die Erschütterungsgröße variiert.

Am Ende des Versuchsprogramms stand ein Großversuch, bei dem eine 9,20 m lange und 2,70 m hohe Wand unter Baustellenbedingungen betoniert wurde. Die in zwei Betonierabschnitten hergestellte Wand war mit indirekten (Ankerkräften) und direkten Sensoren (Drucksensoren, Druckfenster) zur Bestimmung der Frischbetondrücke ausgestattet. Zusätzlich dokumentierten Beschleunigungsaufnehmer an den Schalungselementen die Ausbreitung der eingebrachten mechanischen Schwingungen. Mit der elastischen Lagerung eines Schalungselementes sollte der Einfluss der Verformbarkeit der Schalung auf den sich einstellenden Frischbetondruck gemessen werden.

Die Wände in Phase B und C wurden unbewehrt ausgeführt.

D.3.2 Materialversuche (Phase A)

D.3.2.1 Versuchseinrichtung

Die entscheidenden rheologischen Eigenschaften, wie Fließfähigkeit und Viskosität wurden entsprechend der Richtlinie des DAfStb [D-11] nach der Mischphase sowie vor und nach den Erschütterungen mit dem Setzfließmaß und der Trichterauslaufzeit dokumentiert.

Um der Vielzahl an möglichen reaktiven Ausgangsstoffen gerecht zu werden, wurde das Erhärtungsverhalten von verschiedenen Zementleimen mit einem Vicatnadeltest untersucht. Im Anschluss erfolgten Messungen des Erhärtungsverhaltens am Beton mit einem Knetbeutel [D-12] und mit der Betonsonde nach Humm [D-13]. Dabei sei erwähnt, dass das Prüfverfahren der Betonsonde nach Humm [D-13] entsprechend den Vorschlägen von [D-8] verändert wurde. Nach Einbringen einer konstanten Schlagenergie von 15 Schlägen wurde die Eindringtiefe der Sonde bestimmt.

in gängigen Ausgehend von den der Praxis Erschütterungsgrößen wurden Sondierungsmessungen an verschiedenen Geräten durchgeführt, mit denen Erschütterungsgrößen in den Beton eingetragen werden können. Zur Auswahl standen verschiedenste Siebgeräte zur Analyse der Gesteinskörnungsgröße, Außen- und Innenrüttler sowie verschiedenste Pendelgeräte. Aufgrund der variablen Regelung der Erschütterungsgrößen und der für die Frischbetonversuche notwendige Dimensionierung wurde ein Rütteltisch für alle Materialversuche verwendet. Die mit diesem Gerät möglichen Schwinggeschwindigkeiten sind im Anhang hinterlegt (Tabelle D-A2). Auf dem Rütteltisch wurde ein eigens dafür konstruierte Box installiert, in die der Frischbeton gefüllt wurde. Die auftretenden Erschütterungen wurden mit einem Vibrationsmessgerät (Bezeichnung VM-6360) gemessen, mit Hilfe einer RS-232 Schnittstelle ausgelesen und mit der entsprechenden Software dokumentiert. Das Gerät ermöglichte die Messung der Schwinggeschwindigkeit, der Schwingbeschleunigung und des Schwingweges.

D.3.2.2 Versuchsdurchführung

Um die geforderten Frischbetonkennwerte unter Einhaltung des Wassergehaltes zu erreichen, wurden die Ausgangskomponenten in ihrer Art und Menge verändert. In Vorgriff auf den geplanten Großversuch (Phase C) kamen vorwiegend Ausgangsstoffe zum Einsatz, die überwiegend in einem Transportbetonwerk eingesetzt werden. Neben verschiedenen Sieblinien unterschiedlicher Gesteinskörnungen wurden die Zementart (CEM I 32,5 R, CEM I 42,5 R, CEM II 32,5 R, CEM II 42,5 R), der Steinkohlenflugaschetyp sowie der Fließmittel- (Fertigteil-, Transportbeton-Fließmittel) und Stabilisiertyp variiert.

Vor den eigentlichen Betonversuchen wurde im Mörtellabor eine Vorauswahl an möglichen Zementen und Zusatzmitteln getroffen. Zum Beschreiben des Erhärtungsverhaltens kam ein Vicatnadeltest mit Zusatzgewicht zum Einsatz. Mit diesem konnte der Einfluss der Zementart, der Zementfestigkeitsklasse, des Fließmittel- und des Stabilisierertyps auf das Erstarrungsverhalten dokumentiert werden.

Die Versuche fanden in einer Versuchhalle mit einer Raumtemperatur von 17 bis 20 °C statt. Um einen gleichmäßigen Feuchtegehalt zu garantieren, wurden die Gesteinskörnungen vor jedem Versuch bis zum Erreichen der Massekonstanz bei 105 °C getrocknet. Für die Herstellung des Betons kam ein Ringtrogmischer (Tellermischer) zum Einsatz. Nach einer Trockenmischzeit von 30 Sekunden wurden Wasser und Fließmittel getrennt zugegeben. Die Gesamtmischzeit betrug max. 4 Minuten.

Nach dem Mischprozess erfolgte die Ermittlung des Setzfließmaß und der Trichterauslaufzeit nach [D-11]. Nach Bestimmung der Fließfähigkeit und Viskosität wurde der Frischbeton in verschiedene Behälter für weitere Messungen gefüllt. Prinzipiell wurde ein Knetbeutel zur Dokumentation des Erstarrungsverhaltens, zwei nicht angeregte Eimer für die Referenzmessungen sowie eine Box für die Erschütterungsmessungen befüllt. Um den Einfluss der Außentemperatur zu beschreiben, wurden die Behältnisse bei 17-20 °C und bei 25-28 °C gelagert.

Zur Verifizierung des Einflusses von Erschütterungen auf die Frischbetoneigenschaften wurden erste Tastversuche zu unterschiedlichen Erstarrungszeitpunkten durchgeführt. Entsprechend des nach [D-4], [D-14] definierten Konsistenzklassen wurden die Erschütterungen im weichen bis plastischen (Erstarrungsbeginn) Betonzustand eingetragen. Da die Betonsonde nach Humm erst nach dem Erstarrungsbeginn brauchbare Ergebnisse lieferte, wurde der Erstarrungszustand des Betons ausschließlich anhand des Knetbeutels beurteilt.



Bild D-6: Erschütterungsquelle mit entsprechender Messtechnik

Der Erschütterungseintrag erfolgte in einer eigens dafür konstruierten Box auf einem Rütteltisch (Tabelle D-A2). Zur Sicherstellung eines deutlichen Ergebnisses wurden die Erschütterungen mit einer Schwinggeschwindigkeit von 20 bis 30 mm/s für eine Stunde in den hydratisierenden Frischbeton eingetragen. Im Anschluss erfolgte die Messungen des Setzfließmaßes und der Trichterauslaufzeit an der erregten sowie an einer nicht erregten Probe.

D.3.3 Kleinkörperversuche (Phase B)

Eine Variation der aufzubringenden Erschütterungen wurde an Kleinkörpern durchgeführt. Mit optimiertem Aufwand konnten die Intensitäten der dynamischen Einwirkung sowie die Zeitpunkte der Anregung variiert werden. Die Ergebnisse dienen als Ausgangspunkt für die Planung der Versuchdurchführung beim Großversuch in Phase C.

D.3.3.1Versuchseinrichtung

Im Vorgriff auf den Großversuch wurde in der Phase B eine Rezeptur ausgewählt. Da alle Mischungen ein thixotropes Verhalten besaßen, wurde sich aufgrund der sedimentationsfreien und homogenen Stoffeigenschaften für die SVB2 Rezeptur entschieden.

Als Versuchsobjekt wurde eine Wandschalung mit den Abmessungen gemäß Bild D-7 gewählt.











Bild D-7: Wandschalung für Versuche in Phase B

<u>Messprogramm</u>

Durch Druckmessgeber, die in drei Höhenlagen verteilt waren, konnte der Verlauf des Frischbetondrucks an der Schalhaut gemessen werden.

D.3.3.2Versuchsdurchführung

Der Umfang der Untersuchungen in Phase B umfasste insgesamt vier Versuche. Die erste Betonage diente als Referenzversuch, es wurden keine Erschütterungen in die Schalung eingebracht. In den folgenden drei Versuchen wurde die Intensität und der Zeitpunkt der Erschütterungen variiert (siehe Tabelle D-1).

| | Modell 02 | Modell 04 | Modell 05 |
|-------------------------|-------------|-------------|------------|
| Betonierzeitpunkt | 11:00 | 11:00 | 10:45 |
| Erschütterungszeitpunkt | 15:30 | 17:15 | 14:45 |
| Differenz | 4,5 | 6,25 | 4 |
| Pendelenergieeintrag | 15 x 13,3 J | 15 x 13,3 J | 15 x 3,3 J |

Tabelle D-1: Versuchsprogramm Phase B

Die Erschütterungen wurden mittels Pendelschlag in die Schalung eingebracht. Als Pendelmasse wurde ein Betonzylinder mit einer Masse von m = 14,6 kg gewählt. Durch eine Variation der horizontalen Auslenkung des Pendels konnte die Intensität gewählt werden. Unter Berücksichtigung des Rückprallweges nach dem Aufschlag des Pendelkörpers an der Schalung konnte die eingetragene Energie ermittelt werden. Eine horizontale Auslenkung des Pendels von s = 60 cm entspricht einem Energieeintrag in die Schalung von E = 13,3 J.

Die im Zuge der Versuchsdurchführung gemessenen Frischbetonkennwerte sind in D.8.2.1 zusammengestellt.

D.3.4 Großversuch (Phase C)

Um die erforderliche Energie für eine Wiederanregung des Betons zu ermitteln, wurden in der Phase B des Forschungsvorhabens mehrere Intensitäten des Pendelschlags experimentell untersucht. Im Großversuch sollte für definierte Einwirkungen zu verschiedenen Zeitpunkten die Ausbreitung der Wiederanregung im Beton gemessen werden.

D.3.4.1 Versuchseinrichtung

<u>Geometrie</u>

Als Versuchsobjekt für die Durchführung der Untersuchungen wurde eine Wand mit einer Länge von L = 9,20 m gewählt. Die Wandstärke wurde in Abstimmung mit den anderen Forschungspartnern mit d = 0,24 m festgelegt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit der gemessenen Ankerkräfte mit den Spannungen an den Druckmessgebern wurde ein statisch bestimmtes Tragsystem angestrebt. Aus den Anforderungen an die Montierbarkeit und dem gewählten statischen System ergaben sich die Elementgrößen 90/270.



Bild D-8: Ansicht des Versuchsaufbaus (Legende s. Bild D-A13)

<u>Messprogramm</u>

Die Ausbreitung der Erschütterungen im Beton wurde anhand des Anstiegs der Frischbetondrücke durch eine Wiederanregung des Betons gemessen. Die Messung des Frischbetondrucks erfolgte direkt durch in die Schalhaut eingebrachte Druckmessdosen und Messfenster mit Kraftmessdosen (Elemente 9 und 4), als auch indirekt über Kraftmessdosen an den Ankerstäben (siehe Bild D-8).

Insgesamt wurden acht Druckmesspunkte auf einer Höhe von 0,55 m über dem Wandfuß angebracht. Ein Druckanstieg konnte bis zu einem horizontalen Abstand von maximal 3,05 m von der Erschütterungsquelle gemessen werden.

Zur Messung der Wiederanregung in vertikaler Richtung wurden an den Elementen 5 und 6 zusätzlich Druckmessgeber auf einer Höhe von 0,85 m über dem Wandfuß installiert.

Die Messung der Ausbreitung von eingebrachten mechanischen Schwingungen wurde durch Beschleunigungsaufnehmer durchgeführt. Drei Beschleunigungsaufnehmer wurden an der Schalungsseite des Erschütterungseintrages angebracht, ein Beschleunigungsaufnehmer an der Rückseite der Schalung.

Ein Vergleich der Verformungen zwischen den Elementen mit starrer und weicher Lagerung war durch Wegmessungen am Fußpunkt der Elemente 2 und 3 durchführbar.

Während der Durchführung des Großversuches wurde die Frischbetontemperatur des Betons über Temperaturfühler im Beton gemessen. Parallel wurde das Erstarrungsverhalten des Betons mittels Knetbeutelversuch nachvollzogen.

Weiches Element – Starres Element

Element 2 wurde im Gegensatz zu den benachbarten Elementen durch eine elastische Zwischenschicht zwischen Anker und Schalelement weich gelagert. Somit konnte ein Einfluss der Verformbarkeit der Schalung auf den sich einstellenden Frischbetondruck gemessen werden.

D.3.4.2 Versuchsdurchführung

Im ersten Betonierabschnitt wurde die Wand bis zu einer Höhe von H = 1,45 m mit selbstverdichtendem Beton der Rezeptur SVB2 gefüllt. Die am Tag der Versuchsdurchführung gemessenen Frischbetoneigenschaften sind im Anhang dargestellt (Tabelle D-A7).

Nach Fertigstellung des ersten Betonierabschnittes wurde zum Zeitpunkt des Übergangs der Frischbetonkonsistenz von "flüssig" zu "weich" die erste Sequenz an Erschütterungen in die Schalung eingebracht. Auf Basis der Ergebnisse aus den Modellversuchen wurde ein Pendel mit einem Masse von m = 14,55 kg und einer Länge von L = 2,00 m gewählt. Die horizontale Auslenkung wurde von 30 cm bis 120 cm variiert. Durch Videoaufzeichnungen des Pendelschlages konnten der Rückprallweg des Pendels ermittelt werden und daraus die in die Schalung eingebrachten Energien (siehe Tabelle D-A8) errechnet werden.

Sofern keine weitere Wiederanregung durch den Pendelschlag erreicht werden konnte, wurde der zweite Abschnitt der Wand bis zur Gesamthöhe von 2,70 m betoniert. Eine mögliche Wiederanregung des eingebrachten Betons durch da Einfüllen des neuen Betons im zweiten Betonierabschnitt konnte somit überprüft werden.

Nach Fertigstellung der Betonage wurden Pendelschläge mit hoher Intensität (Energieeintrag E = 52,7 J) aufgebracht. Im weiteren Verlauf wurde ein Innenrüttler an drei Stellen der Schalung in einer Tiefe von 0,50 m und 1,75 m, gemessen bis zu Unterkante der Rüttelflasche eingetaucht.

| 07:30 | 07:45 | 08:00 | 08:15 | 08:30 | 08:45 | 00:60 | 09:15 | 09:30 | 09:45 | 10:00 | 10:15 | 10:30 | 10:45 | 11:00 | 11:15 | 11:30 | 11:45 | 12:00 | 12:15 | 12:30 | 12:45 | 13:00 | 13:15 | 13:30 | 13:45 | 14:00 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|-----------------------|--------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-----------------------|
| Mischungsbeginn | | | | | | Betonage BA1 | | | | | | | Pendelschlagversuch 1 | | | Pendelschlagversuch 2 | | | | Pendelschlagversuch 3 | Betonage BA2 | | Pendelschlagversuch 4 | | Versuche Innenrüttler | Versuche Innenrüttler |
| 0,00 | 0,25 | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 | 3,75 | 4,00 | 4,25 | 4,50 | 4,75 | 5,00 | 5,25 | 5,50 | 5,75 | 6,00 | 6,25 | 6,50 |

Bild D-9 enthält eine zeitliche Übersicht des Versuchsablaufes.

Bild D-9: Übersicht Versuchsablauf

D.4 Ergebnisse

D.4.1 Materialversuche

Das Erstarrungsverhalten der Mörtelmischungen wird durch die Wahl des Zementes und So Fließmittels deutlich beeinflusst. reduziert sich der Zeitpunkt des des Erstarrungsanfangs durch die Fertigteilfließmittel von 04:45h auf 03:00h. Die wasserbindende Wirkungsweise der Stabilisierer führt zu einem Speichereffekt, der einen späteren Erhärtungsanfang zur Folge hat (Bild D-A2). Um den Erhärtungsvorgang in den folgenden Versuchen innerhalb von 10h vollständig abzubilden, wurden für alle folgenden Betonversuche das Fertigteilfließmittel "ACE40" und der Stabilisierertyp "Viscoguard" verwendet. Der ursprüngliche Portlandzement wurde aufgrund der sinkenden Bedeutung in der Baupraxis durch ein Portlandkompositzement ersetzt und die Festigkeitsklasse entsprechend eines schnellen Erhärtungsverlaufes auf 42,5R erhöht.

Durch die Variation der Sieblinien der Gesteinskörnungen und die Anpassung des Fließmittelgehaltes konnten die Frischbetonzielwerte erreicht werden. Die Rezepturen sind mit den Frischbetonergebnissen in Tabelle D-A1 dargestellt. Nach Rezepturentwicklung erfolgte die Ermittlung des Erstarrungsverhaltens mit dem Knetbeutel bei den Umgebungstemperaturen 17 °C und 25 °C, wobei mit steigender Temperatur das Erstarrungsverhalten beschleunigt wurde (Bild D-A5, Bild D-A6).

Entsprechend der in D.3.2.2 beschriebenen Versuchsdurchführung gelang es mit den entwickelten Rezepturen den Einfluss von Erschütterungen auf die rheologischen Betoneigenschaften zu ermitteln. Die in Bild D-A7 darstellten Ergebnisse zeigen, dass sich bei allen SVB Rezepturen eine Wiederverflüssigung einstellt, wobei die Viskosität prinzipiell deutlicher als die Fließfähigkeit beeinflusst wird. Da die Fließgrenze mit zunehmendem Fließmittelgehalt ansteigt und die Viskosität überwiegend vom Wasser/ Feststoff-Verhältnis abhängt ist zu vermuten, dass das thixotrope Verhalten überwiegend auf das Wasser und nicht auf den Depoteffekt des Fließmittels zurück zuführen ist.

Aus dem Verhältnis der Kenndaten "nach Herstellung" und "nach Erschütterungen" zeigt sich, dass die Stabilisiertypen zu einem thixotroperen Verhalten neigen (

Bild **D-10**). Durch die Beimischung organischer, stabilisierender Zusätze gelangen in den Beton polymere Makromoleküle, die unter Wasserbindung eine Gelstruktur bilden. Dadurch steigen die Viskosität und die Fließgrenze an. Ghio (1994) zeigt in seinen Untersuchungen mit polymeren Polysaccariden, dass die ansteigende Viskosität nicht auf chemische, sondern vermehrt auf physikalische Prozesse zurückzuführen ist. Mit der Einführung von Scherspannungen, werden die physikalischen Bindungskräfte der Gelstruktur (bestehend aus langen polymeren Ketten) überwunden, was ein thixotropes Verhalten zur Folge hat ([D-1], [D-15]).



Bild D-10: Einfluss von Erschütterungen auf die rheologischen Betoneigenschaften zum Zeitpunkt zwischen weicher/ plastischer Konsistenz

D.4.2 Kleinkörperversuche

Die Versuche an den Kleinkörpern ermöglichten eine Abschätzung der für eine Wiederanregung des Frischbetons notwendigen Erschütterungsenergie.

Aufgrund der gewählten Betoniergeschwindigkeit wurde als Startwert nach Betonage der Wand an den Messgebern Drücke im Bereich des hydrostatischen Drucks gemessen. Bei t = 15 Pendelschlägen mit einer Auslenkung von s = 60 cm (Anregung mit E = 13,3 J) konnte zu einem Zeitpunkt von 4,5 h nach Betonage eine Wiederanregung des Betons bis auf rund 90 % des Frischbetondrucks nach Betonage gemessen werden. Mit fortschreitendem Ansteifen des Betons wird der Druckanstieg nach dem Eintrag von Erschütterungen geringer. Erfolgt der Energieeintrag mit einer Pendelauslenkung von s = 30 cm erhöht sich der Frischbetondruck auf etwa 60 % des Startwertes.



Bild D-11: Prozentualer Anstieg des Frischbetondrucks nach Erschütterung

D.4.3 Großversuch

Im Folgenden werden die maßgeblichen Ergebnisse aus dem Großversuch wiedergegeben und anhand aussagekräftiger Diagramme veranschaulicht. Für die Darstellung einzelner Werte wird auf die Darstellung in den Anlagen (siehe ab Seite D-34ff) verwiesen.

<u>Betondruckmessungen</u>

Der Frischbetondruckverlauf an ausgewählten Messstellen ist in Bild D-12 dargestellt. Die Kurven zeigen den Verlauf von Druckmessgebern in gleicher Höhe. Messgeber D2 zeichnete den Frischbetondruck am weichen Element, D6 in direkter Nähe des Pendelaufschlagpunktes und FA9 den vom Aufschlagpunkt am weitesten entfernten Punkt auf.

Nach Betonage des Abschnittes BA1 wurde an den Messpunkten Frischbetondrücke in der Größe des hydrostatischen Drucks gemessen. Im weiteren Verlauf verringert sich der Frischbetondruck aufgrund des Ansteifvorgangs im Frischbeton. Die stark unterschiedliche Steigung der Druckkennlinien D2, D6 und FA9 begründet sich in den unterschiedlichen Messmethoden Druckmessdose und Fenster.



Bild D-12: Gemessener Verlauf des Frischbetondrucks, Verlauf im Vertikalschnitt siehe Bild D-14 und Bild D-15

Signifikante Druckanstiege, welche auf eine Wiederanregung des Betons zurückzuführen sind, konnten nach der Einbringung von Erschütterungsenergie zum Zeitpunkt t = 1,75 h und t = 2,5 h nach Betonage gemessen werden. Anhand des stufenförmigen Anstiegs bei

Pendelschlagversuch 2 ist zu erkennen, dass eine Energie von 12 J notwendig ist, um den Frischbetondruck wieder auf ein Niveau des hydrostatischen Drucks zu bringen. Weitere Pendelschläge im Zeitraum von t = 3,5 h nach Betonage, mit hoher Intensität, erzeugten einen Wiederanstieg des Frischbetondrucks nur in sehr geringem Umfang. Bezogen auf das Erstarrungsende des Betons von $t_{E,KB} = 9$ h war bei den vorhandenen Randbedingungen eine Wiederanregung bis zu einem Zeitpunkt t = 0,44 $t_{E,KB}$ möglich.

Im Rahmen der Versuchsdurchführung konnte die Ausbreitung der Wiederanregung in Längsrichtung der Schalung gemessen werden. Ein Anstieg an den Druckmessdosen konnte bis zu einem Abstand von A = 3,10 m zur Lasteinwirkungstelle gemessen werden. In Bild D-13 sind die an den Messgebern vorhandenen Werte vor und nach dem Eintrag der Erschütterungen (Pendelschlag) dargestellt.





Um eine Einschätzung der erzeugten Schwingungen in der Schalung zu erhalten, wurden Beschleunigungsgeber an den Schalungselementen angebracht. Um die Dämpfung der Schwingungen in der Schalung messen zu können, wurden die Beschleunigungen bei gleicher Schlagintensität an der leeren und gefüllten Schalung gemessen. Es zeigt sich, dass bei gefüllter Schalung im Abstand von x = 2,14 m zum Aufschlagpunkt des Pendels keine Werte mehr gemessen werden können (Bild D-A13), im leeren Zustand waren messbare Werte vorhanden. Die mechanische Anregung wurde durch den Beton aufgenommen.

Zur Verdeutlichung der Praxisrelevanz der eingebrachten Erschütterungen dient der Vergleich mit Erschütterungen, welche im Rahmen des Forschungsvorhabens an einer auf einer Baustelle sich im Einsatz befindlichen Trichterschalung gemessen wurden. Die Erschütterungen entstehen durch das Einklopfen von Schaltafeln im Zuge des Betoniervorgangs. Die Mittelwerte der maximalen Beschleunigungen durch das Einklopfen sind in nachfolgender Tabelle den gemessenen Beschleunigungen aus den Pendelschlägen während des Großversuches gegenübergestellt. Da die Systemkenngrößen der unterschiedlichen Schalungssysteme einen Einfluss auf die Beschleunigungswerte geben, dienen die genannten Zahlen nur zur Abschätzung der Größenordnung der Werte.

| Einwirkung | Leere Schalung [m/s ²] | Volle Schalung [m/s ²] | Trichterschalung (leerer Zustand) [m/s ²] |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Pendel $s = 30 \text{ cm}$ | - | 35 | - |
| Pendel $s = 60 \text{ cm}$ | 50 | 88 | - |
| Pendel $s = 120 \text{ cm}$ | 160 | 200 | - |
| Hammerschlag | 16 | - | 38 |

Tabelle D- 2 Beschleunigungen durch einen Pendelschlag/Hammerschlag

Die Intensität eines Hammerschlages kann der eines Pendelschlages mit einer Auslenkung zwischen s = 30 und 60 cm zugeordnet werden. Ein Anprall eines Betonierkübels kann aufgrund dessen großer Masse als weitaus höherer Energieeintrag als die im Versuch gewählten Randbedingungen, betrachtet werden.

Einfluss der Schalungsverformung auf den Frischbetondruck

Nach Betonage des Abschnittes BA2 kam es zu einem weiteren Druckanstieg. Die zusätzliche Auflast bewirkte einen Zuwachs des Horizontaldrucks auf Höhe der Messgeber an den starr gelagerten Elementen in BA1. Im Gegensatz dazu fällt am Messgeber im "weichen" Element 2 (Linie D2) der Frischbetondruck nach Einbringen des Betons im BA2 ab. Betrachtet man die Zusatzverformung der Schalung durch eine Betonage weiterer Schüttlagen ist der Verlauf des Frischbetondrucks abhängig von der Steifigkeit der Schalung. Anhand der gemessenen Betondrücke und den Ankerkräften konnte aus dem Kräfte- und Momentengleichgewicht der vertikale Verlauf des Frischbetondrucks im Betonierabschnitt BA2 wurde ein linearer Anstieg des Frischbetons im neu eingebrachten Beton angenommen.



Bild D-14: Verlauf des Frischbetondrucks im BA1 (Messwerte), Rechenwerte



Bild D-15: Verlauf des Frischbetondrucks im BA2 (Messwerte), Rechenwerte

D.5 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Die Untersuchung der Fragestellungen des Teilprojektes erfolgt in drei Stufen.

Durch Materialversuche konnte der Einfluss von lang andauernden Schwingungen auf die Frischbetoneigenschaften qualitativ beschrieben werden. Im Übergang zwischen weicher / plastischer Konsistenz wurde für eine Stunde eine Schwinggeschwindigkeit von 20 bis 30 mm/s in den Frischbeton eingeleitet. Es konnte durch Messungen des Setzfließmaßes und der Trichterauslaufzeit bei allen vier Rezepturen eine Wiederverflüssigung festgestellt werden. Prinzipiell veränderte sich die Viskosität (charakterisiert durch die Trichterauslaufzeit) bei allen Rezepturen deutlicher als die Fließfähigkeit (gemessen durch das Setzfließmaß).

Aufbauend auf die Ergebnisse der Materialversuche wurde der Einfluss von Erschütterungen auf den Frischbetondruck an Kleinkörpern getestet. Auf 1,35 m hohe, mit SVB gefüllte Wandelemente wurden durch Pendelschläge Erschütterungen eingebracht. Hierbei wurden die Intensität und der Zeitpunkt des Energieeintrags variiert. Es zeigt sich, dass bei den vorhandenen Randbedingungen (Frischbetonrezeptur, Betontemperatur) nach etwa der Hälfte der Erstarrungszeit eine Wiederanregung des Frischbetondrucks bis rund 90% des hydrostatischen Drucks möglich ist. Zu späteren Zeitpunkten werden geringere Wiederanstiege des Drucks verzeichnet.

Zur Abschätzung der räumlichen Ausbreitung der Erschütterungswellen im Beton wurde ein Großversuch als Tastversuch durchgeführt. Um den Einfluss der Verformbarkeit am Bauteil untersuchen zu können, wurde eine elastische Bettung eines Schalelementes realisiert.

Nach Eintrag von kurzzeitigen Erschütterungen mit hoher Intensität (Pendelschlag) war eine Wiederanregung des sich in der Schalung befindlichen Betons bis zu einem Abstand von etwa 3,0 m zu Erschütterungsquelle messbar. Mit fortschreitendem Ansteifen des Betons verringert sich die Wiederanregbarkeit des Betons. Aus der Differenz der Lastbilder für den Beton in Ruhe und dem wiedererregten Beton ergibt sich für rotationssymmetrische Systeme ein asymmetrisches Lastbild, welches ungünstigere Beanspruchungen im System hervorrufen kann (lokale Biegung), als ein über den Umfang vollständig symmetrisch wirkender Lastansatz.

Der Einfluss der Verformbarkeit der Schalung war anhand der Messwerte an den Druckmessdosen und den Ankerstellen erkennbar. Durch die größeren Schalungsverformungen am weichen Element, resultierend aus der Betonage der oberen Hälfte der Wand, kommt es zu einer signifikanten Reduzierung des Drucks im vorher betonierten Abschnitt.

Anhand der durchgeführten Forschungsarbeit konnte der Einfluss von Erschütterungen auf den Frischbetondruck von selbstverdichtendem Beton experimentell nachgewiesen werden.

Die Untersuchungen beschränkten sich auf lotrechte Schalungen, die Ausbreitung der Erschütterungen im Beton konnten im Rahmen eines Großversuchs gemessen werden. Unter den beschriebenen Vorraussetzungen hinsichtlich der vorhandenen Geometrie und den vorhandenen Frischbetoneigenschaften ist ein Wiederanstieg des Frischbetondrucks im Bereich des hydrostatischen Drucks aufgrund von eingetragenen Erschütterungen Pendelschläge bis zu einem Zeitpunkt bis 56 % des Erstarrungsendes nach Knetbeutelmethode möglich. Der Bereich mit wiederangeregtem Beton erstreckt sich symmetrisch zur Aufprallstelle des Pendels auf eine Länge von mindestens drei Metern in beide horizontale Richtungen.

Aussagen über den Frischbetondruck von selbstverdichtendem Beton bei geneigten und gekrümmten Schalungen lassen sich aus den vorliegenden Ergebnissen nicht ableiten. Weiterhin können allgemein gültige Festlegungen zur Ausbreitung von lokalen Erschütterungen im Beton aufgrund der geringen Anzahl an Messwerten nicht getroffen werden. Für die Erarbeitung eines Bemessungsmodells zur Erfassung des materialspezifischen Verhaltens von SVB sehen wir noch weiteren Forschungsbedarf.

D.6 Literaturverzeichnis

- [D-1] Assaad, J.: Formwork Pressure of Self-Consolidating Concrete Influence of Thixotropy, Doctoral Thesis, Université de Sherbrooke, Quebec, Canada, 2004
- [D-2] Billberg, P.: "From Pressure Generated by Self-Compacting Concrete Influence of Thixotropy and Structural Behaviour at Rest". Doctoral Thesis, School of Architecture and the Built Environment Division of Concrete Structures, Schweden
- [D-3] Bonzel, J.; Schmidt, M.: Einfluss von Erschütterungen auf frischen und auf jungen Beton. In: Beton 9/ 1980, S. 333 – 337; Beton 10/ 1980 S. 272 – 378, Verlag Bau+Technik
- [D-4] E DIN 18218: Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen, Juli 2007
- [D-5] DIN 4150-3: Erschütterungen im Bauwesen: Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen, Ausgabe Februar 1999
- [D-6] ACI Commitee 309: Behaviour of Fresh Concrete During Vibration, ACI Journal, Januar-Februar 1981, S. 36-53
- [D-7] Ersoy, S.;Garbotz, G.: Untersuchung über die Verdichtungswirkung von Tauchrüttlern, Forschungsbericht Nr. 1296 des Landes Nordrhein-Westfalen, Westdeutscher Verlag Opladen, 1964
- [D-8] Proske, T.: Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtenden Beton. Universität Darmstadt, Dissertation 2007
- [D-9] Ish-Shalom, M., Greenberg, S.A.: Rheology of Fresh Portland Cement Pastes, Proceedings, 4th International Symposium on Chemistry of Cement held 2-7 October 1960, Monograph 43, Vol. 2, Washington DC, National Bureau of Standards, pp. 731-744
- [D-10] Wallevik; Iversen: Wallevik, O.H. and Iversen, K.: Rheological Approach in Mix Design of Very High Strength Concrete. Report included in the rheology course literature in connection to the Nordic Rheology Conference in Reykjavik, Iceland, 1997
- [D-11] DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton, November 2003
- [D-12] DAfStB: Heft 516 Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton: 1. Auflage; Berlin: Beuth, 1991
- [D-13] DAfStB: Heft 422 Prüfung von Beton Empfehlungen und Hinweise als Ergänzungen zu DIN 1048; Berlin: Beuth, 1991
- [D-14] Graubner, C.-A.; Kaiser, H.U.; Proske, T.: Erstarrungsverhalten von SVB-Analyse von Prüfverfahren. Conrete 21 (2006)
- [D-15] Wüstholz, T.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton, Universität Stuttgart, Dissertation 2005

D.7 Danksagung

Für das Gelingen dieser Teilprojektes möchten sich die Projektverantwortlichen bei allen Förderen des Forschungsprojektes für die freundliche Unterstützung bedanken. Ergänzend zu den im Hauptteil des Berichtes bereits genannten Partnern wurde die Forschungsarbeit im Teilprojekt D durch die Mitwirkung der folgenden Einrichtungen ermöglicht:

SAFA Saarfilterasche-Vertriebs-GmbH & Co. KG

Frischbetonwerk Wachau GmbH & Co. KG

Schwenk Zement AG

BASF AG



BASF

| \forall | SCHW | /ENK |
|-----------|-------|-----------------|
| | Doust | offe fürs Leben |
| | Built | 4 |
| | | l |
| | | |

München/Leipzig, den 30. September 2008

D.8 Anlagen

In den Anlagen sind die wichtigsten Ergebnisse der einzelnen Versuchsphasen in Tabellen und Diagrammen übersichtlich zusammengestellt. Für die Betrachtung einzelner Werte wird auf die beiliegende Daten - CD verwiesen.

D.8.1 Ergebnisse Phase A



D.8.1.1 Erstarrungsverhalten ohne Erschütterungen





Bild D-A2: Vicatnadelversuch mit Zusatzgewicht: Einfluss des Stabilisierers auf das Erstarrungsverhalten von Zementleim

D.8.1.2 Entwickelte Rezepturen

Tabelle D-A1: Vergleich der Richtrezepturen und der entwickelten Rezepturen mit den erzielten Frischbetonkenngrößen

Richtrezepturen:

| Stoffhozoichpung | Finhait | Gehalt | | | | | | |
|-------------------|------------|--------|------|------|------|--|--|--|
| Stonbezeichnung | Enneit | SVB1 | SVB2 | SVB3 | SVB4 | | | |
| CEM I 32,5 R | | | 2 | 70 | | | | |
| Flugasche | ka/m2 | 30 | 00 | 180 | | | | |
| Zugabewasser | kg/III3 | 165 | 200 | 165 | 200 | | | |
| Gesteinskörnung | | 1599 | 1507 | 1730 | 1638 | | | |
| Fließmittel | M 9/ y 7 | 1,4 | 0,6 | 2,2 | 1,1 | | | |
| Stabilisierer | IVI70 V.Z. | - | - | 2,0 | | | | |
| Luftgehalt | Vol% | | 1 | ,5 | | | | |
| w/z _{eq} | - | 0,54 | 0,65 | 0,54 | 0,65 | | | |

Anzustrebende Kenngrößen:

| Setzfließmaß sm | mm | | 720 | <u>+</u> 20 | |
|------------------------|----|---------------|--------------|---------------|--------------|
| Trichterauslaufzeit tv | S | 13 <u>+</u> 2 | 5 <u>+</u> 1 | 13 <u>+</u> 2 | 5 <u>+</u> 1 |

Entwickelte Rezepturen:

| Stoffbozoichnung | Finhoit | Gehalt | | | | | | |
|---------------------------------------|------------|--------|-------|------|------|--|--|--|
| Stonbezeichnung | Linnen | SVB1 | SVB2 | SVB3 | SVB4 | | | |
| CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R-AZ | | | 27 | 70 | | | | |
| Steinkohlenflugasche Safament HKV7 | | 3 | 00 | 180 | | | | |
| Zugabewasser | kg/m3 | 165 | 193 | 157 | 194 | | | |
| Gesteinskörnung: | | 1599 | 1507 | 1730 | 1638 | | | |
| Sand (0-2) | | 635 | 607 | 690 | 654 | | | |
| Kies (2-8) | | 482 | 450 | 520 | 492 | | | |
| Kies (8-16) | | 482 | 450 | 520 | 492 | | | |
| Fließmittel Glenium ACE 40 | M -% y 7 | 1,6 | 0,9 | 2,5 | 1,3 | | | |
| Stabilisierer Viscoguard SCC 916 | IVI70 V.∠. | - | - 2,0 | | | | | |
| Luftgehalt | Vol% | | 1 | ,5 | | | | |
| w/z _{eq} | - | 0,54 | 0,63 | 0,51 | 0,63 | | | |

Erzielte Kenngrößen:

| Setzfließmaß sm | mm | 710 | 740 | 720 | 700 |
|------------------------------------|----|------|-----|------|-----|
| Trichterauslaufzeit t _v | S | 10,5 | 4 | 10,3 | 3,5 |

| SVB1 | Mehlkorntyp | höherviskos |
|------|------------------|--------------|
| SVB2 | Mehlkorntyp | niederviskos |
| SVB3 | Stabilisierertyp | höherviskos |
| SVB4 | Stabilisierertyp | niederviskos |



D-A3: Erstarrungsverhalten von SVB1 mit dem Fließmittel Sky 592 (Messverfahren: nach Knetbeutverfahren) in Abhängigkeit der Zementart



BildD-A4:ErstarrungsverhaltenvonSVB1(Messverfahren: nachKnetbeutverfahren) in Abhängigkeit des Fließmittels

Aufgrund des lang andauernden Erstarrungsverhaltens tritt am Abend eine Messpause von ca. 10h auf. Die Ausgangsstoffe (Zement, Zusatzmittel, Flugasche) wurden im Anschluss entsprechend eines Erstarrungsendes von max. 10h ausgewählt.


Bild D-A5: Erstarrungsverhalten nach Knetbeutel bei einer Umgebungs-temperatur von 17 $^{\circ}\mathrm{C}$



Bild D-A6: Erstarrungsverhalten nach Knetbeutel bei einer Umgebungstemperatur von 25 $^{\circ}\mathrm{C}$



D.8.1.3Frischbetoneigenschaften (ohne/ mit Erschütterungen)

Bild D-A7: Frischbetoneigenschaften ohne-/ mit Erschütterungen (s. Tabelle D-A2)

| Tabelle D-A2: Materialversuche: Simulation | von Erschütterungsgrößen durch den |
|---|------------------------------------|
| Einsatz eines Rütteltisch | |

| Stufe | |
|-------|--------|
| oturo | [mm/s] |
| 1 | 0,27 |
| 2 | 10 |
| 3 | 31 |
| 4 | 40 |
| 5 | 54 |
| 6 | 70 |
| 7 | 83 |
| 8 | 96 |

Die Erschütterungen wurden mit einem Rütteltisch 1 h auf Stufe 3 und 1 min auf Stufe 8 in den Beton eingetragen.

D.8.2 Ergebnisse Phase B

D.8.2.1Frischbetonkennwerte

Für die Modellversuche wurde die Rezeptur SVB 2 verwendet (siehe D.8.1.2).

| | | | - | |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Kennwert | Modell 01 | Modell 02 | Modell 04 | Modell 05 |
| Setzfließmaß ohne | | | | |
| Blockierring | 680 | 660 | 680 | 620 |
| [mm] | | | | |
| Trichterauslaufzeit | 3 | 15 | 1 | 5 5 |
| [8] | 5 | 4,5 | 4 | 5,5 |
| Wichte | 2 31 | 2 31 | 2 32 | 2 31 |
| [kg/dm ³] | 2,31 | 2,31 | 2,32 | 2,31 |
| Frischbetontemperatur | 25 | 25 | 25 | 25 |
| [°C] | 23 | 23 | 23 | 23 |
| Erstarrungsbeginn t _{A,eff} | | 4 | - | |
| [h] | 5 | | | |
| Erstarrungsende t _{E,eff} | 0 | | | |
| [h] | 0 | | | |

Tabelle D-A3: Frischbetonkennwerte Modellversuche

D.8.2.2Kenngrößen der Einwirkungen

Betonage

Betonierabschnitt BA1

Betonierdauer t = 10 min Betonierhöhe h = 1,35 m Betoniergeschwindigkeit $v_b = 9,0$ m/h

Pendelschlagversuch

Eingangswerte:

| Masse des Pendels | m = 14,55 kg |
|------------------------|---------------------|
| Horizontale Auslenkung | s = 30 cm / 60 cm |
| Vertikale Auslenkung | h = 2 cm / 10 cm |
| Länge des Pendels | L = 1,85 m |

Energieeintrag

 $\Delta E = E_{t=t_0} - E_{t=t_1} = m \cdot g \cdot \Delta h$

Einheit 1 Joule = 1 kg m²/s²

| Zeitpunkt $t = t_0$ | Auslenkung vor Anprall |
|---------------------|--------------------------------|
| Zeitpunkt $t = t_1$ | Pendel in maximaler Auslenkung |
| nach Anprall | |



Tabelle D-A4: Energieeintrag durch einen Pendelschlag

| Auslenkung | Rückprall | Energieeintrag |
|------------|-----------|----------------|
| $t = t_0$ | $t = t_1$ | [J] |
| [cm] | [cm] | |
| 30 | 8 | 3,3 |
| 60 | 16 | 13,3 |



Bild D-A8: Frischbetondrücke Modellversuche 02



Bild D-A9: Frischbetondrücke Modellversuche 04



Bild D-A10: Frischbetondrücke Modellversuche 05



Bild D-A11: Einfluss des Zeitpunktes der Erschütterungszeit auf die Frischbetondrücke in den Modellversuchen 02 und 04



Bild D-A12: Einfluss der Erschütterungsgröße auf die Frischbetondrücke in den Modellversuchen 02 und 05

| Geberhöhe | ontrostatisch | | |
|-----------|---------------|---------|--|
| [m] | [bar] | [kN/m²] | |
| 0,495 | 0,114 | 11,4 | |
| 0,80 | 0,185 | 18,5 | |
| 1,095 | 0,253 | 25,3 | |

Tabelle D-A5: Frischbetondruck hydrostatisch auf Geberhöhe

Tabelle D-A6: Ergebnisse im Überblick

| | Modell 02 | Modell 04 | Modell 05 |
|-------------------------------------|-------------|-------------|------------|
| Betonierzeitpunkt | 11:00 | 11:00 | 10:45 |
| Erschütterungszeitpunkt | 15:30 | 17:15 | 14:45 |
| Differenz | 4,5 | 6,25 | 4 |
| Pendelenergieeintrag | 15 x 13,3 J | 15 x 13,3 J | 15 x 3,3 J |
| f | 87,6 | 73,1 | 64,2 |
| Frischbetondruck nach Erschütterung | | | F0/ 1 |
| | | | [70] |

Frischbetondruck nach Betonage

[%]

D.8.3 Ergebnisse Phase C

D.8.3.1Versuchsaufbau

Siehe Bild D-A13: Versuchsaufbau Großversuch.

D.8.3.2Frischbetonkennwerte

Für den Großversuch wurde die Rezeptur SVB 2 verwendet (siehe D.8.1.2).

| Kennwert | Großversuch |
|--------------------------------------|-------------|
| Setzfließmaß ohne | |
| Blockierring | 720 |
| [mm] | |
| Trichterauslaufzeit | 3 |
| [s] | 5 |
| Wichte | 2 31 |
| [kg/dm ³] | 2,31 |
| Frischbetontemperatur | 30 |
| [°C] | 50 |
| Erstarrungsbeginn t _{A,eff} | 15 |
| [h] | 4,J |
| Erstarrungsende t _{E,eff} | 75 |
| [h] | 7,5 |

Tabelle D-A7: Frischbetoneigenschaften im Großversuch



Schnitt Versuchsaufbau M 1:25

Bild D-A13: Versuchsaufbau Großversuch

D.8.3.3Kenngrößen der Einwirkungen

Betonage

Betonierabschnitt BA1

 $\begin{array}{ll} Betonierdauer \ 9.00-9.10 \ Uhr\\ Betonierhöhe \ h=1,45 \ m\\ Betoniergeschwindigkeit \ v_b=8,7 \ m/h \end{array}$

Betonierabschnitt BA2

Pendelschlagversuch

Eingangswerte:

 $\begin{array}{ll} \text{Masse des Pendels} & m=14,55 \text{ kg} \\ \text{Horizontale Auslenkung} & s=30 \text{ cm} / 60 \text{ cm} / 120 \text{ cm} \\ \text{Vertikale Auslenkungh}=2 \text{ cm} / 9 \text{ cm} / 40 \text{ cm} \\ \text{Länge des Pendels} & L=2,0 \text{ m} \end{array}$

Der Rückprallwert konnte mittels Videoaufzeichnung an einer im Bereich des Anprallpunktes angebrachten Skala abgelesen werden.



Energieeintrag Einheit 1 Joule = 1 kg m²/s²

 $\Delta E = E_{t=t_0} - E_{t=t_1} = m \cdot g \cdot \Delta h$

| Zeitpunkt $t = t_0$ | Auslenkung vor Anprall |
|---------------------|--------------------------------|
| Zeitpunkt $t = t_1$ | Pendel in maximaler Auslenkung |
| nach Anprall | |



| Tabelle D-A8: | Energieeintrag | durch einen | Pendelschlag |
|----------------------|----------------|-------------|--------------|
| | | | |

| Auslenkung | Rückprall | Energieeintrag |
|------------|-----------|----------------|
| $t = t_0$ | $t = t_1$ | [J] |
| [cm] | [cm] | |
| 30 | 8 | 3,0 |
| 60 | 16 | 12,2 |
| 120 | 35 | 52,7 |

Eintauchen eines Innenrüttlers

Erregerfrequenz des Innenrüttlers f = 258 Hz

Tabelle D-A9: Versuchsdaten Eintauchen eines Innenrüttlers

| Position | Eintauchtiefe bis UK Rüttler |
|-------------------------|---------------------------------|
| Mitte Element 2 | 0,50 m |
| Stoßfuge Element 5/6 | 0,50 m |
| Mitte Element 8 | 0,50 m |
| Mitte Element 2 | 1,75 m |
| Stoßfuge Element 5/6 | 1,75 m |
| Mitte Element 8 | 1,75 m |



D.8.3.4Übersicht Frischbetondruckmessungen

Bild D-A14: Übersicht Frischbetondruck je Messgeber

Bezeichnung der Messpunkte

| Druckmessgeber | D[Elementnummer, Lage im Element]-h=[Höhe über Wandfuß], z.B. D2-h=0,55m |
|----------------|--|
| Messfenster | FA[Elementnummer], z.B. FA4 |
| Kraftmessdosen | F[Elementnummern]h=[Höhe über Wandfuß], z.B. F6-7-h=0,55 m |
| Wegmessung | S[Elementnummer], z.B. S2 |

Tabelle D-A10: Übersicht Messpunkte Betondruckmessung

| Bezeichnung | Messgröße |
|---------------|------------|
| D2-h=0,55 m | Betondruck |
| D5-h=0,55 m | Betondruck |
| D5-h=0,85 m | Betondruck |
| D6li-h=0,55 m | Betondruck |
| D6li-h=0,85 m | Betondruck |
| D6re-h=0,55 m | Betondruck |
| D7 | Betondruck |
| D8 | Betondruck |
| FA4 | Betondruck |
| FA9 | Betondruck |

Tabelle D-A11: Frischbetondruck hydrostatisch in Geberhöhe

| Geberhöhe | σ _{hydrostatisch} Betonierabschnitt BA1 | | σ _{hydrostatisch} Betonierabschnitt BA2 | |
|-----------|---|----------------------|---|----------------------|
| [m] | [bar] | [kN/m ²] | [bar] | [kN/m ²] |
| 0,85 | 0,138 | 13,8 | 0,427 | 42,7 |
| 0,55 | 0,208 | 20,8 | 0,497 | 49,7 |

D.8.3.5Übersicht Ergebnisse Beschleunigungsmessungen



Signalverlauf für zwei Pendelschläge mit s = 60 cm auf leere Schalung, Detailansicht Signal 1

In den nachfolgenden Tabellen sind die Mittelwerte der gemessenen maximalen Beschleunigungen für verschiedene Einwirkungen zusammengestellt. Als Einzelwerte wurden die im Zeitverlauf ersten Ausschläge im Beschleunigungsverlauf gewählt.



Bild D-A17: Gemessener Verlauf der maximalen Beschleunigungen eines diskreten Pendelschlags mit einer Auslenkung von 60 und 120 cm



Bild D-A18: Beschleunigungszeitverläufe für diskrete Pendelschläge bei Auslenkungen von 60 und 120 cm

Teilprojekt E

Baubetriebliche Fragestellungen

von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Dipl.-Ing. Erik Boska

Technische Universität Darmstadt, Institut für Baubetrieb

Inhaltsverzeichnis Schlussbericht Teilprojekt E

| E.1 | E | inleitung | E-3 |
|------------|-----|--|------|
| E. | 1.1 | Problemstellung zum Teilprojekt E | E-3 |
| E. | 1.2 | Zielsetzung des Teilprojektes E | E-4 |
| E.2 | A | usgangsbasis und Grundlagen für das Teilprojekt E | E-6 |
| E. | 2.1 | Entwicklung von praktischen Hilfen für die Anfertigung von Gefährdungsbeurteilungen - Grundlagen | E-6 |
| E. | 2.2 | Entwicklung von Empfehlungen zur Prozessgestaltung bei Betonierarbeiten - Grundlagen | E-10 |
| E. | 2.3 | Entwicklung der Basis eines Datenbanksystems zur Dokumentation des Betoniervorgangs - Grundlagen | E-13 |
| E. | 2.4 | Auswahlkriterien für geeignete Schalungen - Grundlagen | E-14 |
| E.3 | В | austellenversuche | E-16 |
| E. | 3.1 | Untersuchungskomplex 1 - Entwicklung von praktischen Hilfen für die Anfertigung von Gefährdungsbeurteilungen | E-16 |
| E. | 3.2 | Untersuchungskomplex 2 - Empfehlungen zur Prozessgestaltung bei Betonierarbeiten | E-17 |
| E.4 | A | uswertung und Ergebnisse | E-23 |
| E. | 4.1 | Entwicklung von praktischen Hilfen für die Anfertigung von Gefährdungsbeurteilungen - Ergebnisse | E-23 |
| E. | 4.2 | Entwicklung von Empfehlungen zur Prozessgestaltung bei Betonierarbeiten - Ergebnisse | E-28 |
| E. | 4.3 | Entwicklung der Basis eines Datenbanksystems zur Dokumentation des Betoniervorgangs - Ergebnisse | E-33 |
| E. | 4.4 | Auswahlkriterien für geeignete Schalungen - Ergebnisse | E-35 |
| E.5 | Z | usammenfassung und weiterer Forschungsbedarf | E-39 |
| E.6 | L | iteraturverzeichnis | E-43 |
| E.7 | D | anksagung | E-45 |
| E.8 | A | nlagen | E-46 |

E.1 Einleitung

E.1.1 Problemstellung zum Teilprojekt E

Die Anforderungen an zu errichtende Bauteile oder Bauwerke werden in der Regel deskriptiv, zeichnerisch und auf Basis von Mustern vertraglich bestimmt. In den technischen Prozessen der Leistungserstellung von Bauteilen aus dem Werkstoff Beton spielen Schalungen als Bauhilfsstoffe eine exponierte Rolle. Sie stützen und formen den plastischen Frischbeton bis zum Zeitpunkt seiner ausreichenden Erhärtung und geben dem Betonkörper seine endgültige Gestalt. Dabei bestimmt der Frischbetondruck maßgeblich das Verformungsverhalten von Schalungen sowie deren Verschleiß und wirkt nachhaltig auf die Gestaltung der Arbeitssysteme.

Der Einsatz von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz beeinflusst in starkem Maße die Leistungserstellungsprozesse, die dafür notwendigen Bauhilfsstoffe wie Schalungen, die Baugeräte sowie die Mannschaften. Bereits in der Arbeit von Huth [E-1] wurde festgestellt: "Mit den selbstverdichtenden Eigenschaften wurden jedoch nicht nur Veränderungen am Baustoff hervorgerufen, sondern diese Eigenschaften führten auch zu Eingriffen in den Herstellungsprozess von Beton- und Stahlbetonbauteilen." Es besteht die berechtigte Vermutung – durch singuläre Beobachtungswerte –, dass die Würdigung dieser Erkenntnisse in der Prozessplanung und –gestaltung aus baubetrieblicher Sicht in der Praxis nicht stattfindet. Dieses führt zu mehreren Konsequenzen:

- Die Prozesse auf der Baustelle verlaufen nicht unter beherrschbaren Bedingungen ab.
 Die Wirtschaftlichkeit und die termingerechte Durchführung der Prozesse werden nachteilig beeinflusst.
- Es wird beobachtet, dass das Baustellenpersonal den gestellten Aufgaben nicht gewachsen ist, was regelmäßig zu Überforderungen führt. Dieses kann sowohl zu Nachteilen in der Qualität der erbrachten Bauleistung als auch zum Anstieg von Konfliktsituationen innerhalb der Projektorganisation führen.
- Der Frischbetondruck als sicherheitsrelevante Größe wird in den notwendigen Gefährdungsanalysen nicht berücksichtigt.
- Bei der Auswahl der prozessadäquaten Bauhilfsstoffe werden Fehler gemacht und technische Systeme verwendet, welche die Outputparameter der Prozesse nicht erfüllen.

Die oben genannten Gründe führen zur Notwendigkeit einer baubetrieblichen Forschung beim Einsatz von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz, deren Einzelziele unter der Ziffer E.1.2 dargelegt sind.

E.1.2 Zielsetzung des Teilprojektes E

Im Teilprojekt E des Forschungsvorhabens konzentrieren sich die Untersuchungen auf die baubetrieblichen Themenkomplexe der Prozessgestaltung bei Betonierarbeiten, der Arbeitssicherheit, der Entwicklung einer Basis für ein Dokumentationssystem sowie der Bestimmung von Auswahlkriterien für geeignete Schalungen. Sie sind relevant in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit der Bauausführung einerseits sowie, resultierend aus der durch die Europäische Rahmenrichtlinie Arbeitsschutz geschaffene neue Verantwortung auf Seiten des Arbeitgebers und des Arbeitnehmers, auf die Gestaltung der Arbeitssysteme anderseits.

Die Einzelziele sind:

Entwicklung von praktischen Hilfen f ür die Anfertigung einer Gef ährdungsbeurteilung.

Die Umsetzung der aus der europäischen Arbeitsschutz-Rahmen-Richtlinie 89/3391 EWG resultierenden Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes (Betriebssicherheitsverordnung - BetSichV) schafft veränderte Rahmenbedingungen für den Arbeits- und Gesundheitsschutz. Danach sind Tätigkeiten nicht mehr vorschriftenorientiert, sondern gefährdungsorientiert zu beurteilen. Mit dem neuen Konzept wird ein hohes Maß an Eigenverantwortung eingerichtet. Der Arbeitgeber muss aus den Grundpflichten in Bezug auf Organisation und Führungskräfte sowie aus den Grundsätzen der Vermeidung (ArbSchG § 3) Maßnahmen des Arbeitsschutzes bestimmen, die aus einer Beurteilung der Gefährdung von Beschäftigten im Zuge der Verrichtung von Arbeiten resultieren (ArbSchG § 5). Die Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung und die getroffenen Schutzmaßnahmen sind zu dokumentieren (§ 6 des ArbSchG). Der Versicherte (Arbeitnehmer) ist verpflichtet, wachsam die aus den Maßnahmen resultierenden richtigen Anweisungen zu befolgen oder sie für den Fall zu verweigern, wenn sie mangelhaft sind. Bezogen auf den Forschungsgegenstand ist festzustellen, dass gerade die Einwirkungsseite - der Frischbetondruck – bei der Anfertigung von Gefährdungsbeurteilungen unter Einsatz von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz nicht ausreichend gewürdigt wird. Kritisch wurde dieses in [E-2] und [E-3] reflektiert. Daher wird als eines der Ergebnisse der Forschungsarbeit eine Hilfe für die Anfertigung einer Gefährdungsbeurteilung für den Bereich der Betonierarbeiten entwickelt.

Empfehlungen f ür die Gestaltung der Prozesse auf der Baustelle mit dem Schwerpunkt im Bereich der Betonierarbeiten

Die existierenden signifikanten Unterschiede in den Teilvorgängen und den Vorgangsstufen bei Anwendung von SVB gegenüber üblichen Rüttelbetonen (F1 bis F4) wurden im Rahmen einer am Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt erstellten Forschungsarbeit, deren Ergebnisse in einer Dissertation [E-1] zusammengefasst sind, nachgewiesen. Diese Ergebnisse werden um weitere Baustellenuntersuchungen ergänzt. Ziel ist die Ableitung von Parametern für die Arbeitssystemdefinition sowie zur Bestimmung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei der Anwendung von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz.

- Basis eines Datenbanksystems zur Dokumentation des Betoniervorgangs
- Die Regelungen des Bauvertrages, weitere normative Vorgaben sowie die Prozesse der Qualitätssicherung erfordern die Dokumentation der Planungs- und Produktionsprozesse. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird die Basis für ein Dokumentationssystem für den Betoniervorgang in Verbindung mit der Gefährdungsbeurteilung entwickelt, in der mobile Technologien sowie Bildverarbeitungssysteme berücksichtigt werden (Literatur hierzu s. [E-7] bis [E-10]).
- Auswahlkriterien für geeignete Schalungen
- Aus den Ergebnissen von im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Baustellenuntersuchungen sowie auf der Grundlage weiterer Forschungsergebnisse wird ein Basiskatalog für die Auswahl von lotrechten Schalungen bei Einsatz von Hochleistungsbetonen mit fließfähigen Eigenschaften entwickelt.

E.2 Ausgangsbasis und Grundlagen für das Teilprojekt E

E.2.1 Entwicklung von praktischen Hilfen für die Anfertigung von Gefährdungsbeurteilungen - Grundlagen

Die Umsetzung der Arbeitsschutz-Rahmen-Richtline 89/391 EWG erfolgt in Deutschland mit dem Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG) vom 7. 8. 1996 (BGBl. I S. 1246). Hieraus resultieren weitere staatliche Verordnungen, welche bezogen auf die Bauarbeiten unter anderem in der Baustellenverordnung (BaustellV 06.1998), in der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV 09.2002), in der Arbeitsstättenverordnung 08.2004 respektive in den Arbeitsstätten-Richtlinien (ASR) ihr Abbild finden sowie durch Technische Regeln für Betriebssicherheit ergänzt werden. In den Technischen Regeln sind Hinweise zum Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene sowie zu sonstigen arbeitswissenschaftlichen Erkenntnissen enthalten, aus denen die Anforderungen bezüglich des Arbeitsschutzes abgeleitet werden können.

Für den Bereich der Bauarbeiten gilt:

Der Unternehmer ist verantwortlich für das Aufstellen einer Gefährdungsbeurteilung und die wirksame Umsetzung der daraus resultierenden Maßnahmen. Baustellenführungskräfte (Bauleiter und Poliere) können durch Delegation in die Mitverantwortung einbezogen werden. Alle Mitarbeiter haben die Anweisungen des Unternehmers zu befolgen (sofern diese richtig sind) und gegebenenfalls Bedenken zu melden (s. Bild E-1).



Bild E-1: Gesetzliche Hierarchie der Gefährdungsbeurteilung [E-4]

Die Gefährdungsbeurteilung und die wirksame Umsetzung der daraus resultierenden Maßnahmen spielen in der Arbeitsvorbereitung einer Baustelle und im täglichen Baustellenleben für den Unternehmer, die Baustelleführungskräfte sowie die Arbeitskräfte eine zentrale und verpflichtende Rolle. Die Gefährdungsbeurteilung muss die individuellen Randbedingungen der Baustelle berücksichtigen und dort vorliegen. Das Vernachlässigen dieses Dokumentes kann erhebliche strafrechtliche, zivilrechtliche, ordnungsrechtliche und arbeitsrechtliche Konsequenzen haben (s. [E-5], [E-6]).

In den weiteren Ausführungen werden die Grundlagen zur Anfertigung einer Gefährdungsbeurteilung bei Betonierarbeiten erarbeitet.

Im Zusammenhang mit der Gefährdungsbeurteilung sind zunächst die Grundbegriffe zu definieren.

Gefahr

Möglichkeit, dass Energie unkontrolliert freigesetzt wird.

Gefährdung

Unter einer Gefährdung wird im Arbeitsschutzgesetz das Zusammenwirken einer Quelle eines möglichen arbeitsbedingten Unfalls oder einer arbeitsbedingten Gesundheitsbeeinträchtigung mit dem Menschen verstanden. Gefährdungen umfassen sowohl die Möglichkeit des Einwirkens von schädlichen Energien und Stoffen auf den Menschen als auch Belastungen, die negative Beanspruchungen hervorrufen können.

Gefährdungsfaktoren

Bei den Gefährdungsfaktoren handelt es sich um gruppierte Gefährdungen, die durch gleichartige Gefahrquellen oder Wirkungsqualitäten gekennzeichnet sind.

Gefährdungsbeurteilung

Unter einer Gefährdungsbeurteilung wird das Erkennen und Bewerten der Entstehungsmöglichkeiten von Unfällen und Gesundheitsbeeinträchtigungen infolge der beruflichen Arbeit verstanden. Sie hat das Ziel, Maßnahmen zur Beseitigung von Gefährdungen abzuleiten.

In Bild E-2 ist die Ablaufstruktur dargestellt, welche die Folgen des Wirksamwerdens eines Gefährdungsfaktors in räumlich-zeitlicher Begegnung mit einer Arbeitskraft verdeutlicht.



Bild E-2: Folgen des Wirksamwerdens eines Gefährdungsfaktors (Quelle: BG BAU)

Im Rahmen der hier relevanten arbeitsablauforientierten Gefährdungsbeurteilung erfolgt die Ermittlung von Gefährdungen eines Arbeitsablaufs innerhalb des Arbeitssystems in folgenden Schritten:

- Abgrenzen des Arbeitssystems.
- Ermittlung der Tätigkeiten.
- Zerlegen in Tätigkeits- / Arbeitsschritte.
- Ermittlung der auftretenden Gefährdungsfaktoren bei den Tätigkeits-/ Arbeitsschritten.
- Ermittlung der Gefahrenquellen und der Gefahr bringenden Bedingungen (warum oder durch welche Bedingungen kann es zu einem Unfall / Gefährdung kommen) für den einzelnen Gefährdungsfaktor. Die individuellen Leistungsvoraussetzungen des Mitarbeiters sind zu beachten. Die Gefährdung ist zu bestimmen.
- Risikobeurteilung jeder einzelnen Gefährdung. Hierzu sind folgende Schritte durchzuführen: Wahrscheinlichkeit des Wirksamwerdens der Gefährdung und mögliche Schadensschwere abschätzen, Handlungsbedarf festlegen.
- Schutzmaßnahmen suchen, umsetzen und Kontrolle der Durchführung und Wirksamkeit vornehmen (Verantwortliche benennen).

Die aufgeführten Schritte sind für jeden Gefährdungsfaktor und jede Tätigkeit durchzuführen.

Wechselwirkungen mit benachbarten oder übergeordneten Arbeitssystemen, Arbeitsplätzen und Arbeitsmitteln sind zu beachten.

Die Schrittfolge der arbeitsauforientierten Gefährdungsbeurteilung ist in Bild E-3 dargestellt.



Bild E-3: Schrittfolge der arbeitsablauforientierten Gefährdungsermittlung und Risikobeurteilung (Quelle: BG BAU)

Zur Risikobeurteilung wird von der BG BAU unter anderem das bewährte Verfahren nach Nohl vorgeschlagen. Bild E-4 verdeutlicht das Verfahren. Demnach ergibt sich aus der Bewertung der Wahrscheinlichkeit des Wirksamwerdens der Gefährdung und der möglichen Schadensschwere eine definierte Maßzahl. Mithilfe der Einteilung der Maßzahlen nach den Risikostufen "gering", "signifikant" und "hoch" ergibt sich der Handlungsbedarf im betrachteten Arbeitsvorgang bezüglich der erforderlichen Maßnahmen des Arbeitsschutzes.

| Mögliche Schadensschwere Wahrscheinlichkeit des Wirksamwerdens der Gefährdung | | Leichte Verletzungen | Mittelschwere Verletzungen oder Erkrankungen | Schwere Verletzungen oder Erkrankungen | Möglicher Tod, Katastrophe |
|---|-------------|--|---|---|----------------------------------|
| | | oder Erkrankungen | | | |
| Sehr gering | 1.5 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Gering | | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Mittel | Mittel | | 4 | 5 | 6 |
| Hoch | Hoch | | 5 | 6 | 7 |
| Maßzahl | Risiko | Beschreibung | | | |
| 1 -2 | gering | Der Eintritt einer Verletzung oder Erkrankung ist nur wenig wahrscheinlich. Handlungsbedarf zur Risikoreduzierung ist nicht erforderlich | | | |
| 3 – 4 | signifikant | Der Eintritt einer Verletzung oder Erkrankung ist wahrschein- lich. Handlungsbedarf zur Risikoreduzierung ist angezeigt | | | |
| 5 – 7 | hoch | Der Eintritt einer Verletzung oder Erkrankung ist sehr wahr- scheinlich. Handlungsbedarf zur Risikoreduzierung ist dringend erforderlich | | | |

Bild E-4: Risikomatrix nach Nohl (Quelle: BG BAU)

Das Festlegen von Schutzzielen hat nach einer Maßnahmenhierarchie zu erfolgen, die in Bild E-5 dargestellt ist. Die Wahl einer Schutzmaßnahme am Ende der Maßnahmenhierarchie bedingt ein begründetes Verwerfen der vorhergehenden Schutzmaßnahmen. So ist zum Beispiel der Einsatz persönlicher Schutzausrüstung an einer Absturzstelle nur dann gerechtfertigt, wenn das Anbringen eines Absturzgeländers nicht möglich ist.



Bild E-5: Maßnahmenhierarchie (Quelle: BG BAU)

Aus den Ausführungen ist abzuleiten, dass eine Untersuchung der Größen für eine Gefährdungsbeurteilung beim Einsatz von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz gegenüber dem Einsatz üblicher Rüttelbetone (F1 bis F4) dringend geboten ist.

E.2.2 Entwicklung von Empfehlungen zur Prozessgestaltung bei Betonierarbeiten -Grundlagen

Die Empfehlungen zur Prozessgestaltung für die Betonierarbeiten bei Einsatz von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz gegenüber dem Einsatz üblicher Rüttelbetone werden auf Basis einer Schwachstellenanalyse entwickelt. Die Erkenntnisse hierzu wurden in Feldstudien auf Baustellen gewonnen.

Im vorliegenden Kapitel E.2.2 werden zunächst die Grundlagen der Betoniervorgänge mit den untersuchten Konsistenzen dargelegt, die in der Arbeit von Huth [E-1] dokumentiert sind. Ferner werden die notwendigen REFA-Grundlagen zur Durchführung der Feldstudien erläutert. Die Vorstellung der Ergebnisse erfolgt in den Kapiteln E.3.2 und E.4.2.

Definitorisch versteht man unter einem Prozess eine ganzheitliche, sachlogische und zeitliche Folge von Aktivitäten zur Bearbeitung eines Projektes. Die Aktivitäten respektive Vorgänge des Prozesses "Bauteil betonieren" werden in dem vorliegenden Kapitel entsprechend den Methoden der Arbeitswissenschaften (REFA) untersucht. Es werden ausschließlich vertikale Stahlbetonbauteile betrachtet.

Zunächst wird der Vorgang "Bauteil betonieren" in die Teilvorgänge "Beton fördern" und "Beton einbauen" gegliedert.

Der Teilvorgang "Beton fördern" wird nach DIN 1045-3 zwischen dem Befördern des Betons zur Baustelle und dem Fördern des Betons auf der Baustelle unterschieden. Nachfolgend wird ausschließlich das Fördern des Betons auf der Baustelle untersucht. Es wird differenziert zwischen dem stetigen und dem unstetigen Fördern.

Das unstetige Fördern erfolgt in einem diskontinuierlichen Arbeitsablauf wie zum Beispiel das Fördern des Betons mit Kran und Betonkübel. Hierbei setzt sich der technologische Ablauf unter der Verwendung von Rüttelbeton aus den Vorgangsstufen "Warten auf Kübelbefüllen", "Kübel schwenken", "Kübel/Schlauch positionieren", "Warten auf Kübelleeren", "Warten auf Verdichten", "Kübel umsetzen" und "Kübel zurückschwenken" zusammen. Wird ein SVB nach diesem Verfahren gefördert, entfällt die Vorgangsstufe "Warten auf Verdichten". Das Umsetzen des Kübels kann je nach den gegebenen Randbedingungen (große Einbauteile in der Schalung) notwendig sein.

Unabhängig von den besonderen Randbedingungen ist das Umsetzen des Kübels bei Verwendung von Rüttelbetonen aufgrund der Forderung eines Einbaus in horizontalen Schüttlagen obligatorisch.

Das stetige Fördern des Betons verläuft kontinuierlich, in der Regel unter Einsatz einer Betonpumpe. Die Vorgangsstufen "Pumpe anfahren", "Pumpe bedienen", "Warten auf Verdichten", "Schlauch umsetzen" und "Warten auf Betonzufuhr" bilden den Teilvorgang "Beton pumpen". Entsprechend den vorhandenen Erkenntnissen entfällt die Vorgangsstufe "Warten auf Verdichten" für den SVB. Die Unterschiede zwischen Rüttelbeton und SVB der Vorgangsstufe "Schlauch umsetzen" sind mit der Vorgangsstufe "Kübel umsetzen" identisch. Die Unterbrechungen des Pumpvorgangs bedingt durch die Vorgangsstufe "Schlauch umsetzen" beeinflussen die Förderleistung der Pumpe.

Das kontinuierliche Fördern des SVB kann unter gegebenen Randbedingungen ohne planmäßige Unterbrechungen erfolgen. Die erreichbaren Betoniergeschwindigkeiten müssen auf das angewendete Schalungssystem abgestimmt werden.

Der Teilvorgang "Beton pumpen" wird von der Vorgangsstufe "Warten auf Betonzufuhr" abgeschlossen. Diese Vorgangsstufe gilt sowohl bei der Verwendung von Rüttelbetonen als auch bei Einsatz eines SVB. Sie ist unabhängig von den Werkstoffeigenschaften und einzig durch die Organisation der Baustelle bestimmt.

In dem Teilvorgang "Beton einbauen" spiegeln sich die Abläufe aus dem Teilvorgang "Beton fördern" wider.

Der Rüttelbeton neigt beim Entleeren in vertikale Bauteile dazu, einen Schüttkegel auszubilden. Um der Vorgabe der horizontalen Schüttlage gerecht zu werden, muss das Baustellenpersonal die Entleerungsstellen in geringen Abständen verteilen. Die Vorgangsstufe "Beton verteilen" kann unter vorgenannten Randbedingungen für den SVB entfallen.

Die Vorgangsstufe "Weitere Tätigkeiten" berücksichtigt die unterschiedlichen Eigenschaften der Bauwerke als auch eventuelle Schadensfälle während des Betonierens. Sowohl für den SVB als auch für Rüttelbetone können folgende Tätigkeiten auftreten:

- Umsetzen von Betoniergerüsten (selten)
- Reinigen von Aussparungen und Öffnungen von eingelaufenem Beton
- Kontrolle der Einfüllhöhe
- Betonierpausen zur Frischbetondruckregulierung
- Schalung reparieren
- Pumpe reparieren
- Grobes Reinigen des Arbeitsplatzes, der Bauteile und Außenschalflächen direkt nach dem Betoniervorgang.

Die zusätzliche Vorgangsstufe "Warten auf Betonmischer" soll darauf hinweisen, dass es sowohl für den SVB als auch für Rüttelbetone zu Wartezeiten kommen kann, falls ein Pumpenbehälter nicht von zwei Fahrmischern gleichzeitig angefahren werden kann.

Die Vorab ausgeführten Überlegungen sind in Bild E-6 dargestellt.

| Vorgangsstufe | Teilvorgang | Vorgangsstufe | Vorgangsstufe | Teilvorgang | Vorgangsstufe |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--|------------------------|
| <──SVB──> | | < Rüttelbeton> | SVB | | Rüttelbeton |
| Warten a. Kübelbefüllen | Beton mit Kübel fördern | Warten a. Kübelbefüllen | Kübel befüllen | Beton mit Kübel (und Schlauch) einbauen | Kübel befüllen |
| Kübel schwenken | | Kübel schwenken | Warten auf Schwenken | | Warten auf Schwenken |
| Kübel positionieren | | Schlauch positionieren | Schlauch positionieren | | Schlauch positionieren |
| | | | Kübel entleeren | | Kübel entleeren |
| Warten auf Kübelleeren | | Warten auf Kübelleeren | Schlauch umsetzen | | Beton verteilen |
| Kübel umsetzen | | Warten auf Verdichten | Weitere Tätigkeiten | | Beton verdichten |
| Kübel zurückschwenken | | Kübel umsetzen | | | Schlauch umsetzen |
| | | Kübel zurückschwenken | | | Weitere Tätigkeiten |
| Pumpe anfahren | Beton pumpen (mobil) | Pumpe anfahren | Schlauch positionieren | Beton mit Pumpe (mobil) einbauen | Schlauch positionieren |
| Pumpe bedienen | | Pumpe bedienen | Westen ouf Petenzufuhr | | Beton verdichten |
| Schlauch umsetzen | | Warton auf Vordichton | Walten auf Betonzurum | | Beton verdicitien |
| Schladen umsetzen | | Walten auf verdichten | Weitere Tätigkeiten | | Schlauch umsetzen |
| Warten auf Betonzufuhr | | Schlauch umsetzen | | | Warten auf Betonzufuhr |
| | | Warten auf Betonzufuhr | | | Weitere Tätigkeiten |

Bild E-6: Unterschiede von SVB und Rüttelbetonen im Teilvorgang "Beton einbauen" (aus [E-1])

Die beschriebenen Vorgansstufen des Prozesses "Bauteil betonieren" werden den Zeitarten nach REFA zugeordnet:

- 1) Grundzeit
 - Beton einbauen (MH)
 - Einfüllhöhe kontrollieren von oben (MN)
 - Einfüllhöhe kontrollieren von unten (MN)
 - Schlauch umsetzen (MN)

- 2) Verteilzeit
 - Warten auf Betonmischer (MA)
 - Betonierpause zur Druckregulierung (MA)
 - Warten auf Pumpe befüllen (MA)
 - Warten auf Schlauch umsetzen (MA)
 - Schalung reparieren (MS)
 - Pumpe reparieren (MS)
 - Persönlich bedingtes Unterbrechen (MP)
- 3) Erholzeit
 - Erholen (ME).

E.2.3 Entwicklung der Basis eines Datenbanksystems zur Dokumentation des Betoniervorgangs - Grundlagen

Die Planungs- und Ausführungsprozesse von Bauwerken sind sorgfältig zu dokumentieren, die Ergebnisse aus Planungs- und Bauleistungen sind strukturiert aufzubereiten. Hierzu zählen Beschreibungen, Bemessungen, Zeichnungen und andere Dokumente, die für die Planung, Herstellung und Abnahme sowie die Übergabe und Übernahme baulicher Anlagen erforderlich sind (s. [E-14]). Eine systematische Aufbereitung der Dokumentation ermöglicht:

- die sachgerechte Erstellung von Baudokumenten während der Vorbereitung und Ausführung von Bauleistungen,
- die Kontrolle der Vollständigkeit der Baudokumentation zum Zeitpunkt der Bauübergabe sowie
- die geordnete Ablage von Baudokumenten als Bauakten (detailliert s. [E-15]).

Der Betoniervorgang bildet einen komplexen und technisch anspruchsvollen Vorgang im Produktionsprozess. Verantwortlich für die ordnungsgemäße Durchführung der nach DIN 1045-3 geforderten Überwachungsmaßnahmen des Frischbetons und des Betoniervorgangs ist das ausführende Bauunternehmen. Bevor das Bauunternehmen den Betoniervorgang dinglich ausführen kann, werden durch eine Vielzahl von Entscheidungsträgern die Eigenschaften des Betons zuvor im Planungsprozess bestimmt.

Die komplexen Vorgänge in der Planungsphase werden in der Ausführungsphase fortgesetzt. Hier entsteht eine dichte Kommunikationsstruktur auf dem Weg von der Sortenbestimmung über die Bestellung, den Abruf bis zum Frischbetoneinbau am Bestimmungsort, die erfahrungsgemäß fehleranfällig ist. Aufgrund dessen und aufgrund der unter Kapitel E.1.2 genannten Aspekte ist eine möglichst vollständige sowie transparente Dokumentation des Betoniervorgangs zwingend erforderlich. Das Kapitel E.4.3 behandelt die Entwicklung der Basis eines Datenbanksystems zur Dokumentation des Betoniervorgangs. Im Betrachtungsfokus stehen der Vorgang des Betonierens und der Vorgang der Schalungskontrolle vor dem Betoniervorgang.

Unter Berücksichtigung der hohen Frischbetondrücke, die beim Einsatz von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz entstehen können, gilt es, im Vorfeld des Betoniervorgangs das Schalungssystem gesondert zu erfassen.

Die zu entwickelnde Basis soll darüber hinaus die Möglichkeit der aktiven Steuerung des Betoniervorgangs eröffnen. Hierzu werden Soll-Ist-Vergleiche im Ansatz konzipiert. Diese konzentrieren sich zunächst auf die relevanten Werte der Frischbetonsteiggeschwindigkeit sowie der räumlichen Lage des Einbauorts.

Die Erfassung der Ist-Daten kann sowohl mittels konservativer Methoden in Form von Listen als auch mithilfe polysensoraler Systeme wie zum Beispiel Bildverarbeitungssysteme erfolgen (s. [E-16] und [E-17]).

Die Basis des Datenbanksystems zur Dokumentation des Betoniervorgangs liefert einen Beitrag zur Qualitätssicherung und soll eine Ergänzung zu bestehenden QM-Systemen von Bauunternehmen liefern.

E.2.4 Auswahlkriterien für geeignete Schalungen - Grundlagen

Der Vorgang der Auswahl geeigneter Schalungen für eine definierte Bauaufgabe ist sehr komplex, die Auswahlkriterien sind sehr vielfältig. Daher werden im Rahmen des Forschungsberichts die relevanten Kriterien in Form einer Check-Liste sowie als Erfahrungswerte aus den untersuchten Baustellen in Kapitel E.4.4 angegeben.

In der Fachliteratur existieren wenige Ansätze, die den Themenkomplex integrativ erfassen. Rein deskriptive Verfahren finden sich in [E-11] sowie eine Entscheidungsmatrix auf Basis einer Nutzwertanalyse in [E-12]. In einer älteren Publikation [E-13] wurde ein Software-System entwickelt, welches einen komplexen technischen und kalkulatorischen Verfahrensvergleich beim Einsatz von Schalungssystemen ermöglicht. Dieses Software-System wurde jedoch nicht über das Stadium eines explorativen Prototypen entwickelt und ist in den modernen Hardwarekonfigurationen nicht lauffähig. In diesem Kontext wird darauf hingewiesen, dass die meisten Schalungshersteller über EDV-Werkzeuge für die Schalungsplanung verfügen. Damit lassen sich bequem technische Lösungen und Materiallisten generieren, komplexe baubetriebliche Prozessanalyse sind damit jedoch nicht zu realisieren.

Grundsätzlich ist zu konstatieren, dass unabhängig davon, ob Hochleistungsbetone mit fließfähigen Eigenschaften oder übliche Rüttelbetone eingesetzt werden, die Auswahl und die Einsatzplanung einer Schalung sehr gründlich vorzunehmen sind. Begründet wird dieses unter anderem durch folgende Punkte:

 Der Kostenanteil der Schalung (Lohn- und Stoffkosten) an den Rohbaukosten ist hoch. Im Hochbau kann dieser 35% und mehr betragen. Die Auswahl des Schalungssystems muss daher unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit erfolgen.

- Schalungsarbeiten bestimmen maßgeblich die Baugeschwindigkeit und damit die Bauzeit. Die Auswahl des Schalungssystems muss daher unter dem Aspekt der Prozessgeschwindigkeit (kapazitive und technologische Abhängigkeiten) erfolgen.
- Schalungen beeinflussen maßgeblich die Qualität von Bauteilen (Betonfläche, Bauteilabmessungen, Bauteillage). Die Schalungskonstruktion muss standsicher sein und darf die zulässigen Verformungen nicht überschreiten.
- Schalungsarbeiten sind sicherheitsrelevant und müssen in der Gefährdungsbeurteilung einer Baustelle miterfasst werden. Die Auswahl des Schalungssystems muss daher unter dem Aspekt der Arbeitssicherheit erfolgen.
- Schalungsarbeiten gehören zu den körperlich sehr anstrengenden Arbeiten (s. [E-13]), daher sind die damit verbundenen Arbeitssysteme sorgfältig zu konzipieren. Die Auswahl des Schalungssystems muss daher unter dem Aspekt der Ergonomie erfolgen.
- Schalungsarbeiten erfordern in der Regel eine entsprechende Qualifikation der Arbeitskräfte. Die Auswahl des Schalungssystems muss daher unter dem Aspekt der Verfügbarkeit entsprechender Fachkunde erfolgen.

E.3 Baustellenversuche

E.3.1 Untersuchungskomplex 1 - Entwicklung von praktischen Hilfen für die Anfertigung von Gefährdungsbeurteilungen

Zur Gewinnung von Erkenntnissen über die relevanten Gefährdungsfaktoren beim Vorgang des Betonierens wurden Untersuchungen auf folgenden Baustellen durchgeführt (aus Gründen des Datenschutzes müssen die Angaben anonymisiert werden):

Baustelle 1: Hochbau, Hochhaus in Frankfurt am Main

Baustelle 2: Hochbau, Bauen im Bestand in Frankfurt am Main

Baustelle 3: Hochbau, Neubau, Verkaufszentrum in Metzingen.

Folgenden Gefährdungen wurden gemäß den Empfehlungen des GSV [E-4] untersucht:

Mechanische Gefährdungen wie

- Ungeschützt bewegte Teile (zum Beispiel Scher- und Quetschstelle an der Verbindung von zwei Schalelementen).
- Transport und bewegte Arbeitsmittel (zum Beispiel Sichlösen und Herabfallen von transportiertem Schalmaterial).
- Unkontrolliert bewegte Teile (zum Beispiel Kippen oder Herabfallen von Schalelementen).
- Sturzgefährdungen (zum Beispiel Rutschgefährdung an einer mit Betontrennmittel behandelten Deckenschalung).
- Absturzgefährdungen (zum Beispiel Fallen, Kippen oder Rutschen einer Arbeitsperson über respektive von einer Absturzkante; Zusammenbrechen oder Umkippen einer Schalungskonstruktion).

Elektrischer Strom

Gefahrstoffe

Klima wie

 Wärme-/Kältebelastung: Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit, Wärmestrahlung (zum Beispiel Verlegen von Schaltafeln einer Deckenschalung im Hochsommer).

Lärm wie

- Geräuschemission (zum Beispiel Anbringen von Verbindungsmitteln der Schalelemente mit Hammerschlag).
- Geräuschimmission (zum Beispiel Irritation durch den ohnehin hohen Lärmpegel einer Baustelle und das Überhören von Warnrufen).

Physische Belastungen wie

- Manuelle Handhabung von Lasten (zum Beispiel das manuelle Aufstellen eines kranunabhängigen Wandschalungselementes).
- Erzwungene Körperhaltung (zum Beispiel Überkopfarbeit beim Ausschalen eines Deckensystems).

Psychische Belastungen durch die Arbeit wie

- Arbeitsorganisation (zum Beispiel Arbeitszeit bei Schichtarbeit, Stress durch Termindruck auf der Baustelle).
- Arbeitsaufgabe (zum Beispiel Überforderung durch mangelnde Einweisung in das Arbeitssystem).
- Soziale Bedingungen (zum Beispiel Führungsverhalten).

Als Arbeitssystem wurden Betonierarbeiten an Wandscheiben betrachtet. In Bild E-7 ist ein Arbeitssystem auf einer der untersuchten Baustellen dargestellt. Analoge Arbeitssysteme dienten als Grundlage der Risikoanalyse auf allen untersuchten Baustellen. Die Ergebnisse sind in den Tabellen E-1 und E-2 (s. Kapitel E.4.1) zusammengefasst.



Bild E-7: Beispiel eines Arbeitssystems auf untersuchter Baustelle

E.3.2 Untersuchungskomplex 2 - Empfehlungen zur Prozessgestaltung bei Betonierarbeiten Im Hinblick auf einen Einsatz von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz und bei SVB kann für den Vorgang des Betonierens festgestellt werden, dass viele Unternehmen zum jetzigen Zeitpunkt über keine oder nur geringe Daten aus Nachkalkulationen oder Arbeitszeitstudien verfügen (s. [E-1] sowie Experteninterviews der Verfasser).

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Arbeitszeitstudien mittels einer Gruppenzeitaufnahme nach REFA auf der vorgenannten Baustelle 2 (Hochbau, Bauen im Bestand in Frankfurt am Main) sowie im Großversuch der Technischen Universität München und der Universität Leipzig (Teilprojekt D, 07.08.2008) durchgeführt. Der Aufbau des Großversuches ist dem Forschungsbericht des Teilprojektes D zu entnehmen. Das Erfassungsintervall betrug 1 Minute, was bei der Erfassung analoger Arbeiten in der Bauwirtschaft üblich ist.

Die Arbeitszeitstudien dienten der Analyse des Ablaufs (Schwachstellenanalyse) sowie der Gewinnung von Aufwandswerten.

Im Zuge der Umbaumaßnahmen auf der Baustelle 2 hat das beauftragte Bauunternehmen u. a. zwei Stahlbetonwände (W1 und W2, genaue Angaben siehe Bild E-9 und Bild E-11) zu erstellen. Ihre Funktion ist das einseitige Verkleiden jeweils einer bestehenden Kalksandstein- und Porenbetonsteinwand.

Zur Durchführung der Arbeiten wurde eine einhäuptige Schalung eingesetzt. Die Schalung reichte vom Wandkopf bis zum Wandfuß. Die mit Stahlträgern verstärkte Bestandswand begrenzte das zu erstellende Stahlbetonbauteil auf der gegenüberliegenden Seite. Da die Bestandswände jeweils am Wandkopf und am Wandfuß in eine Deckenplatte einbinden, gestaltete sich das Einbringen des Frischbetons in die Schalung besonders schwierig. Die Vorgangsstufe des Verdichtens ist unter diesen Randbedingungen nur schwer realisierbar. Aus diesen Gründen wurde ein SVB zur Erstellung der Stahlbetonwand gewählt. Der Frischbeton wurde mittels einer mobilen Autobetonpumpe durch im Voraus angefertigte Kernbohrungen in der Deckenplatte eingefüllt.

Die Arbeitsablaufbeschreibung ist den Bildern E-8 und E-10 zu entnehmen.
| Arbeitsablaufbeschreibung | | | | |
|--|---|--|--|--|
| Allgemeine Angaben | | | | |
| Bezeichnung der Arbeit: | Betonieren der Wand in Achse 11 - 13 / C | | | |
| Beobachtung Dauer: | 5. Juní 2008 | | | |
| Dauer: | von: 08.05 Uhr bís 11.13 Uhr ~ 3 Stunden | | | |
| Erstellte Menge im beobachteten Zeitraum: | 13,50 m³ Beton | | | |
| Beschreib | ung des Arbeitssystems | | | |
| <u>1. Arbeitsaufgabe:</u> | Betonieren einer Wandscheibe mit einer mobilen Betonpumpe von oben; es wird selbstverdichtender Beton verwendet | | | |
| <u>2. Eingabe:</u> | fertiggestellte Schalung für ca. 15 lfdm Wand; Schalungshöhe 4, 83m | | | |
| <u>3. Ausgabe:</u> | betonierte Sichtbetonwand | | | |
| 4. Betriebsmittel: | | | | |
| Großgeräte: | - 1 mobile Betonpumpe inkl. Schlauch - Schalungssystem gemäß Anlage - Betonmischfahrzeuge | | | |
| Kleingeräte: | - Schaufel | | | |
| Werkzeuge: | - Taschenlampe | | | |
| 5.Menschen: | | | | |
| - 1 Betonpumpenfahrer (wird nic - 1 Polier zur Kontrolle der gesan - 1 Vorarbeiter | ht erfasst, da Fremdleístung) nten Arbeitsaufgabe (nícht gewerblich tätig) | | | |

- 2 Hílfskräfte

6. soziale Umwelteinflüsse

- alle Beteiligten Arbeitskräfte haben keine Erfahrungswerte in der

Verarbeítung von SVB

Bild E-8: Arbeitsablaufbeschreibung Wand W1



Bild E-9: Arbeitsablauf Wand W1

| Arbeitsablaufbeschreibung | | | | |
|---|--|--|--|--|
| Allgemeine Angaben | | | | |
| Bezeichnung der Arbeit: | Betonieren der Wand in Ac | hse 11 - 13 / D | | |
| Beobachtung Dauer | : 17. Juní 2008 | 3 | | |
| Dauer | von: 12.55 uhr bís 15.40 uhr | ~ ~ 2,5 Stunden | | |
| Erstellte Menge im beobachteten Zeitraum: | 10,50 m³ Beto | И | | |
| Beschreibung des Arbeitssyste | ems | | | |
| <u>1. Arbeitsaufgabe:</u> | Betonieren einer Wandsch mobilen Betonpumpe von selbstverdichtender Betor | eibe mit einer oben; es wird n verwendet | | |
| 2. Eingabe: Wand; Schalungshöhe 4, 83m | | | | |
| <u>3. Ausgabe:</u> | betoníerte Síchtbeto | nwand | | |
| 4. Betriebsmittel: | | | | |
| Großgeräte: | - 1 mobile Betonpumpe inkl. 5 - Schalungssystem gemäß Ar - Betonmischfahrzeuge | Schlauch Nlage | | |
| Kleingeräte: | - Schaufel | | | |
| Werkzeuge: | - Taschenlampe | | | |
| 5.Menschen: | | | | |
| - 1 Betonpumpenfahrer (wird ni | cht erfasst, da Fremdleistung) | | | |
| - 1 Políer zur Kontrolle der gesamten Arbeítsaufgabe (nícht gewerblich tätig) | | | | |
| - 1 Vorarbeiter | | | | |
| - 2 Hílfskräfte | | | | |
| 6. soziale Umwelteinflüsse | | | | |
| - alle Beteiligten Arbeitskräfte h | aben geringe Erfahrungswerte | ín der | | |

verarbeitung von SVB

Bild E-10: Arbeitsablaufbeschreibung Wand W2



Bild E-11: Arbeitsablauf Wand W2

E.4 Auswertung und Ergebnisse

E.4.1 Entwicklung von praktischen Hilfen für die Anfertigung von Gefährdungsbeurteilungen - Ergebnisse

Unter der Ziffer E.2.1 wurden die Grundlagen und die Vorgehensweise bei der Anfertigung einer Gefährdungsbeurteilung dargelegt. Unter der Ziffer E.3.1 wurden die Baustellenuntersuchungen in Bezug auf die Betonierarbeiten erläutert. Die gesammelten Daten wurden ausgewertet.

Zunächst werden die Ergebnisse der Risikobeurteilung dargestellt, die auf Basis des Verfahrens von Nohl erarbeitet wurden.

In der nachfolgenden Tabelle E-1 sind die Ergebnisse der Risikobeurteilung von Betonierarbeiten bei Rüttelbetonen (F1 bis F4) und in Tabelle E-2 für F5-, F6-Betone und den SVB unter den angegeben Eingangsvoraussetzungen dargelegt.

Tabelle E-1: Auswertung Risikobeurteilung: Betoniervorgang Rüttelbetone (F1 bis F4)

| Ta Bet | belle E-1: Arbeitssystem: Be triebsmittel: Rüttelbeton, Ri | tonierarbeiten einer V ittelflasche und Umfo | Wandscheibe ormer, Kübel, Pumpe, Sch | alung |
|---------------|---|--|---|------------------------|
| | Gefährdungsfaktoren | Gefahrenquelle Rüttelbeton | Gefährdung | Bewertung nach NOHL |
| 1 | Mechanische Faktoren | glatte und blockierte Verkehrswege | stolpern, rutschen, fallen | 3 |
| | | kippende, rollende und herabfallende Teile | erfasst/getroffen werden | 5 |
| | | ungesicherte Absturzkante | Absturz | 4 |
| \rightarrow | Mittelwert: Mechanische F | 4 | | |
| 2 | Elektrischer Strom | ungesicherte Stromleiter und - quellen | Stromschlag (z.B. Umformer) | 4 |
| \rightarrow | → Mittelwert: Elektrischer Strom | | | 4 |

Tabelle E-1: Arbeitssystem: Betonierarbeiten einer WandscheibeBetriebsmittel: Rüttelbeton, Rüttelflasche und Umformer, Kübel, Pumpe, Schalung

| | Gefährdungsfaktoren | Gefahrenquelle Rüttelbeton | Gefährdung | Bewertung nach NOHL |
|---------------|-----------------------------|---|---|------------------------|
| 3 | Klima | Extreme Wetterphänomene infolge Klimaänderung | Verletzung, Verunglückung | 3 |
| | | Zugluft | Erkrankung | 1 |
| \rightarrow | Mittelwert: Klima | | | 2 |
| 4 | Physische Faktoren | Zwangshaltung | körperliche Schäden | 4 |
| | | Heben und Tragen | körperliche Schäden | 4 |
| \rightarrow | Mittelwert: Physische Fakt | oren | | 4 |
| 5 | Gefahrstoffe | Trennmittel der Schalung | Reizung der Haut und Augen | 2 |
| | | Beton | Reizung der Haut und Augen | 2 |
| \rightarrow | Mittelwert: Gefahrstoffe | | | 2 |
| 6 | Schall | Kreissäge, Tischsäge | Hörschaden, kurzfristiger Verlust des Gleichgewichtssinns | 4 |
| | | Pressluftarbeit (Schalung von Partikeln reinigen) | Hörschaden, kurzfristiger Verlust des Gleichgewichtssinns | 3 |
| | | Rüttelflasche und Elektromotor | Hörschaden, kurzfristiger Verlust des Gleichgewichtssinns | 4 |
| \rightarrow | Mittelwert: Schall | · | · | 4 |
| 7 | Mechanische Schwingungen | Rüttelflasche und Elektromotor | Hand-Arm-Schwingung | 4 |
| | | Betonierkübel | Ganzkörperschwingung | 3 |

| Ta Bet | Tabelle E-1: Arbeitssystem: Betonierarbeiten einer Wandscheibe Betriebsmittel: Rüttelbeton, Rüttelflasche und Umformer, Kübel, Pumpe, Schalung | | | | | |
|---------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|--|--|
| | Gefährdungsfaktoren | Gefahrenquelle Rüttelbeton | Gefährdung | Bewertung nach NOHL | | |
| | | Vibration des Betoniergerüstes | Fußgelenk-Schwingung | 1 | | |
| \rightarrow | 3 | | | | | |
| 8 | Psychische Faktoren | Arbeitsaufgaben und –beziehungen | Überforderung und Unterforderung | 1 | | |
| \rightarrow | → Mittelwert: Psychische Faktoren | | | | | |

Tabelle E-2: Auswertung Risikobeurteilung: Betoniervorgang F5-, F6-Betone und SVB

Г

| Ta Bet | oelle E-2: Arbeitssystem: Betonierarbeiten einer Wandscheibe riebsmittel: F5-, F6-Betone und SVB, Kübel, Pumpe, Schalung | | | | |
|---------------|---|---|---|----------------------|--|
| | Gefährdungsfaktoren | Gefahrenquelle F5, F6, SVB | Gefährdung | Maßzahl nach NOHL | |
| 1 | Mechanische Faktoren | glatte und blockierte Verkehrswege | stolpern, rutschen, fallen | 3 | |
| | | kippende, rollende und herabfallende Teile | erfasst/getroffen werden | 5 | |
| | | ungesicherte Absturzkante | Absturz | 4 | |
| \rightarrow | → Mittelwert: Mechanische Faktoren | | | 4 | |
| 2 | Elektrischer Strom | ungesicherte Stromleiter und - quellen | Stromschlag (geringer als F1 bis F4) | 2 | |
| \rightarrow | Mittelwert: Elektrischer St | rom | | 2 | |
| 3 | Klima | extreme Wetter- phänomene infolge Klimaänderung | Verletzung, Verunglückung | 3 | |

٦

| Tal Bet | belle E-2: Arbeitssystem: Betonierarbeiten einer Wandscheibe triebsmittel: F5-, F6-Betone und SVB, Kübel, Pumpe, Schalung | | | | |
|---------------|--|---|---|----------------------|--|
| | Gefährdungsfaktoren | Gefahrenquelle F5, F6, SVB | Gefährdung | Maßzahl nach NOHL | |
| | | Zugluft | Erkrankung | 1 | |
| \rightarrow | Mittelwert: Klima | | | 2 | |
| 4 | Physische Faktoren | Zwangshaltung | körperliche Schäden | 1 | |
| | | Heben und Tragen | körperliche Schäden | 3 | |
| \rightarrow | Mittelwert: Physische Fakt | toren | | 2 | |
| 5 | Gefahrstoffe | Trennmittel der Schalung | Reizung der Haut und Augen | 2 | |
| | | Beton | Reizung der Haut und Augen | 2 | |
| \rightarrow | Mittelwert: Gefahrstoffe | 2 | | | |
| 6 | Schall | Kreissäge, Tischsäge | Hörschaden, kurzfristiger Verlust des Gleichgewichtssinns | 4 | |
| | | Pressluftarbeit (Schalung von Partikeln reinigen) | Hörschaden, kurzfristiger Verlust des Gleichgewichtssinns | 2 | |
| \rightarrow | Mittelwert: Schall | | | 3 | |
| 7 | Mechanische Schwingungen | Betonierkübel | Ganzkörperschwingung | 3 | |
| | | Vibration des Betoniergerüstes | Fußgelenkschwingung | 1 | |
| \rightarrow | Mittelwert: Mechanische S | chwingungen | | 2 | |
| 8 | Psychische Faktoren | Arbeitsaufgaben und –beziehungen | Überforderung und Unterforderung | 3 | |
| \rightarrow | Mittelwert: Psychische Fal | 3 | | | |

Maßzahl 1-2: Risiko → gering:

Der Eintritt einer Verletzung oder Erkrankung ist nur wenig wahrscheinlich. Handlungsbedarf zur Risikoreduzierung nicht erforderlich

Maßzahl 3-4: Risiko → signifikant:

Der Eintritt einer Verletzung oder Erkrankung ist wahrscheinlich. Handlungsbedarf zur Risikoreduzierung ist angezeigt.

Maßzahl 5-7: Risiko → hoch: Der Eintritt einer Verletzung oder Erkrankung ist sehr wahrscheinlich. Handlungsbedarf zur Risikoreduzierung ist dringend erforderlich.



Bild E-12: Integrierte Basis-Maßzahlen für eine Risikobeurteilung beim Betoniervorgang

Auf Basis der Ergebnisse der Baustellenuntersuchungen, die in den Tabellen E-1 und E-2 dargestellt sind, wurden integrierte Basis-Maßzahlen der Risikobeurteilung bei Betonierarbeiten in einer Gegenüberstellung von Arbeitssystemen im Bereich der üblichen Rüttelbetone (F1 bis F4) und F5-, F6-Betone sowie SVB entwickelt, die in Abbildung E-12 dargestellt sind.

Die Gesetzgebung fordert eine entsprechende Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung. Eine verbindliche Form existiert nicht, so dass jedem Unternehmen ein individueller Spielraum für die Gestaltung dieser Dokumentation entsprechend den auftretenden Gefährdungen gegeben ist. In Bild E-13 ist das entwickelte Beispiel eines Datenblattes für einen mechanischen Gefährdungsfaktor (Sturzgefährdungen) dargestellt, welches zur praktischen Anwendung empfohlen werden kann.

| | Gefä | ährdungsermit | tlung | | | | | Mänge | 1 | | | |
|--|---------------------|-----------------------------------|---|-----------------------|--|-----------------|---------|--------|--------------|-------------------------|---------------|---|
| Gefährdungs-/ Belastungsfaktor | Gefahren- quelle | Bedingung | Gefährdung | Risiko (nach Nohl) | Maßnahmen | keine Mängel | Technik | Organ. | Verhalten MA | Mangel besitigen bis | Verantwortung | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Γ |
| Sturzgefährdungen (mechanische Gefährdungen) | Betoniergerüst | rutschen, stolpern, stürzen | mittlere bis schwere Verletzungen | 4 | Die Arbeitsplätze auf der Schalung bzw. Rüstung müssen gut zugänglich sein und einen festen Standplatz bei der Arbeit ermöglichen. Zugang zum hochgelegenen Arbeitsplatz über Treppenturm oder Treppenhäuser. Beseitigen von Hindernissen und/oder Verschmutzungen. Witterungseinflüsse beachten (z. B. Nässe, Frost). Bei schlechten Lichtverhältnissen für ausreichende Beleuchtung sorgen. Nach Auftrag des Betontrennmittels besonders die Rutschgefahr beachten. | | | | | | | |

Beton- und Stahlbetonarbeiten

Wand Stahlbeton herstellen, h=3,30 m, Rahmentafelschalung, Rüttelbeton

Bild E-13: Beispiel für das Datenblatt einer Gefährdungsbeurteilung

Es gilt grundsätzlich zu beachten:

Eine Gefährdungsbeurteilung muss immer den individuellen Randbedingungen der jeweiligen Bauaufgabe angepasst werden. Neben der Gefährdungsbeurteilung hat die Baustelle eine Montageanweisung anzufertigen.

E.4.2 Entwicklung von Empfehlungen zur Prozessgestaltung bei Betonierarbeiten -Ergebnisse

Wie bereits in Kapitel E.2.2 ausgeführt wurde, werden die Empfehlungen zur Prozessgestaltung für die Betonierarbeiten bei Einsatz von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz auf Basis einer Schwachstellenanalyse entwickelt.

Aufgrund der kurzen Projektphase und der aktuell geringen Nachfrage nach Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz aus der Bauwirtschaft konnte nur auf der Baustelle 2 (Hochbau, Bauen im Bestand, Frankfurt am Main) eine Arbeitszeitstudie im Zusammenhang mit dem Einsatz eines SVB durchgeführt werden. Das Ergebnis ist dadurch als Einzelwert aufzufassen. Zur Generierung eines Aufwandswertes bedarf es weiterer Zeitstudien. Auf der Baustelle 3 wurde der Betoniervorgang bei Einsatz eines Rüttelbetons untersucht.

Schwachstellenanalyse bei Einsatz eines SVB

Die Gruppenzeitaufnahme Nr. 1 (siehe Anlage E-1 und Anlage E-7) weist einen hohen Anteil an störungsbedingten und ablaufbedingten Unterbrechungen auf.

Die störungsbedingten Unterbrechungen sind im Wesentlichen auf den Defekt der Türaussparung in der Schalungskonstruktion während des Betoniervorgangs zurückzuführen. Das auf die Schalung genagelte Aussparungsteil konnte dem hohen Frischbetondruck nicht standhalten. Die Befestigungsanordnung und die Befestigungsmittel wurden analog einem Rüttelbeton umgesetzt (Erfahrungswert der Kolonne). Den veränderten Frischbetondruckverhältnissen wurde nicht Rechnung getragen, obwohl grob bekannt war (Lieferung der Druckmessdosen mit dem Schalungsmaterial), dass veränderte Randbedingungen, gegebenenfalls hoher Frischbetondruck, zu berücksichtigen sind.

Die ablaufbedingten Unterbrechungen werden auf die Vorgangsstufe "Warten auf Betonmischer" sowie die Vorgangsstufe "Betonierpausen zur Frischbetondruckregulierung" zurückgeführt. Aufwändige Prüfprozeduren des SVB im Betonwerk und die Tatsache, dass der Betonmischer nur bis etwa auf die Hälfte seines Ladevolumens bestückt werden konnte, begründen eine Verlängerung des Anlieferprozesses.

Für die Gruppenzeitaufnahme Gz 1 ist ein sehr hoher Quotient der Verteilzeit zur Grundzeit zu konstatieren.

Die Gruppenzeitaufnahme Gz 2 (siehe Anlage E-2) wurde mit derselben Kolonne wie die Gruppenzeitaufnahme Gz 1 durchgeführt. Hier wurden von der Kolonne aufgrund der Erfahrungen der Gruppenzeitaufnahme Gz 1 bewusst längere Vorgangsstufen "Betonierpausen zur Frischbetondruckregulierung" gewählt. Aufgrund der Erfahrungswerte blieben die "Störungsbedingten Unterbrechungen" aus.

Für die Prozessgestaltung gilt der Grundsatz, dass die Haupttätigkeiten die Wertschöpfung im Wesentlichen ausmachen und damit die weiteren Ablaufarten zu minimieren sind. Aus den Beobachtungen der Gruppenzeitaufnahmen Gz 1 und Gz 2 geht hervor, dass die Arbeitskräfteanzahl in der Kolonne überdimensioniert war. Der Einsatz einer geringeren Anzahl von Arbeitskräften hätte die Produktivität im betrachteten Prozess gesteigert.

Hieraus kristallisieren sich folgende Schwachstellen für die untersuchten Prozesse des Betoniervorgangs mit SVB aus:

- Zu hohe Arbeitskräfteanzahl in der Kolonne: Für den Betoniervorgang wurde vom ausführenden Bauunternehmen eine Kolonnenstärke eingesetzt, die für einen üblichen Rüttelbeton zutrifft. Die Potenziale der Reduktion wurden nicht ausgeschöpft.
- Mangelhafte Schalungskonstruktion: Die Schalungskonstruktion (Türaussparung) wurde nicht auf den höheren Frischbetondruck konzipiert. Die

Baustellenführungskräfte waren nicht in der Lage, diesen zu bestimmen oder einzuschätzen.

- Mangelhafte Überwachung des Frischbetondrucks: Zur Regulierung des Frischbetondrucks wurde die Betoniergeschwindigkeit nicht überwacht. Eventuell notwendige Betonierpausen wurden nicht respektiert.
- Mangelhafte Koordination im Liefer- und Verbrauchsrhythmus: Die Abruffristen des Frischbetons sowie die gesamte Lieferstruktur wurde mit dem Betonlieferanten nicht ausreichend abgestimmt und während des Betoniervorgangs unzureichend koordiniert.

Das Ergebnis verdeutlicht, dass nur geringe Erfahrungswerte in der Verarbeitung von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz im operativen Bereich der Bauindustrie vorhanden sind. Diese Erkenntnis wurde bereits im Zusammenhang mit der Gefährdungsbeurteilung (psychische Faktoren, s. Kapitel E.4.1) festgestellt. Weiterhin wird festgestellt, dass bei entsprechender Einarbeitung des Baustellenpersonals das Verhältnis von Grundzeit zu Verteilzeit günstiger wird. Die Verschwendung in den Prozessen wird reduziert.

Aufwandswerte

In der nachfolgenden Tabelle E-3 sind die Ergebnisse der Gruppenzeitaufnahmen des Betoniervorgangs auf der Baustelle 2 (Gruppenzeitaufnahme Gz 1 und Gz 2) und der Baustelle 3 (Gruppenzeitaufnahme Gz 3) zusammengefasst.

| Randbedingung | Gz 1 | Gz 2 | Gz 3 |
|--|----------------------------------|------------------------------|---|
| Werkstoff | SVB | SVB | Rüttelbeton |
| Förderart | mobile Betonpumpe | mobile Betonpumpe | Kran und Kübel |
| Höhe des Bauteils [m] | 4,83 | 4,83 | 2,50 |
| Länge des Bauteils [m] | ~9,00 | ~9,00 | 7,80 |
| Tiefe des Bauteils [cm] | 0,20 | 0,20 | 0,25 |
| Schalungskonstruktion | einhäuptig Trägerschalung | einhäuptig Trägerschalung | zweihäuptig Rahmenschalung |
| Ausbildung und Qualifikation der Mitarbeiter | mittel | mittel | sehr gut |
| Bauteil | Verkleidung Bestandswand | Verkleidung Bestandswand | Außenwand |
| Polier | Nicht erfasst | Nicht erfasst | Nicht erfasst |
| Pumpenoperator | Nicht erfasst | Nicht erfasst | - |
| Sonstiges | kein Erfahrungswert vorhanden | Einarbeitung aufgrund Gz1 | vergleichbare Außenwandabschnitte werden regelmäßig produziert |
| Aufwandswert [h/m ³] | 0,7 | 0,7 | 0,3 |

| Tabelle E-3 | Randbedingungen und Aufwandswerte beim Betoniervorgang Gz 1 bis |
|-------------|---|
| | Gz 3 |

Die Randbedingungen der Gruppenzeitaufnahmen Gz 1 bis Gz 3 weichen voneinander ab. Der Frischbeton in der Gruppenzeitaufnahme Gz 1 und Gz 2 wurde mit einem kontinuierlichen Verfahren gefördert. Dieses Verfahren unterstützt grundsätzlich hohe Förderleistungen im Zusammenhang mit dem gewählten Werkstoff. Dennoch ist ein höherer Aufwandswert gegenüber dem Einbau eines üblichen Rüttelbetons mit Kübel festzustellen. Dies ist auf die Erkenntnisse der Schwachstellenanalyse einerseits und den nachteiligen Einfluss zusätzlicher Randbedingung wie "Ausbildung und Qualifikation der Mitarbeiter" anderseits zurückzuführen. Die Aufnahmebögen sind den Anlagen E-7 bis E-10 dargestellt.

E.4.3 Entwicklung der Basis eines Datenbanksystems zur Dokumentation des Betoniervorgangs - Ergebnisse

Die entwickelte Basis eines Datenbanksystems zur Dokumentation des Betoniervorgangs erfasst die relevanten Prozessdaten hinsichtlich der zeitnahen Prozesssteuerung und einer verbesserten Qualitätssicherung zur langfristigen und nachvollziehbaren Sicherung des relevanten Datenbestandes (analog zu Kapitel E.2.3).

Die Entwicklung ist dreistufig aufgebaut und sieht eine gemeinsame Datenhaltung zwischen Lieferwerk, Baustelle und Prüfstelle vor.

Dem Betonlieferwerk wird die Möglichkeit gegeben, Produktionsdaten, Messprotokolle, Betonlisten im Datenbanksystem zu hinterlegen.

Es ist angedacht, über ein Schleusensystem auf der Baustelle die Betonlieferung durch Auslesung der Lieferscheinnummer respektive automatisiert durch Barcode oder RFID-Kennung anzunehmen und mittels von Sensoren einem Fördermittel zuzuweisen.

Im digitalen Berichtswesen der Baustelle wird ein Betoniertagebuch zur Erfassung der Prozessdaten der Baustelle implementiert. Die Lieferscheindaten jeder Betonlieferung dienen der Verfolgung und Dokumentation der durchgeführten Übernahmeprüfung (wie zum Beispiel das Ausbreitmaß) der angeordneten Nachbehandlung und der Prüfkörper. Über das Betoniertagebuch kann in Verknüpfung zu den weiteren Modulen des Berichtswesens der Baustelle der Leistungs- bzw. Einbauort festgehalten werden.

Die technischen Randbedingungen des Schalungssystems werden in einem Schalungserfassungssystem dokumentiert. Hier werden die Planunterlagen (Schalungsplanung und Schalungseinsatzplanung), Materiallisten, Berechnungen bezüglich der Tragfähigkeit sowie Bilddokumente, welche die Zustände der Schalungskonstruktion und der Schalungshaut darstellen, abgelegt. Insbesondere werden der maximal zulässige Frischbetondruck und die daraus resultierende maximal zulässige Steiggeschwindigkeit (Soll-Wert) erfasst.

Zur Erfassung des Einbauortes und der Steiggeschwindigkeit des Frischbetons ist die Anwendung modernster mobiler Technologien (Sensortechnik) sowie Bildverarbeitungssysteme angestrebt. Die Steiggeschwindigkeit des Frischbetons (Ist-Wert) kann alternativ über moderne Bildverarbeitungssysteme erfasst werden.

Das Controlling-Element liefert den Soll-Ist-Vergleich. Wird der Soll-Wert gegenüber dem zulässigen Ist-Wert überschritten, erfolgt eine unverzügliche Nachricht an das Baustellenführungspersonal. Somit wird die direkte Möglichkeit zur Intervention gegeben. Die betreffenden Prozesse auf der Baustelle werden beherrschbar.

Die entwickelte Basisstruktur ist in Bild E-14 dargestellt.

"Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz" Teilprojekt E – Technische Universität Darmstadt, Institut für Baubetrieb

| Betonlieferwerk | Ausgangsstoffe Prüfungen Lieferschein | Erfassun | Produktionsdaten Messprotokolle Einflussparameter nach DIN 18218 |
|---|--|---|--|
| Schleusensystem zur Annahme der Lieferfah Lieferschein Barcode bzw. | rzeuge RFID | Dat | Erstarrungsende t _e |
| Betonlieferung Betonlieferung | | | Soll-Ist-Vergleich |
| Information in the second | Menge (m/g): 8 Leferver Sortennumer: 27943508 [Transp Sortennumer: 27943508 [Transp MU Extent I*C1 Utf WU 20.2 23.0 SolDower (d) Profester (d) Roddshet(\u00ed) SolDower (d) Profester (d) Roddshet(\u00ed) Mu Extensionality Extensionality | Certait (%) Control of the tert of te | Soll-Werte für Schalung und Frischbeton Bauteil W23 Abfrage 1: Einbauort OK? |
| Schalung Schalelement Konstruktion Abmessungen | Lige Sandsicherheit R inigung X | ~ | Abfrage 2: Steiggeschwindigkeit OK? |
| Bauabschritt / Bautol Bauabschnitt W23 Bauabschnitt Festlegen Schalungserfassu | ungssystem | | Ist-Werte durch sensorische Erfassung Einbauort Steiggeschwindigkeit |

Bild E-14: Basisstruktur eines Datenbanksystems zur Dokumentation des Betoniervorgangs

E.4.4 Auswahlkriterien für geeignete Schalungen - Ergebnisse

In Kapitel E.2.4 erfolgten grundlegende Anmerkungen zur Auswahl von geeigneten Schalungen für eine definierte Bauaufgabe. Beim Einsatz von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz ist eine sehr gründliche schalungstechnische Arbeitsvorbereitung erforderlich. Hierzu gehört zunächst die Koordination aller Projektbeteiligten im Vorfeld der Planung und Bauausführung. Weitere ausgewählte Aspekte werden nachfolgend dargelegt:

- Entsprechend der Angaben in Kapitel E.4.3 ist der Liefer- und Verbrauchsrhythmus einschließlich des Frischbetondrucks kontinuierlich zu steuern.
- Bedingt durch die veränderte chemische Struktur von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz gegenüber Rüttelbetonen ist das System Frischbeton-Trennmittel-Schalungshaut bezüglich der Verträglichkeit der Werkstoffe zu prüfen.
- Die Schalung ist mit erhöhter Sorgfalt zu behandeln, da die Schalhautoberflächenstruktur detaillierter in der Betonfläche abgezeichnet wird.
- Die Auftriebssicherheit der gesamten Schalung ist zu überprüfen (gegebenenfalls Verankerung auf der Aufstandfläche vornehmen oder Ballast anordnen). Der Auftrieb ist insbesondere für geneigte Schalungen (Konter- und Deckelschalungen) sowie die Einbauteile (Aussparungen) von Bedeutung. Je nach Lastfall werden vertikale und horizontale Einwirkungskomponenten überlagert.
- Bei Aussparungskästen, Einbauteilen oder eingebauten Deckelschalungen sind die Befestigungselemente an der Hauptschalung nachzuweisen, damit sie beim Betonieren durch den wirkenden Auftrieb nicht verformt oder getrennt werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden an dieser Stelle deutliche Defizite in der Praxis festgestellt. Im Rahmen der Untersuchung auf der Baustelle 2 wurde beim Betoniervorgang mit SVB die Türaussparung herausgedrückt, so dass Frischbeton aus der Schalung ausgetreten ist. Reparaturversuche blieben ohne Erfolg. Der Schaden war erheblich. Die Befestigung der Türaussparung war nicht für den vorhandenen Frischbetondruck bemessen. Dieser Vorgang ist in Bild E-15 dargestellt.



Bild E-15: Schadensdokumentation auf der Baustelle 2: Nicht ausreichend bemessene Türaussparung (linke Seite: Frischbeton außerhalb der Schalung; rechte Seite: Reparaturversuch)

Aufbauend auf den Erfahrungswerten der Baustellenuntersuchungen sowie weiterer Überlegungen wurde die nachfolgende Check-Liste (s. Tabelle E-4)entwickelt, mit deren Hilfe die relevanten Aspekte der Auswahl von Schalungen abgedeckt werden sollen.

| Tabelle E-4 | |
|----------------------|--|
| Komplex | Kriterien und Prozesse |
| Bauteilanforderungen | Bauteilabmessungen Betonflächenanforderungen (Sichtbeton SB 1 bis SB 4 oder abweichend) Bauteiltoleranzen der Abmessungen: Bauzustand (z.B. DIN 18202) zzgl. der zeit- und lastabhängigen Verformungen Bauteiltoleranzen der Lage Arbeitsfugen Weitere Kriterien aus dem Bauvertrag |
| Schalungssystem | Festlegung = Objektabhängiges Schalungssystem: Individueller Schalelemententwurf auf Basis der Bauteilgeometrie, der Einwirkungen (Frischbetondruck!) und weiterer Randbedingungen. Tragfähigkeit variabel. |

| Tabelle E-4: Kriterien und Prozesse bei der Auswahl von | geeigneten | Schalungen |
|---|------------|------------|
|---|------------|------------|

| Tabelle E-4 | |
|----------------------------------|---|
| Komplex | Kriterien und Prozesse |
| (Fortsetzung) | Festlegung = Objektunabhängiges Schalungssystem: Industriell vorgefertigt. Tragfähigkeit limitiert, da durch die vorhandene Konstruktion vorgegeben. |
| Schalungskonstruktion | Bemessung vs Element aus dem Baukasten Sicherung gegen Auftrieb Schalelementgröße Schalelementraster Schalelementstöße Schalungsüberhöhung |
| Aussparungen/ Einbauteile | Bemessung unter Berücksichtigung von Frischbetondruck und Auftrieb Nachweis der Befestigungsmittel |
| Einbau Frischbeton | Einbau "von oben"Einbau über einen Einfüllstutzen |
| Schalungshaut | Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit (insbesondere im durchfeuchteten Zustand); bei Frischbetondruck ≥ 100 kN/m² gesonderter Nachweis Einsatzzahl Verträglichkeit mit Frischbeton und Trennmittel Bestimmung der Befestigungsmittel Fugenausbildung Handhabung: Kantenbehandlung, Vorbehandlung, Reinigung |
| Ankersystem | Bauphysikalische Anforderungen (Brandschutz, Feuchteschutz, Schallschutz, Strahlenschutz etc.) Bestimmung der Tragfähigkeit (Ankerdehnung) / Ankerraster Verschlussausbildung der Ankerstellen |
| Schal- und Betonierabschnitte | Anordnung / Ausbildung der ArbeitsfugenBestimmung der Betoneinfüllpunkte |
| Sicherheitselemente | Ausstattung der Schalungskonstruktion Aufbau- und Verwendungsanleitung Gefährdungsbeurteilung Montageanweisung |
| Schalungsplanung | Abstimmung Umfang und InhaltSchalungsmusterplan |
| Betontrennmittel | Auswahl des Betontrennmittels |

| Tabelle E-4 | |
|---------------------|--|
| Komplex | Kriterien und Prozesse |
| | – Auftragsart und -menge |
| Handhabung | – Reinigung |
| | – Wetterschutz |
| | – Ausschalen |
| | – Zwischenlagerung |
| | - Grundmontage/Demontage |
| Risiken | - Technische/sicherheitstechnische Risiken |
| | Ästhetische Risiken |
| | Ökonomische Risiken |
| | Ökologische Risiken |
| Kosten | – Lohnkosten |
| | Materialkosten / Optimierung Vorhaltemenge |
| | – Planungskosten |
| | – Überwachung Schalungsplanung / Schalungsleistung (s.g. |
| | Stoffkostenangebote) |
| | – Bereitstellungsgeräte |
| Bauzeit | – Aufwandswerte / Kolonnenstärke |
| | Technologische Abh |
| | Kapazitive Abhängigkeiten |
| Qualitätsmanagement | – Schalungsabnahme |
| | – Bemusterung |
| | Monitoring des Betoniervorgangs (s. Kapitel E.4.3) |

E.5 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Zusammenfassung

Das Teilprojekt E "Baubetriebliche Fragestellungen" innerhalb des Forschungsvorhabens "Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz" verfolgte vier Ziele:

- Entwicklung von praktischen Hilfen f
 ür die Anfertigung einer Gef
 ährdungsbeurteilung beim Betoniervorgang
- Empfehlungen f
 ür die Gestaltung der Prozesse auf der Baustelle mit dem Schwerpunkt im Bereich der Betonierarbeiten
- Entwicklung der Basis für ein Dokumentationssystem für den Betoniervorgang
- Auswahlkriterien für geeignete Schalungen.

Die Fragestellungen wurde auf der Grundlage von:

- empirischen Untersuchungen auf Baustellen (Baustelle 1: Hochhaus in Frankfurt am Main; Baustelle 2: Hochbau, Bauen im Bestand in Frankfurt am Main; Baustelle 3: Hochbau, Neubau, Verkaufszentrum in Metzingen) sowie im Rahmen des Großversuchs der Forschergruppe Teilprojekt D in Leipzig
- theoretischen Überlegungen auf Basis eigener Forschungsergebnisse
- theoretischen Überlegungen auf Basis des Literaturstudiums

bearbeitet.

Nachfolgend wird die Zielerreichung dargelegt.

Entwicklung von praktischen Hilfen für die Anfertigung einer Gefährdungsbeurteilung beim Betoniervorgang

Die rechtliche und technische Grundlage wurde erläutert sowie der Prozess der Anfertigung einer Gefährdungsbeurteilung dargestellt.

Im Rahmen der Baustellenversuche wurde für erfassbare Gefährdungsfaktoren (mechanische Faktoren, elektrischer Strom, Klima, physische Faktoren, Gefahrstoffe, Schall, mechanische Schwingungen, psychische Faktoren) eine Risikobeurteilung vorgenommen und auf Basis des Verfahrens nach Nohl quantifiziert (s. Tabelle E-1 und E-2). Dadurch konnte eine erste Übersicht der Gefährdungen gewonnen werden.

Die Gefährdungsfaktoren wurden für Rüttelbetone und Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz gegenübergestellt und in einer dafür entwickelten Grafik (s. Bild E-12) transparent dargelegt. Für die Anfertigung einer Gefährdungsbeurteilung wurde eine Arbeitshilfe in Form eines Dokumentationsblattes entwickelt (s. Bild E-13), welches in der Praxis sofort anwendbar ist.

Empfehlungen für die Gestaltung der Prozesse auf der Baustelle mit dem Schwerpunkt im Bereich der Betonierarbeiten

Die Empfehlungen für die Prozessgestaltung mit dem Schwerpunkt im Bereich der Betonierarbeiten wurden auf Basis einer Schwachstellenanalyse entwickelt, die im Zuge von Baustelleuntersuchungen angefertigt wurde.

Es wurden Defizite in der Baupraxis bezüglich der Anwendung von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz festgestellt. Diese sind im Einzelnen:

- Zu hohe Arbeitskräfteanzahl in der Kolonne: Die Potenziale der Reduktion der Mannschaftsstärke beim Betoniervorgang mit SVB werden in der Baupraxis nicht ausgeschöpft. Dieses haben die ermittelten Aufwandswerte bestätigt (s. Tabelle E-3).
- Mangelhafte Schalungskonstruktion: Die Schalungskonstruktionen werden nicht auf den realen Frischbetondruck auf der Baustelle ausgelegt.
- Mangelhafte Überwachung der Betoniergeschwindigkeit: Die Betoniergeschwindigkeit wird von den Baustellenführungskräften und verantwortlichen Vorarbeitern nicht regelmäßig überwacht.
- Mangelhafte Koordination im Liefer- und Verbrauchsrhythmus: Die Abruffristen des Frischbetons sowie die gesamte Lieferstruktur werden mit dem Betonlieferanten ungenügend abgestimmt.

Diese ermittelten Defizite führen zu Qualitätsproblemen sowie Konfliktsituationen in den Projektorganisationen. Bei der Prozessgestaltung sind sie unbedingt zu eliminieren.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Ursache für die Defizite zum Teil in fehlenden Erfahrungswerten im Umgang mit den untersuchten Betonen begründet ist.

Entwicklung der Basis für ein Dokumentationssystem für den Betoniervorgang

Für den bedeutenden Vorgang der Dokumentation des komplexen Betoniervorgangs wurde eine Basisstruktur eines Datenbanksystems entwickelt. Einbezogen sind darin mindestens das Betonlieferwerk, die Überwachungsstelle, der Schalungslieferant, das Bauunternehmen sowie der Planer. Die Besonderheit dieser Struktur besteht in der Durchführung eines permanenten Soll-Ist-Vergleiches verschiedener Größen. Exponiert wurden die Werte "Betoniergeschwindigkeit" sowie "Einbauort" betrachtet. Die am Institut für Baubetrieb entwickelten und aktuell in der Entwicklung befindlichen polysensoralen Systeme (unter anderem Bildverarbeitungssysteme) zeigen das Potenzial, zuverlässig und zeitnah die relevanten Ist-Daten zu liefern. Implementierte Controlling-Elemente sollen den Baustellenführungskräften bei unzulässigen Abweichungen unverzüglich entsprechende Warnnachrichten übermitteln, damit eine Prozesssteuerung rechtzeitig erfolgt. Die Basisstruktur ist in Bild E-14 dargestellt.

Auswahlkriterien für geeignete Schalungen

Beim Einsatz von Hochleistungsbetonen mit fließfähiger Konsistenz sind besondere Anforderungen an die Prozessplanung (Arbeitsvorbereitung) und Prozessüberwachung zu stellen. Hierzu gehört die Auswahl von geeigneten Schalungen. Dieser Auswahlprozess ist komplex. Aufbauend auf den Erfahrungswerten der Baustellenuntersuchungen sowie auf Basis weiterer Überlegungen wurde eine Check-Liste (s. Tabelle E-4) entwickelt, in der Kriterien und Prozesse bei der Auswahl von geeigneten Schalungen zusammengefasst wurden. Diese Angaben können als Eingangsgrößen im Rahmen von standardisierten Vergleichsverfahren Anwendung finden.

Zusammenfassend wird konstatiert, dass die Ziele des Teilprojektes E "Baubetriebliche Fragestellungen" erreicht wurden.

Weiterer Forschungsbedarf

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten nicht alle relevanten baubetrieblichen Fragestellungen der Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz beantwortet werden. Weiterer Forschungsbedarf wird in folgenden Punkten gesehen:

- Im Rahmen des Forschungsprojektes konnten nicht alle Gefährdungsfaktoren innerhalb der Gefährdungsbeurteilung in Bezug auf ihre Risikobeurteilung untersucht werden. Gefährdungsfaktoren wie "Kalte und heiße Medien" oder "Strahlung" sollten ergänzend untersucht und in den Prozessvergleich einbezogen werden.
- Die erarbeiteten Arbeitshilfen zur Anfertigung einer Gefährdungsbeurteilung bei Betonierarbeiten sollten um weitere Vorgänge ergänzt und in eine komplexe Struktur überführt werden. Somit könnte eine Muster-Gefährdungsbeurteilung für bestimmte Bereiche der Beton- und Stahlbetonarbeiten kreiert werden. Auf dieser Grundlage wird den Bauunternehmen ein effizientes und effektives Werkzeug zur Verfügung gestellt, welches die Ableitung von individuellen Gefährdungsbeurteilungen für die konkreten Projekte ermöglichen wird.
- Die Arbeitshilfen zur Anfertigung einer Gefährdungsbeurteilung wurden für den Bereich Hochbau angefertigt. Nicht untersucht wurde der Bereich Tiefbau, der in Bezug auf die Arbeitssicherheit sehr anspruchsvoll ist.

- Für den Bereich der Prozessgestaltung sollten ergänzende Arbeitszeitstudien im Anwendungsbereich der Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz durchgeführt werden. Erst wenn statistisch ausreichend gefestigte Aufwandswerte vorliegen, wird ein substantiierter Vergleich mit Rüttelbetonen möglich. Hier interessiert unter anderem der Zusammenhang zwischen den erreichbaren Aufwandswerten und den Betoniergeschwindigkeiten.
- Der Untersuchungsgegenstand sollte um die Komponente des Sichtbetons ergänzt werden, dessen Herstellung durch die Betoniertechnik maßgeblich beeinflusst wird.
- Im Bereich der Auswahl von geeigneten Schalungen ist ein Quantifizierungsverfahren zu entwickeln, welches mithilfe von Modellgleichungen die Entscheidungen unterstützt.
- Im Bereich der Datenbank zur Dokumentation des Betoniervorgangs sind verschiedene Sensoren zu untersuchen, damit die Ist-Werte (Daten) f
 ür die dargelegten Soll-Ist-Vergleiche solide erhoben werden.

E.6 Literaturverzeichnis

- [E-1] Huth, J.: Baubetriebliche Analyse von Selbstverdichtendem Beton. Dissertation, Institut f
 ür Baubetrieb, TU Darmstadt, Mensch & Buch Verlag, 2005
- [E-2] Motzko, C.: Baubetriebliche Aspekte beim Bau turmartiger Bauwerke

In: Betonkalender 2006, Band 1, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2006

[E-3] Hertle, R.; Motzko, C.: Gerüstbau

In: Betonkalender 2007, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2007

- [E-4] Empfehlungen zur Anfertigung einer Gefährdungsbeurteilung bei der Anwendung von Schalungen, Güteschutzverband Betonschalungen e.V., Ratingen/Darmstadt, 2007
- [E-5] Steding, R.: Gefährdungsbeurteilung aus rechtlicher Sicht, GSV-TUD-Fachtagung "Gefährdungsbeurteilung in der Praxis", Darmstadt, 2008
- [E-6] Motzko, C.: Arbeitssicherheit im Bauwesen in der Bundesrepublik Deutschland, Summer School Tongji University, 2008
- [E-7] Goldenberg, I.: Optimierung von Supply Chain Prozessen in der Bauwirtschaft durch mobile Technologien und Applikationen. Dissertation, Institut f
 ür Baubetrieb, TU Darmstadt, Mensch & Buch Verlag, 2005
- [E-8] Stanke, G.: Prüfung und Bewertung von Sichtbeton-Oberflächenqualitäten mit

optoelektronischen Bildanalysen. 15. Kasseler Baubetriebsseminar Schalungstechnik, 2005, ISSN 1614-6190

[E-9] Motzko, C., Elsebach, J., Maffini, S.:

Digital media based documentation, visualisation and supervision of construction process

International Conference on Adaptability in Design and Construction, Eindhoven, 2006, ISBN 10: 90-72152-03-4 (ISBN 13: 978-90-72152-03-9)

[E-10] Neue Entwicklungen im Bereich der Bildinformationssysteme. In: Festschrift anlässlich der Vollendung des 65. Lebensjahres von Prof. Dr.-Ing. habil. Harald Schlemmer. Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie, Technische Universität Darmstadt, 2007. ISBN 978-3-935631-16-7

[E-11] Schmitt, R.: Die Schalungstechnik, Ernst & Sohn, 2001

[E-12] Hofstadler, C.: Schalarbeiten. Manuskript, 2008

[E-13] Motzko, C.: Ein Verfahren zur ganzheitlichen Erfassung und rechnergestützten Einsatzplanung moderner Schalungssysteme, VDI Verlag, Düsseldorf, 1990

[E-14] DIN 32835-1: Technische Produktdokumentation – Dokumentation für das Facility Management – Teil1: Begriffe und Methodik, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2007-01

[E-15] DIN-Fachbericht 151: Technische Produktdokumentation – Dokumentation für das Facility Management – Baudokumentation, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2007-01

[E-16] Elsebach, J.: Bauwerksinformationsmodelle mit vollsphärischen Fotografien, Dissertation, Institut für Baubetrieb, Technische Universität Darmstadt, 2008

[E-17] Pflug, C.: 4D-Modellierung mit orientierten Bildaufnahmen zur Bauprozesssteuerung, Dissertation, Institut für Baubetrieb, Technische Universität Darmstadt, 2008 (in Vorbereitung)

E.7 Danksagung

Die Verfasser des Teilprojektes E "Baubetriebliche Fragestellungen" danken zunächst dem Hauptförderer dieses Forschungsvorhabens, der Forschungsinitiative "Zukunft Bau" des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung sowie dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn.

Weiterhin gilt der Dank dem Güteschutzverband Betonschalungen e.V. für die großzügige Förderung mit Geld- und Sachmitteln.

Der Dank der Verfasser gilt ebenso den Bauunternehmen Ed. Züblin AG sowie Johannes KellerBau GmbH & Co. KG für die Möglichkeit der Durchführung von Feldstudien.

Die Verfasser bedanken sich bei den Forschungspartnern für die konstruktive Zusammenarbeit, insbesondere bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl Alexander Graubner sowie Herrn Dr.-Ing. Tilo Proske für die Federführung des Forschungsprojektes.

Darmstadt, 01. Oktober 2008

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko

Dipl.-Ing. Erik Boska

E.8 Anlagen

Anlage E-1: Auswertung Aufwandswert Gz1 (Baustelle 2: Hochbau, Bauen im Bestand in Frankfurt am Main)

| | | | | | | 1 | |
|--------------------|---------------------|-------------------|-------|-----------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| Art der Arbeit: | Wand mits | SVB beto | onier | en: Höhe | : 4,83 m | | |
| Arbeitsgegenstand: | Trägerschal | | chalp | lan gen | เต้b Bild E-9 | | |
| Datum: | 5. Jun | í 2008 | | | | | |
| | | | | | | | |
| Gruppenzeit | aufnahme für | Teilvorgä | nge | | Summe Grundzeit | Summe Mengen | Grundzeit/Einheit |
| Au | swenungsbog | jen | | | Gje | je | t _e je |
| | | | | | | | Teil- |
| Tei | vorgang | | | Einheit | Teilvorgang Min | Teil- vorgang | vorgang Min |
| | 1 | | | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | | | | |
| Beton | einbanen | | | MU3 | 56,0 | 12,00 | 4,67 |
| | | | Sum | nme t _{MH} : | 56,0 | | |
| | | | | | | | |
| €ínfüllhöhe kon | ntrollíeren v | /on ober | ι | | 52,0 | | |
| €ínfüllhöhe kon | trollíeren vi | on unte | и | | 52,0 | | |
| Schlauc | h umsetzen | ւ | | mal | 13,0 | 5,00 | 2,60 |
| | | | Sum | nme t _{MN} : | 1.23,0 | = | 68.7 % |
| | | | | | | | |
| Zusämmenstell | en von Gru | ndzeíte | :n | тиз | 179,0 | 13,50 | 13,26 |
| | | | | | | | |
| | Zeit | ten aus: | serh | alb der | Grundzeiten | | |
| | | | | | | ∑ in Min | Mittelw. in % |
| störungsbed. Und | terbrechen 🛛 | t _{MS} | | | | 144,0 | 80,4 |
| fehlleistungen a | usbessern Σ | I t _{mz} | | | | 0,0 | 0,0 |
| persönliche Vert | eilzeiten Σ | t _{MP} | | | | 19,0 | 10,6 |
| ablangbed. Unter | brechung Σ | Etma | | | | 240,0 | 134,1 |
| €rholzeít | en ∑t _{Me} | | | | | 12,0 | 6,7- |
| | | | | | | | 231,8% |
| | | | | | | | |
| | Stundenaufi | wandsw | verte | t, in ve | rsch. Bezugs | größen | |
| | | | | | | _ | |
| Tätig | keit | | tg | Einh. | Zuschläge | Stundenaufwar | ndswert |
| | | | | | | | |
| Wand betonieren | | | 0,2 | he ³ | 0,5 | 0,7 | n/m³ |
| 13,26 / 60 = | 0,237~0,2 | 22 | | | | | |

Anlage E-2: Auswertung Aufwandswert Gz2 (Baustelle 2: Hochbau, Bauen im Bestand in Frankfurt am Main)

| Art der Arbeit: | Wand mits | SVB beti | onier | en; Höhe | : 4,83 m | | |
|--------------------|------------------------------|-------------------|-------|-----------------------|----------------------|---------------|--------------------|
| Arbeitsgegenstand: | Trägerschal | | chalp | lan gen | เต้ป์ Bild 5-11 | | |
| Datum: | 17 [.] .Jui | rí 2008 | | | | | |
| | | | | | | | |
| | 6 I 67 | - 1 | | | Summe | | |
| Gruppenzeit | autnahme tür swertungshor | l eilvorgä 1en | nge | | Grundzeit | Summe Mengen | Grundzeit/Einheit |
| | sweitungsboi | Jen | | | Gje | je | t _g je |
| Таі | luoraona | | | | T _ih | T-il | Teil- |
| | lvorgang | | | Einheit | Min | vorgang | Min |
| | 1 | | | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | | | | |
| Beton | . einbauen | | | м₃ | | | |
| | | | | | 122,0 | 10,50 | 11,62 |
| | | | Sun | nme t _{MH} : | 122,0 | | |
| | | | | | | | |
| €ínfüllhöhe kor | ntrollíeren v | /on ober | ι | | 8 7 ,0 | | |
| €ínfüllhöhe kon | trollíeren V | on unte | и | | 0,0 | | |
| Schlauc | h umsetzer | ι | mal | 19,0 | 8,00 | 2,38 | |
| | | | Sun | nme t _{MN} : | 106,0 | = | 46,5 % |
| | | | | | | | |
| Zusammenstell | en von Gru | ndzeite | :n | м₃ | 228,0 | 10,50 | 21,71 |
| | | | | | | | |
| | Zeit | ten aus | serh | alb der | Grundzeiten | | |
| | | | | | | | b ditt = 1, |
| | | | | | | ∑ in Min | in % |
| störnngsbed. Un | terbrechen 🛛 | t _{MS} | | | | 0,0 | 0,0 |
| fehlleistungen ai | usbessern Σ | I t _{MZ} | | | | 0,0 | 0,0 |
| persönliche Vert | eilzeiten Σ | t _{MP} | | | | 0,0 | 0,0 |
| ablangbed. Unter | brechung Σ | Etma | | | | 154,0 | 67,5 |
| €rholzeít | en Σ t _{me} | | | | | 2,0 | 0.9 |
| | | | | | | | 68,4 % |
| | | | | | | | |
| | | Stund | enau | fwands | werte t _e | | |
| | | | | | | | |
| Tätig | ıkeit | | tg | Einh. | Zuschläge | Stundenaufwar | ndswert |
| | | | | | _ | | |
| Wand betonieren | | | 0,4 | he3 | 0,3 | 0,7 | n/m³ |
| 22/60 | = 0,36 | | | | | | |

Anlage E-3: Auswertung Aufwandswert Gz3 (Baustelle 3: Hochbau, Neubau, Verkaufszentrum in Metzingen)

| Art der Arbeit: | Wand mit I | NB betov | vieren | v: Höhes | 2,40 m | | |
|--------------------|-----------------------------|--------------------|--------|-----------------------|--------------------|---------------|-------------------|
| Arbeitsgegenstand: | Trägerschal | lung, S | chalp | lan gen | läb Anlagen E | -6 | |
| Datum: | 27. Ju | lí 2008 | | | | | |
| | | | | | | | |
| Gruppenzeit | aufnahme für | Teilvorgä | nge | | Summe Grundzeit | Summe Mengen | Grundzeit/Einheit |
| Au | swertungsbog | gen | | | Gje | je | t _g je |
| Tei | lvorgang | | | — , , | Teilvorgang | Teil- | Teil- vorgang |
| | 1 | | | Einheit 2 | Min | vorgang 4 | Min |
| | | | | - | | | U |
| Kübel | entleeren | | | тз | 23,0 | 6,00 | 3,83 |
| Beton | verdichten | | | тз | 53.5 | 6.00 | 8.82 |
| | | | Sum | i motuu: | | 0,00 | <u> </u> |
| | | | Jun | IIIC IMH. | 84,5 | | |
| | | | | min | 0,0 | | |
| | | | Sum | nme t _{MN} : | 0,0 | = | 0,0 % |
| | | | | | | | |
| Zusammenstell | en von Gru | ndzeite | :n | тз | 82,5 | 6,00 | 13,74 |
| | | | | | | | |
| | Zeit | ten aus | serha | alb der | Grundzeiten | | |
| | | | | | | ∑ in Min | Mittelw. in % |
| störnngsbed. Un | terbrechen 🛛 | t _{MS} | | | | 0,0 | 0,0 |
| fehlleistungen a | usbessern X | E t _{mz.} | | | | 0,0 | 0,0 |
| persönliche Vert | eilzeiten Σ | , t _{mp} | | | | 0,0 | 0,0 |
| ablangbed. Unter | brechung Σ | Etma | | | | 29,8 | 36,1 |
| €rholzeít | en Σ t _{Me} | | | | | 0,0 | 0,0 |
| | | | | | | | 36,1 % |
| | | | | | | | |
| | Stundenauf | wandsv | verte | t _e in ve | rsch. Bezugs | größen | |
| | | | | | | | |
| Tätig | lkeit | | tg | Einh. | Zuschläge | Stundenaufwar | ndswert |
| | | | | | | | |
| Wand betonieren | | | 0,2 | hu3 | 0,1 | 0,3 | n/m³ |
| 13,74 / 60 = | 0,229 ~ 0,2 | 23 | | | | | |

Anlage E-4: Auswertung Aufwandswert Gz4 (Großversuch Technische Universität München/Universität Leipzig)

| Art der Arbeit: | Wand mit SV | B betoní | eren | v: Höhe | :2,7-0 m | | |
|--------------------|-----------------------------------|-----------|------|----------------------|----------------------|---------------|-------------------|
| Arbeitsgegenstand: | Rahmenschalu | kng, ger | uäb | ANLA | 36 | | |
| Datum: | Э. August | 2008 | | | | | |
| | | | | | | | |
| Gruppenzeit | aufnahme für Tei | lvorgänge | Э | | Summe Grundzeit | Summe Mengen | Grundzeit/Einheit |
| Au | swertungsbogen | | | | Gje | je | t _e je |
| Tei | lvorgang | | | | Teilvorgang | Teil- | Teil- vorgang |
| | | | E | Einheit | Min | vorgang | Min |
| | 1 | | _ | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | - | | | | |
| Beton | , einbauen | | V | МЗ | 24,0 | 5,83 | 4,12 |
| | | S | umn | ne t _{MH} : | 24,0 | | |
| | | | | | | | |
| €ínfüllhöhe kon | utrollíeren von | i oben | | | 0,0 | | |
| €ínfüllhöhe kon | trollíeren von | unten | | | 0,0 | | |
| Schlauc | h umsetzen | | | mal | 0,0 | 0,00 | 0,00 |
| | | S | umn | ne t _{MN} : | 0,0 | = | 0,0 % |
| | | | | | | | |
| Zusammenstell | en von Grund | lzeíten | V | ИЗ | 24,0 | 5,83 | 4,12 |
| | | | | | | | |
| | Zeiten | n aussel | rhal | lb der | Grundzeiten | | |
| | | | | | | ∑ in Min | Mittelw. in % |
| störungsbed. Un | terbrechen∑t, | MS | | | | 0,0 | 0,0 |
| fehlleistungen a | usbessern Σ t, | wz. | | | | 0,0 | 0,0 |
| persönliche vert | eilzeiten Σ t _m | (P | | | | 0,0 | 0,0 |
| ablangbed. Unter | brechung Σ t, | щ | | | | 0,0 | 0,0 |
| €rholzeít | en Σt_{ME} | | | | | 0,0 | 0,0 |
| | | | | | | | 0,0 % |
| | | | | | | | |
| | S | tunden | aufv | wands | werte t _e | | |
| | | | | | | | |
| Tätig | ıkeit | tg | E | Einh. | Zuschläge | Stundenaufwar | ndswert |
| | | | | | | | |
| Wand betonieren | | 0, | 1 | hu3 | 0,0 | 0,1 | 1/m³ |
| 4,12/60 = | 0,068 ~ 0,1 | | | | | | |

Anlage E-5: Arbeitsablaufbeschreibung Außenwand Baustelle 3 (Hochbau, Neubau, Verkaufszentrum in Metzingen)

| Arbeitsablaufbeschreibung Allgemeine Angaben Bezeichnung der Arbeit: Betonieren der Aussenwand in Achse 08 / 1-K Beobachtung Datum: 24. Juli 2008 Dauer: von: 16.45 uhr bis 17.25 uhr ~ 40 Minuten Erstellte Menge im beobachteten Zeitraum: 6,00 m³ Beton Beschreibung des Arbeitssystems 1. Arbeitsaufgabe: Fördern des Frischbetons mit Betonierkübel 2. Eingabe: 1. Arbeitsaufgabe: fertiggestellte Schalung für einen Aussenwandabschnitt; Länge ca. 7,80 lfdm 3. Ausgabe: betonierte Sichtbetonwand 4. Betriebsmittel: - 1 Kran inkl. Betonkübel (1000 l) - Schalungssystem gemäß Anlage - Betonmischfahrzeuge Kleingeräte: - 2 Innenrüttler | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|---------------|---|---------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Allgemeine Angaben | | | | | | | | | | | | | |
| Bezeichnung der Arbei | t: | Betonie | eren der Aussenwand í | n Achse 08 / I-K | | | | | | | | | |
| Beobachtung | Datum: | | 24. Julí 2008 | | | | | | | | | | |
| | Dauer: | von: 16. | 45 Uhr bís 17.25 Uhr | ~ 40 Mínuten | | | | | | | | | |
| Erstellte Menge im beo Zeitraum: | bachtete | en | 6,00 m³ E | seton | | | | | | | | | |
| Beschreibung des Arb | eitssyste | e <u>ms</u> | | | | | | | | | | | |
| 1. Arbeitsaufgabe: | | Förder | Betoníeren mít Rütt n des Fríschbetons mí | elbeton, t Betoníerkübel | | | | | | | | | |
| <u>2. Eingabe:</u> | | fe Ausser | rtíggestellte Schalung wandabschnítt; Läng | g für eínen 1e ca. 7,80 lfdm | | | | | | | | | |
| <u>3. Ausgabe:</u> | | | betoníerte Síchtbeto | nwand | | | | | | | | | |
| 4. Betriebsmittel: | | | | | | | | | | | | | |
| Großgeräte: | - 1 Kran | ínkl. Bi | etonkübel (1000 l) | | | | | | | | | | |
| | - Schalu | ingssyst | em gemäß Anlage: | | | | | | | | | | |
| | - Betonn | níschfah | rzeuge | | | | | | | | | | |
| Kleingeräte: | - 2 Innei | nrüttler | | | | | | | | | | | |
| 5.Menschen: | | | | | | | | | | | | | |
| - 1 Políer zur Kontrolle a | der gesan | nten Arb | eítsaufgabe (nícht gev | verblích tätíg) | | | | | | | | | |
| - 1 Vorarbeiter -> Entlee | iren des E | setonkül | pels | | | | | | | | | | |
| - 2 Hílfskräfte -> Verdí | chten des | Betons | | | | | | | | | | | |
| 6. soziale I Imwelteinflü | 880 | | | | | | | | | | | | |
| - die beteiligten Arbeitsk | eräfte hal | i oen arob | e Erfahrungswerte in 1 | der Erstellung | | | | | | | | | |
| von Sichtbetonbauteiler | L | 5 | , 5 | 5 | | | | | | | | | |



Anlage E-6: Arbeitsablauf Außenwand Baustelle 3 (Hochbau, Neubau, Verkaufszentrum in Metzingen)

| | Baustell | le 2: Bauen im Bestand in Frankfurt am Main | | | | | | | | | | | | | Aι | ıfna | hme | e N | r. 1 | | | | В | latt | Nr. | 1\ | /on | 7 | | | | Be | əgir | וח: נ | 08. | 05 1 | лhr | | | | | | | | | |
|--------|------------------------|---|-----|--------------|------|---|---|-----|-----|----|----|----|-----|-----|------------|--------|--------|-----|------|----|-----------|-------|-----|--------|-----|-------|------------|-----|------------|-----|------|----|------|-------|-----|------|-----------------|-----------|---------------|---------------|-----|----|-----|-----|----|------------------|
| | Teilvorgang | | | Mir | nute | | | Σti | L | Σt | | | Min | ute | _1 | Σt | i | L | Σt | | Ν | /linu | ite | т. | Σt | i L | 5 | t | . т | Mir | nute |) | - 5 | ti | | Σt | | | Min | ute | | 5 | i | L | Σt | t _{res} |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 2 | | 2. | 1 | 2 | 3 | 4 | 56 | 5 | | _ | 2. | 1 | 2 | 3 | 4 5 | 56 | 2 | | 12 | . , | 1 2 | 3 | 4 | 5 | 6 4 | | _ | 2. | | 2 | 3 | 4 | 56 | 5 | _ | _ | 2. | ges |
| | Arbeiter: | 8: | 05 | | | _ | | _ | | | 8: | 11 | | _ | _ | | | | | 8: | 17 | _ | _ | - | | - | - | 8 | :23 | - | | | - | _ | | | 8:2 | 29 | \rightarrow | \rightarrow | + | _ | _ | | | |
| Bet | on einbauen | 1 | 1 | 1 | | | | 3 | 100 | 3 | | | 1 | | 1 1 | . 3 | 3 | 100 | 3 | | | | | | C | 10 | 2 | 0 1 | 1 | 1 | | | | 3 1 | .00 | 3 | \$ | | | | | C | > : | 100 | 0 | .9 |
| Εín | ıfüllhöhe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | \square | \square | | | | | | | |
| kov | ntrollíeren von oben | 1 | 1 | 1 | | | | 3 | 100 | 3 | | | 1 | 1 | 1 1 | . 4 | L | 100 | 4 | | | 1 | 1 1 | L | 3 | 10 | 5 | 3 1 | 1 | | | | | 2 1 | .00 | 2 | 2 | | | | | C | > : | 100 | 0 | 12 |
| Eín | füllhöhe kontrollíeren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| von | , unten | 1 | 1 | 1 | | | | 3 | 100 | 3 | | | 1 | 1 | 1 1 | . 4 | L | 100 | 4 | | | 1 | 1 | 1 | 3 | 10 | 5 | 3 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 1 | .00 | 6 | , 1 | | Ц | | | : | L : | 100 | 1 | 17 |
| Sch | nlauch umsetzen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | 2 | | 1 | 2 | 100 | 2 | 1 | 1 | | | | 2 | 2 10 | 2 | 2 | | | | | | 0 1 | .00 | 0 |) | | | | | C | > : | 100 | 0 | 4 |
| Wa | irten auf | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | П | | | | | | | | |
| Bet | onmíscher | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | C | > | 100 | 0 | | | | | | C | 10 | 2 | 0 | | | | | | 0 1 | .00 | 0 | , | 3 | 3 | 3 | 3 3 | 13 | 5 : | 100 | 15 | 15 |
| Bet | oníerpause zur | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Dri | ickregulíerung | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | C | > | 100 | 0 | | | | | | C | 100 | 2 | 0 | | | | | | 0 1 | .00 | 0 | , | | | | | C | > : | 100 | 0 | 0 |
| Wa | irten auf Pumpe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| befi | üllen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | C | > | 100 | 0 | | | | | | C | 10 | 2 | 0 | | | | | | 0 1 | .00 | 0 |) | | | | | C |) : | 100 | 0 | 0 |
| Wa | irten auf Schlauch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ит | setzen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | 2 | | 2 | 2 | 100 | 2 | 2 | 2 | | | | 4 | 10 | <u>э</u> . | 4 | | | | | | 0 1 | .00 | 0 | | \square | Ц | | | C |) : | 100 | 0 | 6 |
| Erb | iolen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | C | > | 100 | 0 | | | 1: | 2 1 | 1 2 | e | , 10 | 0 | 6 | | | | 3 | 3 | 6 1 | .00 | 6 | 2 | | | | | C | > : | 100 | 0 | 12 |
| | | <- | 0,0 | 0 0 n | n³ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 4, | 5 m | ³ -> | | | | | | | | | |
| dzei | Mensch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Г | Π | Π | Т | | | | | | |
| Brun | Schalung | T | F | | Η | 1 | | 1 | | | l | Π | | 1 | \uparrow | \top | T | | | | \square | ╈ | | \top | | | \uparrow | T | \uparrow | Π | | ╈ | ╈ | | | | Г | П | Π | 1 | 1 | T | Τ | | | |
| er | reparíeren | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | C | | 100 | 0 | | | | | | C | 10 | 2 | 0 | | | | | | 0 1 | .00 | 0 | | \square | Ц | \square | | C |) : | 100 | 0 | 0 |
| halb d | Pumpe verstopft | | | | N) | ß | 3 | 9 | 100 | 9 | 3 | 3 | | | | G | | 100 | 6 | | | | | | C | 10 | 0 | 0 | | | | | | 0 1 | .00 | 0 |) | | | | | C | > : | 100 | 0 | 15 |
| Außei | MP | | | | | T | | 0 | 100 | 0 | | Π | | T | | 0 | , , | 100 | 0 | 1 | 1 | | T | | 2 | 2 100 | 2 | 2 | | 1 | 2 | | | 3 1 | .00 | 3 | 2 | | | | | | 2 : | 100 | 2 | 7 |

Anlage E-7: Gruppenzeitaufnahme Gz 1

| Baustell | le 2: Bauen im Bestand in Frankfurt am Main Au | | | | | | | | | | | | | | ufn | ahn | ne N | Vr. 1 | | | | BI | att N | ۱r. ۵ | 2 V0 | n j | Ŧ | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------------|-----|------|---|---|-----|-----|----|-----|------------|------|--------|---|-----|-----|------|--------------|------|-----|-----|-----|-------|-------|------|-----|----------------|-------|-----|---|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----------|---|-----|----|-----|----|------------------|
| Teilvorgang | 1 | Гэ | Mir | nute | 5 | 6 | ∑ti | L | Σt | 1 | M | inut | e F | 6 | ∑ti | L | Σ | t | 11.0 | Min | ute | 5 6 | Σt | i L | Σ | t 1 | N | /linu | te | | ∑ti | L | Σ | t – | | Mir | nute | ; | Σ | ti | L | Σt | t _{ges} |
| Arbeiter: | ۱ 8۰ | <u>2</u> 35 | ა | 4 | э | 0 | - | | | 8·4 | <u>- 1</u> | 3 4 | 5 | 0 | | | ┢ | 8 | ·47 | 3 | 4 | 5 0 | 2 | | - | 8. | <u>-</u> 53 | 3 | 4 3 | 0 | | | + | 8 | ·59 | . 3 | 4 | 5 | 0 | _ | | | - |
| Beton einbauen | 0. | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | T | | | 0 | 100 |) (| 0 | | Γ | | | C | 100 | | > | | T | | | 0 | 100 | | 2 | | | Π | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Eínfüllhöhe | | | | | | | | | | | | | Γ | | | | | T | Τ | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | Γ | \square | | | | | | |
| kontrollíeren von oben | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | , | 0 | | | | | C | 100 | | 2 | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Eínfüllhöhe kontrollíeren von unten | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | | 0 | | | | | C | 100 | | 2 | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Schlauch umsetzen | | | | R | 2 | | 4 | 100 | 4 | | | | | | 0 | 100 | | 0 | | | | | C | 100 | | 2 | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | | 0 | 100 | 0 | 4 |
| Warten auf | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | П | | | | | | |
| Betonmíscher | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 14 | 100 | 14 | 3 | з: | 3 3 | 3 | 3 | 18 | 100 | 1 | 8 3 | 3 3 | 3 | 3 | 3 3 | 3 18 | 100 | 18 | 3 з | З | 3 : | 3 3 | 3 | 18 | 100 | 18 | 3 3 | 3 3 | 3 | 3 | 3 | 3 1 | 18 | 100 | 18 | 86 |
| Betonierpause zur | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Τ | | | | | | | | | | | | | | | | | Γ | П | | | | | | |
| Druckregulierung | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | | 0 | | | | | C | 100 | | 2 | | | | | 0 | 100 | | 2 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Warten auf Pumpe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | | | | | | T | | | | | | | | | | Γ | П | | | | | | |
| befüllen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | | 0 | | | | | C | 100 | | 2 | | | | | 0 | 100 | | 2 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Warten auf Schlauch umsetzen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | , | 0 | | | | | 0 | 100 | | 2 | | | | | 0 | 100 | | 2 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Erholen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 |) (| 0 | | | | | C | 100 | | > | | | | ſ | 0 | 100 | | > | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 원 전 Mensch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | | | | | | |
| Schalung 9 reparíeren | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | , , | 0 | | | | | C | 100 | | > | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| p gleu Pumpe verstopft | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 |) (| 0 | | | | | C | 100 | | > | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Auße | | | | | | T | 0 | 100 | 0 | | | 3 3 | Ŋ | 3 | 12 | 100 | 1: | 2 | | | | | C | 100 | | > | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | | 0 | 100 | 0 | 12 |

| | Baustell | e 2: | 2: Bauen im Bestand in Frankfurt am Main Auf | | | | | | | | | | | | | | fna | hme | e Ni | .1 | | | | Bla | att N | r. 3 | VD | n7 | L | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------------------------|------|--|------|-----|----|------|------|------|-----|-----|----------|-----|-----|-----|---|-----|-----|------|----|-------|-----|-----|-----|-------|-------------|-----|-----|------|----------|---|-----|-----|------------|-----|-----------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|------------------|
| | Teilvorgang | | N | linu | ite | | Σti | L | Σ | t | | Mir | ute | _ | Σt | i | L | Σt | | Ν | /linu | te | | Σti | L | Σt | | Μ | inut | e | | Σti | L | Σt | | 1 | Min | ute | | Σti | L | 5 | t t | t _{aes} |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 5 | 6 | 2 | | - | 1 | 1 2 | 3 | 4 | 56 | 5 - | _ | | 2 | 1 | 2 | 3 4 | 4 5 | 56 | 2 | | 2 | 1 | 2 | 3 4 | 5 | 6 | 2 | | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 56 | 2 | | | • | 900 |
| | Arbeiter: | 9:0 | 5 | | | | | | _ | 9 | :11 | _ | | | _ | _ | | | 9:1 | 17 | | | | | | | 9:2 | 23 | _ | | | | | _ | 9:: | 29 | ┯┥ | | — | | | | | |
| Bet | on einbauen | | | | | | 0 | 10 | 0 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 1 | LE | 5 | 100 | 5 | 1 | 1 | 1 : | 1 1 | 1 | 6 | 100 | 6 | 1 | 1 : | 1 1 | . 1 | 1 | 6 | 100 |) E | 1 | 1 | | | | 2 | 10 | 0. | 2 | 19 |
| Εín | füllhöhe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | | | | | | | |
| kov | itrollíeren von oben | | | | | | 0 | 10 | 0 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 1 | L E | 5 | 100 | 5 | 1 | 1 | 1 : | 1 1 | . 1 | 6 | 100 | 6 | 1 | 1 : | 1 1 | 1 | 1 | 6 | 100 | 6 | 1 | 1 | | | | 2 | 100 | 5 | 2 | 19 |
| Eín | füllhöhe kontrollíeren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| von | unten | | | | | | 0 | 10 | 0 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 1 | 2 | 5 | 100 | 5 | 1 | 1 | 1 : | 1 1 | . 1 | 6 | 100 | 6 | 1 | 1 : | 1 1 | 1 | 1 | 6 | 100 | e | 1 | 1 | | | | 2 | 100 | 2 | 2 | 19 |
| scl | ılauch umsetzen | | | | | | 0 | 10 | 0 0 | 2 | | | | | 0 | 2 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 |) C | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Wa | rten auf | | | | | | | | | T | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | Η | H | | - | | | | | |
| Bet | onmíscher | 3 | 3 | 3 : | 3 3 | | 15 | 10 | 0 13 | 5 | | | | | C | | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | 3 | 3 | 33 | 12 | 10 | 0 1 | 2 | 27 |
| Bet | oníerpause zur | | | | | | | | | T | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | Π | | | | | | | |
| Dru | ickregulierung | | | | | | 0 | 10 | 0 0 | > | | | | | C | | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 |) C | , | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Wa | rten auf Pumpe | | | | | | | | | T | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | П | | | | | | | |
| befi | ällen | | | | | 3 | 3 | 10 | 0 3 | 3 4 | Ļ | | | | 2 | 4 | 100 | 4 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 0 | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | Ŧ |
| Wa | rten auf Schlauch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | \square | Π | | | | | | | |
| ит | setzen | | | | | | 0 | 10 | 0 0 | > | | | | | C | 5 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 |) C | , | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Erh | olen | | | | | | 0 | 10 | 0 0 | 2 | | | | | C | 2 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 |) C | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| | | | | | | <- | 4,50 |) m³ | | | | <u> </u> | | | _ | | | | | | | | | | | | | | | <u>.</u> | | | | 9,00 |) m | ³ -> | Г | | | | | | | |
| dze | Mensch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | \square | | | | | | | | |
| Ľ | Schalung | | + | | | | | | | ┢ | - | | | | | | _ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | H | H | ╧ | - | | | | | _ |
| er G | reparieren | | | | | | 0 | 10 | 0 0 | > | | | | | C | 5 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 |) C | , | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| halb dt | Pumpe verstopft | | | | | | 0 | 10 | 0 0 | > | | | | | C | 2 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 0 | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Außer | MP | | | | | | 0 | 10 | 0 0 | 2 | | | | Τ | 0 | 2 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 |) <i>C</i> | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Baustell | e 2 | : Ba | aue | en in | n Be | estar | nd in F | rank | furt | am | Ма | in | | | | | А | ufna | ahm | ne N | lr. 1 | | | | Bla | tt N | r. 4 | VON | レチ | | | | En | de: | | | | | | | |
|---------------------------|---------|----------|-----|-------|------|----------|---------|------------|---------------|--------------|-------|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|--------------|------|-------|-----|-----|----|-----|------|-------|------------|-----|----|-----|----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|----------|------------------|
| Teilvorgang | | | Min | ute | -1 | Σt | L | Σ | | Ν | /linu | te | -L o | Σti | L | Σ | t d | | Min | ute | | Σti | L | Σt | | Mi | inute | e L E I | _Σ | ti | L | Σt | | M | /linu | ite | | ∑ti | L | Σt | t _{ges} |
| Arboitor | 1 0- | 25 | 3 | 4 | 5 6 | <u> </u> | | +- | 1 0./ | 11 | 3 4 | 4 5 | 6 | _ | | +- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 6 | _ | | - | 1 | 23 | 3 4 | 5 | 6 - | | | _ | 1 | 2 | 3 | 4 5 | 5 6 | _ | | <u> </u> | |
| Arbeiter: | 9. | 55 | | | | | | | 9.4 | + | | + | | | | | 9. | .40 | | - | | | | | 9.0 | 3 | | ┢┼┤ | | | | | 9.5 | T | ┿ | ╋ | + | | | | |
| Beton eínbauen | | | | | | C | 10 | 0 0 | > | | | | | 0 | 100 |) (| 2 | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Eínfüllhöhe | | | | | | | | | | | | Т | | | | | 1 | | | | | | | | | | | П | | | | | | Т | Т | Τ | | | | | |
| kontrollíeren von oben | | | | | | C | 10 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Eínfüllhöhe kontrollíeren | | | | | | | | | | | | Τ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Τ | | | | | |
| von unten | | | | | | C | 10 | 0 | | | | | | 0 | 100 |) (| > | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | С | 0 |
| Schlauch umsetzen | | | | | | C | 10 | | > | | | | | 0 | 100 |) (| 2 | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Warten auf | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | H | | | | | | | | | | | | | |
| Betonmíscher | з | 3 | 3 | 3 | 3 3 | 3 18 | 10 | 0 18 | 33 | 3 | 3 3 | 3 3 | 3 3 | 18 | 100 | 18 | 3 3 | 3 | 3 | 3 | 3 3 | 18 | 100 | 18 | 3 | 3 3 | 3 3 | 3 | 3 1 | 8 | 100 | 18 | 3 | 3 | 3 | 3 3 | 3 3 | 18 | 100 | 18 | 90 |
| Betoníerpause zur | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | | | Π | | | | | | T | T | T | | | | | |
| Druckregulíerung | | | | | | C | 10 | 0 0 | \sim | | | | | 0 | 100 | | 0 | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | 0 |
| Warten auf Pumpe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Т | Τ | Τ | | | | | |
| befüllen | | | | | | C | 10 | 0 | \rightarrow | | | | | 0 | 100 |) (| 2 | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Warten auf Schlauch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| umsetzen | | | | | | C | 10 | 0 0 | \sim | | | | | 0 | 100 |) (| 2 | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | Ш | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Erholen | | | | | | 0 | 10 | 5 0 | > | | | | | 0 | 100 |) (| 2 | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | | | | | | | | | | | | | | |
| Mensch | I | | | | | | | | | | | Τ | | | | | T | | | | | | | | | | | Π | | | | | | Т | Т | Τ | | | | | |
| Schalung | ┢ | \vdash | | + | + | ╀─ | | + | | \mathbb{H} | | ╈ | + | | | ┢ | ╉ | ╋ | \mathbb{H} | + | + | | | - | | | + | ┢┼┤ | + | + | | | | + | + | + | | | | | |
| 5 reparieren | | | | | | C | 10 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 2 | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| 9 gee Pumpe verstopft | | | | | | C | 10 | > 0 | | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Außer | | | | | | C | 10 | <i>)</i> (| | | | T | | 0 | 100 |) (| 2 | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | T | | T | Π | 0 | 100 | 0 | 0 |

| | Baustell | e 2 | : Ba | aue | n im | n Be | estar | nd in | Fran | kfu | rt ai | mΝ | /lair | ۱ | | | | | A | ufn | ahn | ne l | \r. 1 | | | | BI | att N | Jr. ٤ | 5 V C | n j | 7 | | | En | nde: | | | | | | | |
|---------|-------------------------|-----|-----------|--------------|----------------|------|-------|-------|------|-----|-------|------------|-------|---|---|-----|-----|-----|-----|------------|-----|------|--------------|---------------|-----|------|----|-------|--------------|-------|-----|-----|-----|----|----|------|------|-----|----|-----|-----|----------------|------|
| | Teilvorgang | | Ν | <i>l</i> lin | ute | | √ti | | 7 | -, | | Mir | nute | Э | | ∑ti | 1 | | + | | Mir | nute | | + | | | | Ν | 1inu | te | | ∑ti | I | Σt | | Ν | Minu | ute | | ∑ti | I | | t |
| | renvorgang | 1 | 2 | 3 | 4 : | 56 | Zu | | 2 | • | 1 2 | 2 3 | 4 | 5 | 6 | Zu | L | 4 | · ، | 1 2 | 3 | 4 | 5 6 | ; | | 2' | 1 | 2 | 3 4 | 4 5 | 6 | Zu | L | Ľ | 1 | 2 | 3 | 4 | 56 | Zu | L | ² ' | •ges |
| | Arbeiter: | 10 | :05 | | | | | | | 1 | 0:1 | 1 | | | | | | | 1 | 0:1 | 7 | | | | | | 10 |):23 | | | | | | | 10 | :29 | | | | | | | |
| Bet | ton einbauen | | | | 1 : | 1 1 | . 3 | 10 | 00 | 3 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | 1 1 | . : | 100 | | 2 | | | | | 0 | 100 | C | | | | | | 0 | 100 | C | 5 |
| Είı | nfüllhöhe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| koi | ntrollíeren von oben | | | | 1 : | 1 1 | . 3 | 10 | 00 | 3 | | | | | | 0 | 100 | | 0 | | | | 1 1 | . 2 | 100 | 2 | 2 | | | | | 0 | 100 | C | | | | | | 0 | 100 | C | 5 |
| €ίv | nfüllhöhe kontrollíeren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| VOV | r unten | | | | 1 : | 1 1 | . 3 | 10 | 00 | 3 | | | | | | 0 | 100 | | 0 | | | | 1 1 | . 2 | 100 | 2 | 2 | | | | | 0 | 100 | C | | | | | | 0 | 100 | С | 5 |
| SC | hlauch umsetzen | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | C | 100 |) (| > | | | | | 0 | 100 | C | | | | | | 0 | 100 | C | 0 |
| W | arten auf | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bet | tonmíscher | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | C | 100 | 0 0 | > | | | | | 0 | 100 | C | | | | | | 0 | 100 | С | 0 |
| Bet | toníerpause zur | | П | | | Т | | | | | | | | | | | | Т | | | | | | | | | | П | | Т | | | | | | | | | | | | | |
| Dri | uckregulíerung | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | | 0 | | | | | C | 100 | 0 | > | | | | | 0 | 100 | C | | | | | | 0 | 100 | С | 0 |
| Wl | arten auf Pumpe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bef | füllen | З | 3 | З | | | 9 | 10 | 00 | 9 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | C | 100 | 0 | > | | | | | 0 | 100 | С | , | | | | | 0 | 100 | С | 9 |
| W | arten auf Schlauch | | П | | | Т | | | | | | | | | | | | | | | Γ | | | | | | | П | | Т | | | | | | | | | | | | | |
| ип | nsetzen | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | | 0 | | | | | C | 100 | 0 0 | | | | | | 0 | 100 | C |) | | | | | 0 | 100 | С | 0 |
| Erl | holen | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | C | 100 |) C | > | | | | | 0 | 100 | C | | | | | | 0 | 100 | С | 0 |
| | | <- | 9,0 | 0 n | n ³ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 47P | Mensch | | | | | Τ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Τ | | | | | | | | | | | | | |
| LID | Schalung | Ī | \square | | | ╈ | | | | T | | \uparrow | Π | | | | | ┢ | T | \uparrow | | | | | | | 1 | | | ╈ | T | | | | | | ╡ | ┥ | ╈ | | | | |
| er (| reparieren | | Ц | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | 3 3 | 3 3 | 3 | 3 | 3 | 18 | 100 |) 1 | 83 | 3 3 | 3 | 3 | | 12 | 100 |) 12 | 23 | З | 33 | 3 3 | 3 | 18 | 100 | 18 | 3 | 3 | 3 | 3 | 33 | 18 | 100 | 18 | 66 |
| -halb c | Pumpe verstopft | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | C | 100 |) (| | | | | | 0 | 100 | С | | | | | | 0 | 100 | С | 0 |
| Außer | MP | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | C | 100 |) (| > | | | | | 0 | 100 | C | | | | ſ | | 0 | 100 | С | 0 |

| Baustell | e 2 | 2: B | lau | en | im | Bes | stan | d in F | rank | furt | am | Ма | in | | | | | | Au | fnał | nme | e Nr | .1 | | | | Bla | att N | r. 6 | VDI | n7 | 2 | | | Er | nde | ; : | | | | | | | |
|--|-----|------|--------|----------|----|-----|------|--------|------|------|----------|-------|-----|------|-----|------|----|----|----|------|------|------|----|-----|-----|----|-----|------------|------|-----|----|-----|----------|-----|----|-----------|------------|-----|-----|------|------|----|----|------------------|
| Teilvorgang | | | Mi | nut | e | | ∑ti | L | Σt | | Ν | /linu | te | -1.6 | Σti | L | | Σt | 1 | M | linu | te | | Σti | L | Σt | | M | inut | e | | ∑ti | L | Σt | | | Min | ute | | Σt | L | | Σt | t _{ges} |
| Arboitor | 1 | 2 | 5 5 | 4 | 5 | 6 | _ | | - | 10 | ∠ •/1 | 3 ' | 4 5 | | , – | | _ | _ | 10 | 2 | 3 4 | + 5 | 6 | _ | | | 10 | <u>2</u> , | 3 4 | 5 | 6 | _ | | - | 10 | $1 \le 1$ | 3 | 4 | 5 6 | , _ | | _ | _ | - |
| Beton einbauen | | | | | | | 0 | 100 | 0 0 | | .41 | | | | С | 1. | 00 | 0 | | .47 | T | | | 0 | 100 | 0 | | .55 | 2 2 | R | | 6 | 100 |) E | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 2 | 2 12 | 2 10 | 00 | 12 | 18 |
| Eínfüllhöhe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| kontrollíeren von oben | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | С | 1 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | : | 1 1 | 1 | | 3 | 100 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 1 | . e | 1 | 00 | 6 | 9 |
| Eínfüllhöhe kontrollíeren von unten | | | | | | | 0 | 100 |) C | | | | | | С | 1. | 20 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | 1 1 | 1 | 1 | 4 | 100 |) 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 1 | . 6 | · 10 | 00 | 6 | 10 |
| Schlauch umsetzen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | С |) 10 | 20 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | N) | ß | 100 | (M) | | | | | | C |) 10 | 00 | 0 | Ś |
| Warten auf Betonmíscher | | | | | | | 0 | 100 | 0 0 | | | | | | С | 1 | 20 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 |) C | | | | | | C |) 1(| 00 | 0 | 0 |
| Betonierpause zur Druckregulierung | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | С | 1. | 20 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 |) C | | | | | | C |) 1(| 00 | 0 | 0 |
| Warten auf Pumpe befüllen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | С | 1. | 20 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 |) C | | | Π | | | C |) 1. | 00 | 0 | 0 |
| Warten auf Schlauch umsetzen | | | | | | | 0 | 100 | 0 0 | | | | | | С | 1 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | | | | | | | C | 1 | 00 | 0 | 0 |
| Erholen | | | | | | | 0 | 100 | 0 0 | | | | | | С | 1. | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 |) C | | | | | | C |) 1. | 00 | 0 | 0 |
| | | _ | | T | | | | 1 | ĩ | | | | | _ | - | | | | | | | | | | | 7 | | | | | _ | | | ĩ | | | | | | - | | | | |
| PC Mensch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | <u> </u> | | | | | | | | | | | |
| Schalung reparieren | 3 | 3 | 3 | 3 | (M | (M | 18 | 100 | 18 | M) | (M | 3 | (N) | (N) | 18 | 2 10 | 00 | 18 | (M | 3 | 3 3 | 3 3 | Ŋ | 18 | 100 | 18 | Ŋ | 3 | | | | 6 | 100 |) E | | | | | | C |) 1. | 00 | 0 | 60 |
| p gleu Pumpe verstopft | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | С | 1 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | | | | | | | C |) 1(| 00 | 0 | 0 |
| Außer dw | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | T | | | С | 1. | 00 | 0 | | T | T | | | 0 | 100 | 0 | | T | | | | 0 | 100 | 0 0 | | | | | | C | 1. | 00 | 0 | 0 |

| Baustel | e 2: | Ba | aue | en ir | n B | les | tand | d in F | ran | kfu | rt a | m I | Mai | n | | | | | | ļ | ۹ufi | nah | me | e Nr | r.1 | | | | | В | latt | Nr | . チ | VOI | ΝŦ | Z | | | Er | nde | : 11 | :11 | | | | | | | |
|---------------------------|------|--------|----------|----------|-----|-----|------|--------|-----|-----|------|-----------|-------------|-----------|-----|-----|----|-----|---|---|------|-----------|-------------|-----------|-----|----|---|---|--------------|-----|------|--------------|-----------|--------|----|-----|---|----|----|-----|----------|----------|-----|-----|-----|---|---|----|------------------|
| Teilvorgang | 1 | 1 2 | Лin З | ute 4 | 5 | 6 | ∑ti | L | Σ | t | 1 | Mi 2 3 | inut 3 4 | te I 5 | 5 6 | 5 Σ | ti | L | Σ | t | 1 | Mi 2 3 | inut 3 4 | te 1 5 | 5 6 | Σt | i | L | Σt | t 1 | 1 2 | Mir 3 | nute 4 | э 5 | 6 | ∑ti | L | ∑t | 1 | 2 | Min 3 | ute 4 | 5 (| 6 Z | ∑ti | L | 2 | ∑t | t _{ges} |
| Arbeiter: | 11 | :05 | Î | Ĩ | | T | | | | ŀ | 11:1 | 1 | | | 1 | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Beton einbauen | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 5 | 10 | 0 | 5 | | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 5 |
| €ínfüllhöhe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| kontrollíeren von oben | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 5 | 10 | 0 | 5 | 2 | | | | | | 2 | 100 | > | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | F |
| Eínfüllhöhe kontrollíeren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| von unten | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 | 10 | 0 | 6 | 1 | | | | | | 1 | 100 | > | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | F |
| Schlauch umsetzen | | | | R | | | 2 | 10 | 0 | 2 | | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| Warten auf | | | | | | | | | | | | | T | T | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Betonmischer | | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 |
| Betonierpause zur | | | Ī | | | T | | | | T | | T | Т | Г | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Druckregulierung | | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 |
| Warten auf Pumpe | | | | | Τ | | | | | | | | Т | | | | | | | T | | | | | | | | | | | Τ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| befüllen | | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 |
| Warten auf Schlauch | | | | | | | | | | | | | T | | | | | | | T | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| umsetzen | | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 |
| Erholen | | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | | | | | | | 0 | 100 | 2 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ⊕ ੲ Mensch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 Schalung | | | | | ╈ | ╈ | | | + | ┥ | + | | ╈ | ┢ | | + | + | | + | ┫ | + | + | | | + | | | | \mathbf{T} | ╈ | | \mathbf{T} | | | | | | | | | | | | | | | + | | |
| 5 reparíeren | | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 |
| p qie Pumpe verstopft | | | | | T | Ţ | 0 | 10 | 0 | 0 | | | | | | | | | Γ | T | Τ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | T | Τ | | | T | | 0 |
| Außer | Π | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | Γ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Τ | Τ | | | Τ | | 0 |

Anlage E-8: Gruppenzeitaufnahme Gz 2

| Baustell | e 2 | : Ba | aue | n in | n Be | esta | nd ii | n Fra | ankf | urt a | am | Ма | in | | | | | | Aut | inał | nme | e Nr | .2 | | | | BI | att N | \r. 1 | LV | on e | 5 | | | В | egi | nn: | 12 | .55 | Uhr | · | | | |
|-----------------------------|-----|------|-----|----------------|------|------|-------|-------|------|-------|----|------|-----|-----|-----|----|----|----|-----|------|-------|------|-----|-----|-----|----|-----|-------|--------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|----|------|
| Teilvorgang | | | Min | ute | | Σt | i | L | Σt | | Μ | linu | te | | Σti | L | | Σt | | Μ | linut | te | | Σti | L | Σt | | Ν | /linu | ite | | Σti | L | Σ | | . 1 | Mir | nute |) | Σt | i I | _ | Σt | tres |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 6 | 5 2 | _ | - | 2. | 1 | 2 | 3 4 | 4 5 | 56 | 2 | | | 2. | 1 | 2 | 3 4 | 1 5 | 6 | 2 | _ | 2. | 1 | 2 | 3 | 4 3 | 56 | 2 | _ | 2 | 1 | 1 2 | 2 3 | 4 | 56 | 5 | | | 2. | geo |
| Arbeiter: | 12 | :55 | , | | | | | | | 13: | 01 | | | | | | | | 13: | 07 | | | | | | | 13 | 3:13 | | | | | | | 1: | 3:1 | 9 | | | | | | | |
| Beton eínbauen | | | | | | C | , | 100 | 0 | 1 | 1 | 1 | | | 3 | 10 | 00 | M | | | 1 1 | L 1 | - | 3 | 100 | 3 | 3 1 | 1 | 1 | 1 : | 1 1 | 6 | 100 | | 5 1 | 1 | 1 | 1 | 1 1 | L 6 | 5 1 | .00 | 6 | 18 |
| €ínfüllhöhe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| kontrollíeren von oben | | | | | | C | | 100 | 0 | | | 1 : | 1 2 | 2 2 | 6 | 10 | 00 | 6 | 1 | 1 | 1 1 | L 1 | - | 5 | 100 | 5 | 5 1 | 1 | 1 | 1 : | 1 1 | 6 | 100 | | 5 1 | 1 | . 1 | 1 | 1 1 | 4 | 5 1 | .00 | 6 | 23 |
| Eínfüllhöhe kontrollíeren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| von unten | | | | | | C | | 100 | 0 | 1 | 1 | 1 1 | L 1 | . 1 | 6 | 10 | 00 | 6 | 1 | 1 | 1 1 | L 1 | . 1 | 6 | 100 | e | 5 1 | 1 | 1 | 1 : | 1 1 | 6 | 100 | 0 6 | 5 1 | 1 | . 1 | 1 | 1 1 | 6 | 5 1 | .00 | 6 | 24 |
| Schlauch umsetzen | | | | | | C | , · · | 100 | 0 | | | | L | | 1 | 10 | 20 | 1 | 1 | 1 | | | | 2 | 100 | k) | 2 | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | C |) 1 | .00 | 0 | 3 |
| Warten auf | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Betonmíscher | | | | | | C | > | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | > | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | C |) 1 | .00 | 0 | 0 |
| Betonierpause zur | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Τ | | | | | | | | | | | | | | |
| Druckregulierung | | | | | | C | | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | C |) 1 | .00 | 0 | 0 |
| Warten auf Pumpe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| befüllen | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 3 | 3 18 | 3 | 100 | 18 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | > | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | C |) 1 | .00 | 0 | 18 |
| Warten auf Schlauch | | | | | | | | | | | | | Τ | Γ | | | | | | | | Τ | | | | | | П | | Т | | | | | | Τ | | Π | | | | | | |
| umsetzen | | | | | | C | | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | (|) 1 | .00 | 0 | 0 |
| Erholen | | | | | | C | > | 100 | 0 | 1 | 1 | | | | 2 | 10 | 00 | 2 | | | | | | 0 | 100 | c | > | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | C |) 1 | .00 | 0 | Q |
| | <- | 0,0 |)0n | 1 ³ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | _ | | | | | | | | | |
| Mensch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schalung 9 reparíeren | | | | | | 6 | , · · | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | c | > | Π | | | | 0 | 100 | | > | | Γ | | | C |) 1 | .00 | 0 | 0 |
| p gle Pumpe verstopft | | | | | | C | | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | | | | | | 0 | 100 | | | | | | | C |) 1 | .00 | 0 | 0 |
| Außer | | | | | | C | , | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | > | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | C |) 1 | .00 | 0 | 0 |

| Baustel | le 2: | Ba | ue | n im | Be | star | nd ir | n Fra | nkf | urt a | am | Mai | in | | | | | | Auf | nah | me | Nr. | 2 | | | | Bla | att N | lr. 🤉 | 2 V0 | n e | > | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------|----|------|------|--------|------|--------------|-------|-----|-------|------|-------|-----|-----|-----|----|----|----|-----|-----|------|------------|---|-----|-----|----|-----|-------|-------|--------|-----|-----|-----|----|-----|------------|---------|-----|-----|-----|-----|----|------------------|----|
| Teilvorgang | | N | linu | ute | -1 - | Σt | i | L | Σt | 1 | M | linut | te | I o | Σti | L | | Σt | | Mi | nute | e L - I | | Σti | L | Σt | | M | linu | te | | Σti | L | Σι | | | Min | ute | | Σti | L | Σι | t t _a | es |
| | 1 | 2 | 3 | 4 : | 5 6 | - | - | | - | 1 | 2 | 3 4 | + 5 | 6 | - | | | _ | 1 | 23 | 3 4 | 5 | 6 | _ | | - | 1 | 2 | 3 4 | + 5 | 6 | - | | - | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 6 | - | | - | Ĵ | |
| Arbeiter: | 13 | 25 | + | - | - | | - | | | 13: | 31 | _ | - | _ | | | _ | _ | 13: | 37 | - | | _ | | | | 13 | :43 | _ | - | | | | _ | 1. | 3:48 | <u></u> | + | +- | | | - | _ | |
| Beton einbauen | | 1 | 1 | 1 : | 1 | . 5 | 5 1 | 100 | 5 | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | 0 | 100 | | > | 5 |
| Eínfüllhöhe | | | | | | | | | | | | | Т | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | | | | | | | |
| kontrollíeren von oben | | 1 | 1 | 1 : | L 1 | 5 | 5 1 | 100 | 5 | 2 | 2 | 2 2 | 2 | | 8 | 10 | 0 | 8 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | 0 | 100 | | > | 13 |
| Eínfüllhöhe kontrollíeren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| von unten | 1 | 1 | 1 | 1 : | 1 | e | 5 1 | 100 | 6 | 1 | 1 | 1 1 | _ | | 4 | 10 | 0 | 4 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | 0 | 100 | | > | 10 |
| Schlauch umsetzen | 2 | | | | | 17 | 2 1 | 100 | R | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | | > | | Π | | | 0 | 100 | | 2 | 2 |
| Warten auf | П | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | H | | | | | | | |
| Betonmíscher | | | | | | C |) 1 | 100 | 0 | | | | 3 | 3 | 6 | 10 | 0 | 6 | 3 | 3 3 | 3 3 | 3 | 3 | 18 | 100 | 18 | 3 | 3 | 3 3 | 3 3 | 3 | 18 | 100 | 18 | 3 3 | 3 | 3 | 3 | 3 3 | 18 | 100 | 18 | 3 | 60 |
| Betonierpause zur | П | | | | Τ | | | | | | | Τ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Г | | П | | | | | | | |
| Druckregulíerung | | | | | | C |) 1 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | 0 | 100 | | > | 0 |
| Warten auf Pumpe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| befüllen | | | | | | C |) 1 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | 0 | 100 | | > | 0 |
| Warten auf Schlauch | П | | | | Τ | | | | | | | Τ | Τ | | | | | | | Т | Γ | | | | | | | | | Г | Π | | | | T | | Π | | Т | | | | | |
| umsetzen | | | | | | С |) 1 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | 0 | 100 | | > | 0 |
| Erholen | | | | | | C |) 1 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | 0 | 100 | | > | 0 |
| | | | | | | | | | | 5,0 |)0 r | n³-> | ^ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 원 전 Mensch | | | | | | | | | | | | Τ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | Т | | | | | | |
| Schalung | \square | + | | + | $^{+}$ | ╞ | \mathbf{T} | | | + | | ╈ | ╈ | | | | ╈ | | | ╈ | + | Ħ | + | | | | Ħ | + | ╈ | $^{+}$ | H | | | | T | \uparrow | H | + | + | | | | | _ |
| 5 reparieren | | | | | | С |) 1 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 0 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | 0 | 100 | | > | 0 |
| p gle Pumpe verstopft | | | | | | C | | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | | | | | | | 0 | 100 | | > | 0 |
| Außer dw | Π | | | | | C |) 1 | 100 | 0 | | | Τ | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | Τ | | | | 0 | 100 | 0 |) | | Τ | | | 0 | 100 | | > | | Π | | Τ | 0 | 100 | | > | 0 |

| Baustell | e 2 | : Ba | aue | en ir | n B | esta | and | in Fra | anki | urt | am | Ма | in | | | | | | Auf | nah | nme | Nr | .2 | | | | Bla | att N | lr. ∃ | s vc | n e | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----|------|-----|-------|-----|-------|-----|--------|------|-----|-----|-------|-----|-----|-----------------|----|------|----------|-----|-----|------|------------|-----------|-----|-----|----|-----|----------|-------|------------|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----------|------|
| Teilvorgang | | [| Min | ute | _ | 5 | ti | L | Σt | | Ν | /linu | Ite | _ | Σti | L | • | Σt | | Μ | inut | te | | Σti | L | Σt | | N | linu | te | | Σti | L | Σt | | | Min | ute | _ | Σti | L | | Σt | toos |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 4 | | _ | ۲. | 1 | 2 | 3 | 4 5 | 56 | ; " | | Ľ | <u> </u> | 1 | 2 | 3 4 | 15 | 6 | ۲ | | 2. | 1 | 2 | 3 4 | 4 5 | 6 | Ζ | _ | 2. | 1 | 2 | 3 | 4 | 56 | 2 | | | <u> </u> | -yes |
| Arbeiter: | 13 | :55 | 5 | | | | | | | 14 | :01 | | | | | | | | 14: | 07 | | | | | | | 14 | :13 | | | | | | | 14 | :19 |) | ⊢ | ┶ | | | | | |
| Beton eínbauen | | | | | : | 2 | 2 | 100 | 2 | R | 2 | | 2 1 | 2 2 | 10 | 10 | . 00 | 10 | | 2 : | 2 2 | 2 | | 6 | 100 | 6 | > | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | 18 |
| Eínfüllhöhe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| kontrollíeren von oben | | | | | : | 1 | 1 | 100 | 1 | 1 | 1 | | 1 1 | L 1 | . 5 | 10 | 00 | 5 | | 1 : | 1 1 | | | Ŋ | 100 | 3 | 5 | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | 9 |
| Eínfüllhöhe kontrollíeren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | | | | | | | |
| von unten | | | | | : | 1 | 1 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 1 | L 1 | . 6 | 10 | 00 | 6 | 1 | 1 : | 1 1 | - | | 4 | 100 | 4 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | 11 |
| Schlauch umsetzen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | 3 | | | 3 | 10 | 00 | (N | 3 | | | | | (N | 100 | 3 | ~ | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | 6 |
| Warten auf | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | П | | | | | | | |
| Betonmíscher | 3 | Ŋ | 3 | 3 | 3 | 1 | 5 | 100 | 15 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | 15 |
| Betoníerpause zur | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | П | | | | 1 | | | |
| Druckregulierung | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | 3 | 3 | 6 | 100 | 6 | , 3 | 3 | 3 3 | 3 3 | 3 | 18 | 100 | 18 | ß | 3 | 3 | 3 | 3 3 | 18 | 10 | 0 | 18 | 42 |
| Warten auf Pumpe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Τ | | | | | |
| befüllen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | > | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | 0 |
| Warten auf Schlauch | | | | | | | | | | | | | | Τ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | | | | | | | | |
| umsetzen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | 0 |
| Erholen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | 0 |
| | | | | | < | <- 5, | 00 | m³ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 요 관 Mensch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Т | | | | | |
| Schalung | | | | + | ╈ | ╈ | + | | | | | + | | ╈ | | | + | | ╡ | | ╈ | \uparrow | \square | | | ł | | \vdash | | \uparrow | | | | + | | Η | H | ╡ | + | | | + | + | |
| o reparieren | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | 0 |
| 9 gleu Pumpe verstopft | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | 0 |
| Außer | | | | | Τ | Τ | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 |) | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 10 | 00 | 0 | 0 |

| Baustel | le 2 | : Ba | aue | en i | m l | Be | stan | d in | Fra | nkf | urt a | am | Ма | in | | | | | | Aı | ıfna | ıhm | e N | r. 2 | | | | BI | att N | ۸r | 4 v | on | 6 | | | E | nd | e: | | | | | | | |
|-----------------------------|------|------|-----|------|-----|----|------|------|-----|-----|-------|----|------|-----|------|-----|---|-----|-----|----|------|------|-----|------|-----|-----|----|----|-------|-------|-----|------|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----------|-------|-----|-----|-----|----|------------------|
| Teilvorgang | | | Mir | nute |) | | Σti | L | | Σt | | M | linu | te | -1.0 | Σt | i | L | Σt | | Ν | Ninu | ute | | Σti | L | Σι | t | N | /linu | ite | -1-0 | Σti | L | Σ | t | | Mi | nute |) | 5 | ⊽ti | L | Σt | t _{aes} |
| 5 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 2 | | _ | - | 1 | 2 | 3 4 | 4 5 | 5 6 | 5 - | _ | | - | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 6 | - | | - | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 6 | - | | - | | 1 2 | 2 3 | 4 | 5 | 6 - | - | | - | 9 |
| Arbeiter: | 14 | :25 |) | _ | | _ | | | | | 14: | 31 | | _ | _ | _ | _ | | | 14 | :37 | _ | _ | _ | | | _ | 14 | 1:43 | _ | _ | _ | | | _ | 1 | 4:4 | .9 | \square | ┝──┝ | + | _ | | | |
| Beton eínbauen | 2 | N | R | | 2 | N | 10 | 1 | 00 | 10 | | 1 | 1 : | L | | V-1 | 3 | 100 | (4) | 5 | | | | | 0 | 100 | | 2 | | | | | С | 10 | 0 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 13 |
| Eínfüllhöhe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | \square | | | | | | |
| kontrollíeren von oben | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 5 | 1 | 00 | 5 | | 1 | 1 : | L | | 1.1 | 3 | 100 | (1) | | | | | | 0 | 100 | | 2 | | | | | С | 100 | 2 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 8 |
| Eínfüllhöhe kontrollíeren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| von unten | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 | 1 | 00 | 6 | 1 | 1 | 1 : | L | | 2 | Ŧ | 100 | 4 | | | | | | 0 | 100 | | 0 | | | | | С | 10 | 0 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 10 |
| Schlauch umsetzen | | | | N | | | 2 | 1 | 00 | 2 | 2 | | | | | 2 | 2 | 100 | 2 | 2 | | | | | 0 | 100 | | 2 | | | | | С | 100 | 0 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 4 |
| Warten auf | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ľ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | | | | | | |
| Betonmíscher | | | | | | | 0 | 1 | 00 | 0 | | | | | | C | 2 | 100 | С | , | | | | | 0 | 100 | | 0 | | | | | С | 10 | 0 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Betonierpause zur | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Γ | | | | | | | | | | | | Т | | | | | | | Π | | Т | | | | |
| Druckregulierung | | | | | | | 0 | 1 | 00 | 0 | | | | З | 3 3 | 6 | | 100 | e | 3 | 3 | З | 3 : | 3 3 | 18 | 100 | 18 | 33 | з | 3 | 3 | 3 3 | 18 | 100 | 0 1 | 8 | 3 3 | 3 3 | 3 | 3 | 3 : | 18 | 100 | 18 | 60 |
| Warten auf Pumpe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | \square | | | | | | |
| befüllen | | | | | | | 0 | 1 | 00 | 0 | | | | | | C | 2 | 100 | С |) | | | | | 0 | 100 | | 2 | | | | | С | 100 | 0 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Warten auf Schlauch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Γ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | П | | | | | | |
| umsetzen | | | | | | | 0 | 1 | 00 | 0 | | | | | | C | 2 | 100 | С |) | | | | | 0 | 100 | | 0 | | | | | С | 100 | 0 | 0 | | | \square | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Erholen | | | | | | | 0 | 1 | 00 | 0 | | | | | | C | 2 | 100 | С | , | | | | | 0 | 100 | | 2 | | | | | С | 100 | 0 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mensch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | \square | | Τ | | | | |
| Schalung reparieren | | | | | | | 0 | 1 | 00 | 0 | | | | T | | C | > | 100 | С | | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | С | 100 | 0 | 0 | | | Π | | Ţ | 0 | 100 | 0 | 0 |
| p gle Pumpe verstopft | | | | | | | 0 | 1 | 00 | 0 | | | | | | C | > | 100 | С | 0 | | | | | 0 | 100 | | > | | | T | | С | 10 | 0 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Außer | | | | | | | 0 | 1 | 00 | 0 | | | Τ | | | C | > | 100 | С | , | | | Τ | | 0 | 100 | | > | | | Τ | Τ | С | 100 | 0 | 0 | | | Π | | Τ | 0 | 100 | 0 | 0 |

| Baustell | e 2 | : B | aue | en i | m E | Bes | tand | d in Fr | ank | furt | am | Ма | in | | | | | A | ufn | ahı | mel | Nr. : | 2 | | | | Bla | tt N | r. 5 | VOI | ΛG | | | | Er | nde | ə: | | | | | | | |
|---------------------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|---------|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|-----|---------------|------|-------|-----|-----|-----|----|-----|------|------|-----|----|-----|-----|----|----|-----------|-----------|-----------|-----------|---|-----|-----|-----|------|
| Teilvorgang | | | Mir | nute | ; | | Σti | L | Σt | | Ν | 1inu | te | _ | Σti | L | 5 | ť | _ | Mi | nute | ; | | ∑ti | L | Σt | | Μ | inut | е | | Σti | L | Σt | | _ | Mir | nute | Э | | Σti | L | Σι | tres |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 2 | | 2 | 1 | 2 | 3 4 | 4 5 | 5 6 | 2 | | - | | 1 2 | 2 3 | 6 4 | 5 | 6 ' | | | 2 | 1 | 2 | 3 4 | 5 | 6 | 2 | | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 2 | | 2 | goo |
| Arbeiter: | 14 | :55 | | | _ | _ | _ | | | 15 | :01 | - | _ | _ | | | _ | 1 | 5:0 | $\frac{1}{1}$ | + | | _ | | | | 15 | 13 | _ | | | | | | 15 |):19 T | <u>+</u> | ⊢┦ | ┢╍┥ | _ | | | | |
| Beton eínbauen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | 2 | 2: | 2 | 2 | 8 | 100 | > | 8 : | 2 2 | 2 2 | 2 | | | 8 | 100 | 8 | | 2 : | 2 2 | 2 | 2 | 10 | 100 | 10 |) | 2 | 2 2 | 2 | 2 | 2 | 10 | 100 | 10 |) 36 |
| Eínfüllhöhe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| kontrollíeren von oben | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | 1 | 1 : | 1. | 1 | 4 | 100 | <u>,</u> | 4 : | 1 1 | . 1 | . 1 | | | 4 | 100 | 4 | | 1 : | L 1 | 1 | 1 | 5 | 100 | 5 | 5 | 1 | . 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 100 | Ę | 5 18 |
| Eínfüllhöhe kontrollíeren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| von unten | | | | | | | 0 | 100 | 0 | 1 | 1 | 1 : | 1 1 | 1 | 6 | 100 | > | 6 | 1 1 | . 1 | . 1 | | | 4 | 100 | 4 | | 1 : | L 1 | 1 | 1 | 5 | 100 | 5 | 5 | 1 | . 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 100 | Ę | 5 20 |
| Schlauch umsetzen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | 2 | | | 1 | 2 | 4 | 100 | <u>с</u> . | 4 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | > | | | | | | 0 | 100 | |) 4 |
| Warten auf | ľ | | | | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | T | | | | | | | | | | Н | | | | | ľ | t | | H | H | | | | | |
| Betonmíscher | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | > | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Betoníerpause zur | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | Г | | | | | | |
| Druckregulíerung | З | З | 3 | 3 | 3 | 3 | 18 | 100 | 18 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | 4 | 4 | 8 | 100 | 8 | 4 | | | | | 4 | 100 | 4 | 4 | | | | | | 4 | 100 | 4 | 34 |
| Warten auf Pumpe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| befüllen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | > | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Warten auf Schlauch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| umsetzen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | | L | | | Ш | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Erholen | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 2 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | > | | | | | | 0 | 100 | | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 면 Mensch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | \square | | | | | |
| un Schalung | | | | | | | | | | | | | T | | | | | T | | T | | | T | | | | | | | | | | | l | | T | | Π | Π | | | | | |
| reparíeren | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | | L | \square | \square | Ш | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| gleh Dumpe verstopft | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | c | | | | | | | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Außer | | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | > | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | | | | | | | 0 | 100 | 0 0 | 0 |

| | Baustell | e 2 | : B | au | en | im | Be | star | nd ir | n Fra | nkf | urt | am | Ma | ain | | | | | | Aι | ıfna | hme | e N | r. 2 | | | | Bl | att N | Vr. e | ⊳ ∨c | n e | 6 | | | E | nde | ə: 15 | 5:4(|) | | | | | |
|------|-------------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|-------|-------|-----|-----|----|------|-----|-----|------------------|-----|-----|----|----|------|-------|-----|------|-----|-----|----|----|-------|-------|------|-----|-----|-----|---|-----|------|-----------|-----------|--------|--------------|-----|----|----|------|
| | Teilvorgang | | | Mir | nut | e | | Σti | | I | Σt | | Ν | 1inu | ıte | | Σt | | | Σt | | Ν | /linu | ite | 1 | Σti | I | Σt | | N | 1inu | te | | Σti | | Σ | t _ | | Min | ute | | Σt | i | | Σt | taac |
| | . en el gang | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 5 | 6 | 2" | | _ | ۲. | 1 | 2 | 3 | 4 | 56 | ; ² ` | | _ | Ζ. | 1 | 2 | 3 | 4 5 | 56 | Ζ | _ | 2. | 1 | 2 | 3 4 | 1 5 | 6 | Ζ | _ | 2 | 1 | 1 2 | : 3 | 4 | 56 | β Ζ , | | | 2. | -yes |
| | Arbeiter: | 15 | 5:25 | 5 | | | | | | | | 15: | 31 | | | | | | | | 15 | :37 | | | | | | | 15 | :43 | | | | | | | 1: | 5:49 | 9 | Ц | _ | | | | | |
| Be | ton einbauen | 2 | 2 | 2 | ٢١ | 2 9 | 2 2 | 12 | : : | 100 | 12 | 2 | 2 | 2 | 2 : | 2 2 | 2 12 | 2 1 | 100 | 12 | 2 | 2 | 2 : | 2 | | 8 | 100 | 8 | 2 | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | C |) 1 | 00 | 0 | 32 |
| Εí | nfüllhöhe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | \square | | | | | | |
| ko | ntrollieren von oben | 1 | 1 | 1 | 1 | . 1 | . 1 | e | . : | 100 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 : | 1 1 | . e | , 1 | L00 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 4 | 100 | 4 | | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | C |) 1 | 00 | 0 | 16 |
| Εíι | nfüllhöhe kontrollíeren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | П | Π | | | | | | |
| voi | n'unten | 1 | 1 | 1 | 1 | . 1 | . 1 | e | | 100 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 : | 1 1 | . e | - 1 | 100 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 4 | 100 | 4 | - | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | C |) 1 | 00 | 0 | 16 |
| SC | chlauch umsetzen | | | | | | | 0 | : | 100 | 0 | | | | | | C |) 1 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | > | | | | | 0 | 100 | | > | | Π | | | C |) 1 | 00 | 0 | 0 |
| W | 'arten auf | | | | | T | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | \square | \square | | | | | | |
| Ве | tonmíscher | | | | | | | 0 | : | 100 | 0 | | | | | | C |) 1 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | > | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | C |) 1 | 00 | 0 | 0 |
| Be | toníerpause zur | | | | | T | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | \square | | | | | | |
| Dr | uckregulierung | | | | | | | 0 | : | 100 | 0 | | | | | | C |) 1 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | > | | | | | 0 | 100 | | 0 | | | | | C | 1 | 00 | 0 | 0 |
| W | 'arten auf Pumpe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | \square | | | | | | |
| be- | füllen | | | | | | | 0 | : | 100 | 0 | | | | | | C |) 1 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | С | | | | | | 0 | 100 | | 2 | | | | | C |) 1 | 00 | 0 | 0 |
| W | 'arten auf Schlauch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | Π | | | | | | |
| ип | nsetzen | | | | | | | 0 | : | 100 | 0 | | | | | | С |) 1 | L00 | 0 | | | | | | 0 | 100 | С | > | | | | | 0 | 100 | | > | | | Ш | | C |) 1 | 00 | 0 | 0 |
| Er | holen | | | | | | | 0 | | 100 | 0 | | | | | | C |) 1 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | С | > | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | C |) 1 | 00 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0,5 | m³-: | > | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Mensch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | Π | | | | | | |
| - | Schalung | | | | | ľ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ľ | | | T | | | | | T | | \square | \square | | | 1 | | | |
| | reparieren | | | | | | | 0 | : | 100 | 0 | | | | | | C |) 1 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | С | | Ш | | | | 0 | 100 | | 2 | | \square | Ц | \bot | C |) 1 | 00 | 0 | 0 |
| | Pumpe verstopft | | | | | | | 0 | : | 100 | 0 | | | | | | C |) 1 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | С | | | | | | 0 | 100 | | > | | | | | C |) 1 | 00 | 0 | 0 |
| 2001 | MP | | | | | | | 0 | : | 100 | 0 | | | Ι | | | C |) 1 | 100 | 0 | | | | Τ | | 0 | 100 | С |) | | | | | 0 | 100 | | > | | Π | | | C |) 1 | 00 | 0 | 0 |

Anlage E-9: Gruppenzeitaufnahme Gz 3

| | Baustelle 3: | Hoch | nbai | u, 1 | Veu | bau | ı, Ve | erka | aufsz | zenti | rum | in l | Met | zing | jen | | | | A | ufna | ahm | e N | r. 3 | | | | Bla | att N | Ir. 1 | VO | n 2 | 2 | | | В | 3egi | inn: | .16 | .45 | Uhr | - | | | |
|---------|------------------------|------|--------|-----------------|----------|-----|-------|------|-------|-------|-----|--------|-----------|-----------|-----|-----|----|-----|-----|------|-----------|----------|------|-----|----|-----|-----|--------|--------------|-----------|-----|-----|------------|-----|-----|------|------------|-----------|----------|-----------------|-----|------|---|------------------|
| | Teilvorgang | 1 | M 2 | linu 3 | ite 4 | 5 6 | Σt | i | L | Σt | 1 | М 2 | linu 3 | te 4 5 | 6 | ∑ti | L | Σt | 1 | 2 | Minı 3 | ute 4 | 5 6 | ∑ti | L | ∑t | 1 | N 2 | /linu 3 | te 4 5 | 5 6 | ∑ti | L | Σ | t , | 12 | Mir 2 3 | nute | ; 5 (| ₃ Σt | L | Σ | t | t _{ges} |
| | Arbeiter: | 16: | 45 | | | | | | | | 16: | 51 | | | | | | | 16 | 5:57 | 7 | | | | | | 17 | :03 | | | | | | | 1 | 7:0 | 19 | \Box | | | | | | |
| Кü | ibel entleeren | | : | 2 | 2 | | 4 | - | 85 | (M | | | 2: | 2 | | 4 | 85 | [4] | * | 2 | R | | | 4 | 85 | M | | 2 | 2 | | | 4 | 85 | 5 | 3 | 1 1 | 1 1 | _ | | 3 | ş Ş | 35 | Ŋ | 16 |
| Bet | ton verdíchten | | : | 1 | 1 : | 1 1 | . 4 | - | 85 | ß | 1 | 1 | 1 : | 1 1 | 1 | 6 | 85 | F.) | 5 1 | 1 | 1 | 1 : | 1 | 5 | 85 | - 4 | 1 | 1 | 1 : | 2 2 | 2 2 | 9 | 8 <u>5</u> | 5 9 | 8 3 | 2 2 | 22 | 2 2 | 2 1 | 2 12 | 2 8 | 35 1 | 0 | 31 |
| КЙ | ibel umsetzen | | | | | | C | > | 85 | 0 | | | | | | 0 | 85 | С |) | | | | | 0 | 85 | . 0 | | | | | | 0 | 85 | 5 (| 0 | | | | | C |) Ę | 35 | 0 | 0 |
| auf | f Kübel warten | N | 3 | | 1 | 2 2 | 10 | > | 85 | 9 | N | 2 | | R | Ы | 8 | 85 | 7 | 2 | | | 2 3 | 2 | 6 | 85 | 5 | N | | : | 1 1 | . 1 | 5 | 85 | 5 4 | 4 | | | 1 | 1 1 | 1 3 | şξ | 35 | 3 | 27 |
| Erb | nolen | | | | | | C |) | 85 | 0 | | | | | | 0 | 85 | С | > | | | | | 0 | 85 | 0 | | | | | | 0 | 85 | 5 (| 0 | | | | | C |) Ę | 35 | 0 | 0 |
| | | <- (|),00 |)m [:] | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| idzei | Mensch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | T | Т | Τ | \square | | Γ | | | | |
| er Grur | Schalung reparieren | | | T | | | C | > | 85 | 0 | | | | | | 0 | 85 | С | > | | | | | 0 | 85 | . 0 | | | | | | 0 | 85 | 5 (| 0 | T | | | | C |) E | 35 | 0 | 0 |
| halb de | Kran blockíert | | | T | T | | C |) | 85 | 0 | | | | | | 0 | 85 | С | > | | | | | 0 | 85 | . 0 | | | T | T | | 0 | 85 | 5 (| 0 | T | | Π | | C |) Ę | 35 | 0 | 0 |
| Außer | MP | | | T | T | | C |) | 85 | 0 | | | | | | 0 | 85 | С | > | | | | | 0 | 85 | 0 | | | T | T | | 0 | 85 | 5 (| 0 | T | | Π | | C |) Ę | 35 | 0 | 0 |

| | Baustelle 3 | : Hoch | nbau | I, N | eub | oau, | Ver | kaufs | szer | ntru | m ir | n Me | etzin | nger | n | | | Αι | lfna | ahmo | e Nr | r. 3 | | | | Bla | att N | √r. 2 | VOI | r 2 | | | | E | nde | : 17 | 7.2 | 5 U | nr | | | |
|---------|------------------------|--------|--------|-------------|--------|------|-----|-------|------|------|------|----------|----------|------|------------------|----|------|----|------|-----------|------------|------|-----|----|----|-----|-------|---------------|-----------|-----|-----|----|-----|---|------|-----------|----------|-----|-----|-----|-----|------------------|
| | Teilvorgang | 1 | M 2 | inut 3 4 | e 5 | 6 | ∑ti | L | Σ | t 1 | 2 | Min 3 | ute 4 | 5 6 | _S Σti | L | Σt | 1 | 2 | Minu 3 | ite 4 5 | 5 6 | ∑ti | L | Σt | 1 | 2 | /linut 3 4 | te I 5 | 6 | ∑ti | L | Σt | | 1 2 | Minu 3 | ute 4 | 56 | Σti | L | Σt | t _{ges} |
| | Arbeiter: | 17: | 15 | | | | | | | 1 | 7:21 | | | | | | | 17 | 2:27 | ' | | | | | | 17 | :33 | | | | | | | 1 | 7:39 |) | | | | | | |
| Кï | ibel entleeren | 1 | 1 : | 1 1 | | | 4 | 85 | 5 | N | 1 | 1 | 1 : | 1 | 4 | 85 | [V] | | | | | | 0 | 85 | 0 | | | | | | 0 | 85 | 5 C | 2 | | | | | 0 | 81 | 5 C |) <i>7</i> |
| Be | ton verdíchten | R | 2: | 2 2 | N | Я | 12 | 85 | 5 10 | 0 2 | 2 2 | N | 2: | 2 2 | 2 12 | 85 | 5 1C | 2 | Q | 2 : | 2 2 | 2 | 10 | 85 | 9 | | | | | | 0 | 85 | 5 0 | 2 | | | | | 0 | 84 | 5 C | , 29 |
| Кï | ibel umsetzen | | | | | | 0 | 85 | 5 (| 0 | | | | | 0 | 85 | 5 с | | | | | | 0 | 85 | 0 | | | | | | 0 | 85 | 5 0 | > | | \square | | | 0 | 85 | 5 C |) 0 |
| au | f Kübel warten | | | | 1 | 1 | R | 85 | 5 | 2 1 | | | | | 1 | 85 | 5 1 | | | | | | 0 | 85 | 0 | | | | | | 0 | 85 | 5 0 | 2 | | Π | | | 0 | 8.ª | 5 C |) 3 |
| Er | holen | | | | | | 0 | 85 | 5 (| 0 | | | | | 0 | 85 | 5 C | , | | | | | 0 | 85 | 0 | | Π | | | | 0 | 85 | 5 C | 2 | | Π | | | 0 | 8ť | 5 C |) 0 |
| | | | | | | | | | | | 6 | ,00 | m³-: | > | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Mensch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Τ | Τ | Π | | | | | | |
| er Grun | Schalung reparieren | | | | | | 0 | 85 | 5 (| 0 | | | | | 0 | 85 | 5 C | , | | | | | 0 | 85 | 0 | | | | | | 0 | 85 | 5 C | 2 | | \Box | | | 0 | 8ª | 5 C |) 0 |
| | Kran blockíert | | | | | | 0 | 85 | 5 (| 0 | | | | | 0 | 85 | 5 C |) | | | | | 0 | 85 | 0 | | | | | | 0 | 85 | 5 0 | 2 | | | | | 0 | 85 | 5 C |) C |
| VIGO | MP | | T | | | | 0 | 85 | 5 (| 0 | | | | | 0 | 85 | 5 C | | | | | | 0 | 85 | 0 | | | | | | 0 | 85 | 5 0 | 2 | | | | | 0 | 85 | 5 C |) C |

Anlage E-10: Gruppenzeitaufnahme Gz 4

| Großversuch T | roßversuch Technische Universität München / Universität Leipzig | | | | | | | | | | | | | А | Aufnahme Nr. 4 | | | | | | | | Blatt Nr. 1 VON 1 | | | | | | | | | Beginn: 08.52 Uhr | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|--------|---|---|-----|-------------|-----|-----|----|--------|-----|-----|---|---|----------------|-----|---|-----|--------|---|---|-----|-------------------|-----|-----|--------|------|---|---|-----|-----|-------------------|-----|--------|------|-----------|---|-----|-----|----|----|------------------|-----|
| Teilvorgang | | Minute | | | -1 | Σ ti | | L | Σt | Minute | | | e | | Σti | L | Σ | t L | Minute | | | Σti | L | Σt | | Minute | | | | Σti | L | Σ | t L | Minute | | | | Σti | L | 5 | ۶t | t _{aes} | |
| 5 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 6 | 5 - | _ | | - | 1 | 2 3 | 8 4 | 5 | 6 | - | | - | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 6 | 5 - | | - | 1 | 2 | 3 | 4 | 56 | 5 - | | - | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 6 | 5 - | | +- | - | 900 |
| Arbeiter: | 8:: | 52 | - | | | _ | | | | 8:58 | 5 | | | | | | | 9 | :04 | _ | _ | | _ | | | 12 | 2:46 | | _ | | | | | 1 | 2:52 | <u>-</u> | | _ | | | ╇ | + | |
| Beton eínbauen | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 : | 16 | 5 | 100 | 6 | 1 : | 1 1 | . 1 | 1 | 1 | 6 | 100 | 6 | 5 1 | | | | | 1 | 100 |) 1 | L 1 | 1 | 1 | 1 | 1 1 | . 6 | 100 | | 5 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 10 | 0 | 5 | 24 |
| €ínfüllhöhe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| kontrollíeren von oben | | | | | | C |) : | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 2 | | | | | C | 100 | | > | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Eínfüllhöhe kontrollíeren | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| von unten | | | | | | C | | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | 2 | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Schlauch umsetzen | | | | | | 6 | | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | 2 | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Warten auf | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | | | | 1 | | | |
| Betonmíscher | | | | | | C |) : | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 2 | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Betoníerpause zur | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | П | | | | | | | |
| Druckregulierung | | | | | | C |) : | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | 2 | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Warten auf Pumpe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| befüllen | | | | | | C |) : | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | 0 | 2 | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 100 | | 2 | | | | | С | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Warten auf Schlauch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | П | | | | | | | П | | | | | | | | | П | | | | | | | |
| umsetzen | | | | | | C | 2 | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | (| > | | | | | С | 100 | | | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Erholen | | | | | | C | > : | 100 | 0 | 1 : | 1 | | | | 2 | 100 | 1 | 2 | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 10 | 0 | 0 | 2 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 20 Mensch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schalung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Π | | | | | | | Π | | | | | | | | | Ħ | | | | | T | | |
| o reparieren | | | | | | C | | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | (| 2 | | | | | С | 100 | | | Ш | | | | С | 100 | | > | | \square | | | С | 10 | 0 | 0 | 0 |
| ogen Pumpe verstopft | | | | | | C | | 100 | 0 | | | | | | 0 | 100 | C | > | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 100 | | > | | | | | С | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Auße | | | | T | T | C | | 100 | 0 | T | | | | | 0 | 100 | C | > | | | | | C | 100 | | > | | T | T | | С | 100 | | > | | | | | С | 10 | 00 | 0 | 0 |