

Massivbau Baustofftechnologie Karlsruhe

Kurzbericht (ENTWURF)

Thema: Neue Erkenntnisse zum Frischbetondruckverhalten

Datum: 17.05.2006

Textseiten: 30

Bearbeiter: Dipl.-Ing. M. Beitzel

Durchwahl: 0721 / 608-6792

Veröffentlichung und auszugsweise Wiedergabe
bedarf der schriftlichen Genehmigung des Instituts.

Universität Karlsruhe (TH)
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Abteilung Baustofftechnologie
Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. S. Müller

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Überblick	3
2 Stand der Erkenntnis	4
2.1 Untersuchte Einflussparameter	4
2.2 Bemessungsansätze	7
2.3 Folgerungen.....	9
3 Theoretische Modellbildung	11
3.1 Berücksichtigung einbaumechanischer Effekte.....	11
3.1.1 Verlauf der Fließgrenze über die Einbauhöhe.....	11
3.1.2 Impulswirkung des Betoneinbaus	13
3.2 Zeitliche Entwicklung der rheologischen Betoneigenschaften	14
3.3 Ansatz für die Bestimmung des Frischbetondrucks	15
3.3.1 Kräftegleichgewicht in der Schalung.....	15
3.3.2 Berücksichtigung des Seitendruckbeiwertes	18
3.3.3 Berücksichtigung der Rückstellspannung bzw. des Bettungsmoduls	19
3.3.4 Ermittlung des horizontalen Frischbetondrucks.....	20
3.4 Abgrenzung zu bestehenden Modellvorstellungen.....	21
4 Experimentelle Untersuchungen.....	22
4.1 Allgemeines	22
4.2 Versuchsprogramm.....	23
4.3 Versuchsaufbau und Messeinrichtung	23
4.4 Versuchsergebnisse.....	24
5 Zusammenfassung.....	26
6 Literatur.....	27

1 Überblick

Zur Gewährleistung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit bei dem Einsatz von Schalungssystemen auf Betonbaustellen sind fundierte Kenntnisse des horizontalen Frischbetondruckverhaltens und entsprechende Materialmodelle unverzichtbar, s. Abbildung 1. Wie neuere Untersuchungsergebnisse bestätigen, gelten die bislang bekannten stoffgesetzlichen Beziehungen aber lediglich für Normal-, Leicht- und Schwerkton und sind noch nicht eindeutig geklärt. Darüber hinaus bleiben für neue Betonarten wesentliche Einflussparameter außer Acht. Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es daher, ein allgemeingültiges, auf der Rheologie basierendes Stoffgesetz zur Beschreibung des horizontalen Frischbetondruckverhaltens von Beton – und damit u. a. von sowohl Normalbeton (NB) als auch selbstverdichtendem Beton (SVB) – zu entwickeln. Hierzu wurden Modellversuche zum Verhalten des Frischbetondrucks durchgeführt unter gleichzeitiger Berücksichtigung der rheologischen Betoneigenschaften. Dazu wurde eine vertikale Trägerschalungskonstruktion gewählt. Die Entwicklung und der Verlauf des horizontalen Frischbetondruckverhaltens wurde unter Verwendung von Druckmessdosen (DMD) sowie durch die Erfassung der Schalungsdurchbiegung anhand von Dehnmessstreifen (DMS) studiert. Aufbauend auf den Ergebnissen der Schalungsmodellversuche und der gleichzeitigen Untersuchung der rheologischen Eigenschaften wurde ein physikalisch begründetes Werkstoffmodell erarbeitet.

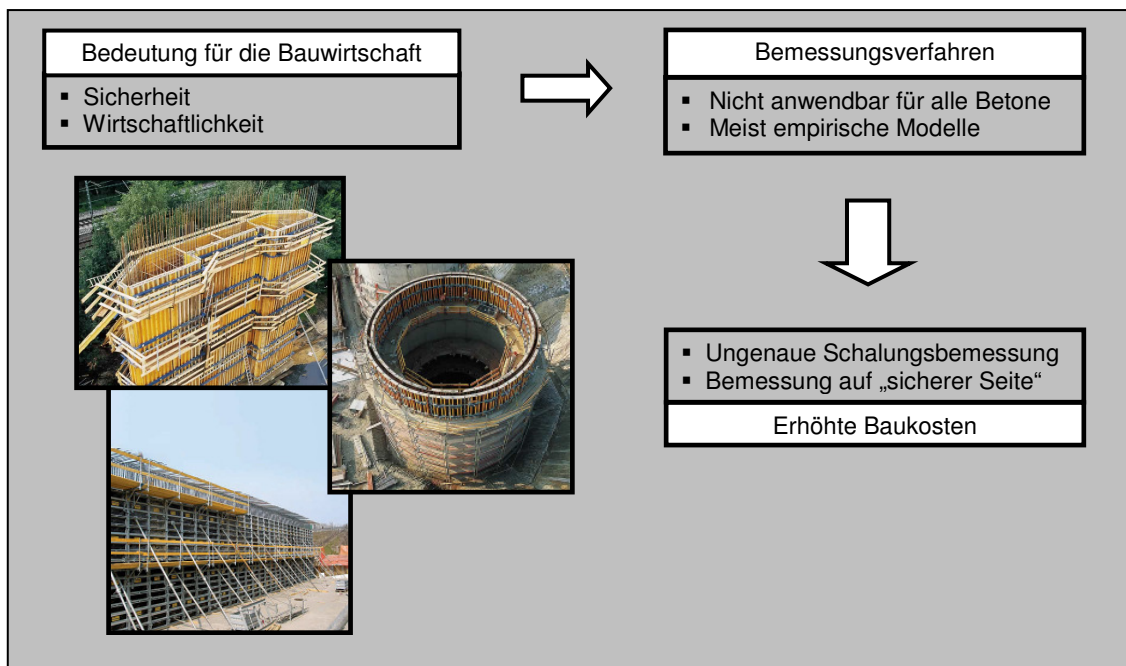


Abb. 1: Überblick über die Bedeutung der Bemessung des Frischbetondrucks (Bildquelle [18])

Aufgrund der wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Bedeutung des Frischbetondruckverhaltens für die Bauwirtschaft ist die Forschung auf diesem Gebiet z. Zt. sehr intensiv ausgeprägt. Ziel der vorliegenden Abhandlung ist es daher lediglich, den aktuellen Kenntnisstand über diesen Bereich der Betontechnologie maßgebend zu erweitern. Die in diesem Rahmen präsentierten Ergebnisse und Erkenntnisse sind Bestandteil einer Dissertation [7] und sollen somit bis zu ihrer abschließenden Veröffentlichung der Wissenschaft vorab zur Verfügung gestellt werden. Aus diesem Grunde handelt

es sich hierbei nur um eine kurze Darstellung ohne weitgehende Beschreibung und Herleitung. Alle vertiefenden und weiterführenden Ausführungen können [7] entnommen werden.

2 Stand der Erkenntnis

Die meisten der bisherigen Untersuchungen und Abhandlungen zum grundsätzlichen horizontalen Frischbetondruckverhalten sind älteren Datums. Dabei handelt es sich vor allem um experimentelle Untersuchungen von NB [9, 20, 23, 26, 33, 45, 48, 49]. Jedoch wurde zuletzt verstärkt das Verhalten des Frischbetondrucks auf lotrechte Schalungen von SVB untersucht [6, 8, 10, 17, 31, 32, 36, 39, 55]. Ein umfassender Überblick über den derzeitigen Stand der Erkenntnis ist [6, 39] zu entnehmen.

2.1 Untersuchte Einflussparameter

Aufgrund ihrer Komplexität und gegenseitigen Interaktion konnten bis zum jetzigen Zeitpunkt die Einflüsse der maßgebenden Parameter meist jeweils nur vereinzelt untersucht und betrachtet werden. Diese Untersuchungen waren für NB hauptsächlich auf nachfolgende Einflussfaktoren beschränkt, so dass unter den gegebenen Bedingungen lediglich deren Auswirkung berücksichtigt werden konnte:

- die Einbaugeschwindigkeit [20, 23, 26, 48]
- die Einbaudauer [20, 48, 49]
- die Umgebungstemperatur [20, 23]
- die Erstarrungsdauer [20, 23, 26, 49]
- die Schalgerüstverformungen [20, 23]
- die Bauteilart (Wand/Säule) [20, 23]
- die Verdichtungsdauer [49]
- die Wandreibung [9, 49]
- die Konsistenz bzw. innere Reibung [9, 23, 33, 45]
- die Frischbetonrohweite [23, 26]
- die Betontemperatur [20, 23, 48]
- die Einbauhöhe [20, 23, 48]
- die Verdichtungstiefe [20, 49]
- der wirksame Wassergehalt [20, 49]
- die Verdichtungsart [23]
- das Größtkorn [23]
- die Schalgerüst-Steifigkeit [20]
- die Schalungsabmessungen [23]

Nach [50] sind in DIN 18 218 [15] die erstrangigen Einflussgrößen für die Beschreibung des Frischbetondruckverhaltens Steiggeschwindigkeit, Betonrohweite, Verdichtungsart, Verdichtungstiefe (beim Einsatz von Innenrüttlern), Konsistenz und Frischbetontemperatur diejenigen Parameter, die das Frischbetondruckverhalten wesentlich beeinflussen. Andere Prüfparameter wie Erstarrungszeit, Betonzusatzmittel, Porenwasserdruck, Verdichtungsdauer, Schalungskonstruktion und Schalungsdichtigkeit sind für das spezifische Frischbetondruckverhalten von NB lediglich untergeordneter Bedeutung (zweitrangig). Als drittrangig werden dagegen die Einflussparameter wie Einbringart, Zuschlag und Größtkorn, Zementart, Umgebungstemperatur, Schütt- und Gesamthöhe sowie die Bewehrungsführung erachtet und damit als nicht ausschlaggebend, s. Abbildung 2.

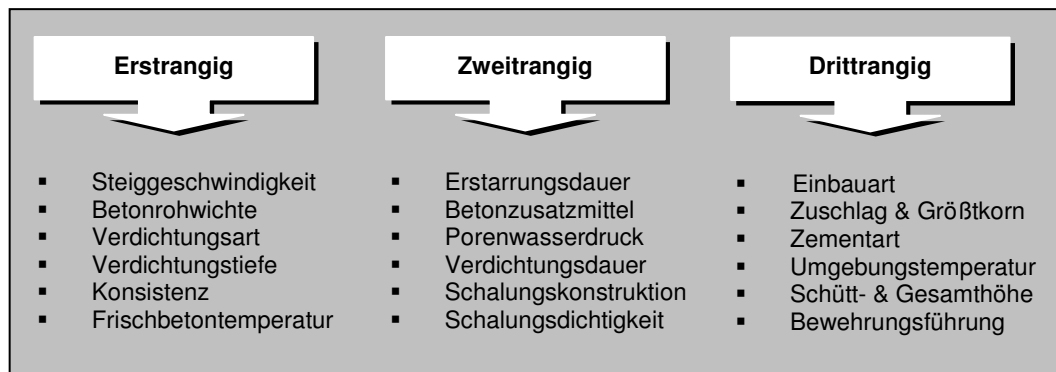


Abb. 2: Einteilung bzw. Wertigkeit der Einflussparameter hinsichtlich des Verhaltens von Frischbetondruck nach [50]

Hingegen beeinflussen nach dem ACI Komitee 622 [1] Steiggeschwindigkeit, Konsistenz, Betonrohrichte, Größtkorn, Frischbetontemperatur, Umgebungstemperatur, Schalungsrauhigkeit und -permeabilität, Schalungsabmessungen, Verdichtungseinfluss, Einbauvorgang, Porenwasserdruck, Zementart sowie die Betonierhöhe mehr oder weniger den Schalungsdruck von NB. Dabei wird besonders die Bedeutung der Einbaugeschwindigkeit als der wichtigsten Einflussgröße sowie der Frischbeton- und der Umgebungstemperatur herausgehoben.

Die auf der Grundlage der bisherigen Versuche basierenden Konzepte zur Beschreibung des Frischbetondruckverhaltens von NB sind für die Praxis von großem Interesse und fanden Eingang in nationale und internationale Regelwerke [1, 11, 12, 13, 14, 15]. Die dort verwendeten Ansätze sind jedoch untereinander inkonsistent, lückenhaft und weisen Unterschiede hinsichtlich der Vorhersage des Frischbetondruckverhaltens von NB auf [20, 49]. Exemplarisch seien hier widersprüchliche Angaben in Bemessungskonzepten genannt, die den resultierenden Frischbetondruck entweder lediglich anhand der Einbaugeschwindigkeit oder aber auch unter Berücksichtigung weiterer Parameter bestimmen. Hinzu kommen weitere, auf diesen Grundlagen basierende Ansätze für das Frischbetondruckverhalten, die jedoch nicht weiter verifiziert wurden [25, 34, 51]. Die Problematik aller zu erfassenden Einflussparameter ist auch seit geraumer Zeit bekannt [41]. Zusätzlich zu den bestehenden Kenntnislücken kommen weitere Schwierigkeiten bei Überschreitung der Gültigkeitsbereiche der jeweiligen Norm [44].

Neuere Untersuchungen und Abhandlungen hinsichtlich des horizontalen Frischbetondrucks wenden sich hingegen nahezu ausschließlich dem SVB zu. Diese Untersuchungen waren hauptsächlich auf nachfolgende Einflussfaktoren beschränkt, so dass unter den gegebenen Bedingungen lediglich deren Auswirkung berücksichtigt werden konnte:

- | | |
|--|------------------------------------|
| – die Einbauhöhe [8, 10, 17, 32] | – die Bauteilgeometrie [6] |
| – die Einbaugeschwindigkeit [6, 8, 10, 17, 32] | – die Thixotropie [8] |
| – die Rheologie [6, 31, 36] | – das Schalungsmaterial [8] |
| – die Betonzusammensetzung [8, 6] | – die Logistik [8] |
| – die Wandreibung [40, 54] | – die Erstarrungsdauer [32, 38] |
| – die rheologischen Eigenschaften [31, 36] | – die Einbautechnik [6, 8, 10, 32] |
| – die Fließfähigkeit bzw. Konsistenz [32] | – die Betontemperatur [32] |

Ebenfalls sind die Erkenntnisse aus experimentellen Untersuchungen über die Gewichtung der Einflussparameter für das horizontale Frischbetondruckverhalten von SVB noch nicht annähernd weit fortgeschritten wie für NB. Neben dem Fehlen eines einheitlichen Normenwerkes gibt es bis zum jetzigen Zeitpunkt noch keine zusammenfassende Beurteilung der unterschiedlichen Einflussfaktoren sowie lediglich eine Sicherheitsbemessung nach hydrostatischem Ansatz [16]. Neue Untersuchungen und Berichte betrachten auch hier die Einbaugeschwindigkeit als maßgebend [8, 10]. Andere Veröffentlichungen bezeichnen entweder die Reibung zwischen Schalung und Beton [38] oder auch die Fließgrenze des Betons [36] als entscheidend. Infolge neuer Betonrezepturen und -charakteristiken sowie damit verbundener baubetrieblicher Aspekte muss den zusätzlichen Einflussparametern wie beispielsweise Fließmittel oder Betoneinbau „von unten“ ebenfalls Rechnung getragen werden. Tabelle 1 zeigt eine mögliche Gewichtung der Einflussparameter für SVB [39].

Tab. 1: Einflussparameter auf den Frischbetondruck von SVB und Bewertung ihrer Auswirkungen [39]

	Auswirkung auf den Frischbetondruck (zu beachten ist die Interaktion zwischen den einzelnen Einflussparametern)	
Einflussgrößen	Hoch	Mittel bis gering
Schalung und Bewehrung	Betonierhöhe, Schalungsquerschnittsgeometrie, Dichtheit der Schalhaut	Steifigkeit der Schalung, Bewehrungsgehalt und Anordnung der Bewehrung, Rauhigkeit der Schalhaut
Mischungszusammensetzung und Frischbetoneigenschaften	Frischbetonwichte, Frischbetonkonsistenz (Fließgrenze, Winkel der inneren Reibung), Ansteif- und Erstarrungsverhalten, Frischbetontemperatur, Porenwasserdruck, Blüten des Betons bzw. Permeabilität	Frühschwinden
	Art und Menge der Mischungskomponenten (Zement, Betonzusatzstoffe, Gesteinskörnungen, Betonzusatzmittel, Wasser), relative Mengenanteile, wie z.B. Wasser/Mehlkorngehalt	
Kontaktzone zwischen Beton und Schalhaut sowie Bewehrung	Reibung zwischen Beton und Schalung sowie Beton und Bewehrung	Haftung zwischen Beton und Schalung sowie Beton und Bewehrung, Trennmittel
Betonherstellung, Transport und Einbringtechnik	Steiggeschwindigkeit, Verdichtungsenergie, Verdichtungstiefe, Betonierrichtung („von oben“ bzw. „von unten“)	Verdichtungsart, Einfüllprozess (Pumpen oder Kübel), Fallhöhe, Füllgeschwindigkeit (Volumenstrom, Transportzeiten), Mischprozess
Externe Einflüsse	externe Erschütterungen	Außentemperatur

Ebenfalls sind die Erkenntnisse aus den Frischbetondruckuntersuchungen von SVB für die Praxis von großem Interesse. Demzufolge wurden hier vereinzelt Modelle entwickelt [39, 31, 36, 54], es konnten aber noch keine nationalen bzw. internationalen Regelwerke konzipiert werden. Hinderlich wirken sich auch die dafür widersprüchlichen Erkenntnisse aus, wie hoch der prozentuale Anteil an dem hydrostatischem Druck ist, dessen Angaben u. a. von 50 % bis 100 % reichen [30, 49].

2.2 Bemessungsansätze

Die maßgebenden strukturellen Mechanismen der Schalungsbelastung durch Frischbetondruck sind für NB bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht ausreichend erforscht. Grundsätzlich basiert die Beschreibung des Frischbetondruckverhaltens auf der Anlehnung an bekannte Bemessungsmodelle aus den nachfolgenden Bereichen:

- der Bodenmechanik
- der Schüttgütermechanik

sowie auf empirischen Ansätzen.

Dabei existieren jeweils Berechnungsmodelle mit [9, 15] und ohne [33, 45, 13] Berücksichtigung des Erstarrungsvorgangs des Betons.

Die geläufigsten Ansätze basieren auf zwei Hypothesen hinsichtlich der Beschreibung des Frischbetondrucks, die beide auf dem Berechnungskonzept der Coulombschen Erddrucktheorie basieren [51]. Grundannahme beider Hypothesen ist die Darstellung der Frischbetonseitenlast als Funktion der Auflast anhand eines Beiwertes λ .

Dabei wird der Frischbeton als ein Haufwerk unterschiedlich großen Zuschlags in Verbindung mit Wasser und Zement als viskoses Schmiermittel angesehen. Die erste Hypothese (Modell 1) benennt die Überwindung der Schalungsvorspannung als Bedingung für ein Anwachsen des Schalungsdrucks. Diese entsteht durch die hydrostatische Druckbelastung des Verdichtungsgeräts und wird aufgrund des verdichteten Betons an einer Rückfederung behindert. Somit muss jede weitere Belastung infolge Betoneinbau zunächst diese Vorspannung abbauen, damit es zu einem weiteren Druckanstieg kommen kann.

Die zweite Hypothese (Modell 2) besagt, dass sich der Frischbetondruck vorerst ohne Verdichtungseinfluss mit dem Seitendruckbeiwert λ_0 aufbaut. Die darauf folgende Erhöhung des Schalungsdrucks erfolgt als konstanter Zuschlag. Dabei stehen für die Berücksichtigung des Zeiteinflusses zwei unterschiedliche Modellbetrachtungen zur Verfügung – einerseits wird nach der vollständigen Erstarrung des Betons der Schalungsdruck gleich Null [52], andererseits wird der Beiwert λ gleich Null [49]. Beide Hypothesen konnten bisher experimentell weder bestätigt noch widerlegt werden. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass beide genannten Mechanismen bei der Schalungsbeanspruchung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Bedingungen während des Betoneinbaus auftreten können [53].

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Frischbetondrucks von [20] deuten darauf hin, dass die aus der Bodenmechanik bekannten Phänomene, wie die Entwicklung verschiedener aktiver oder passiver Druckzustände in ähnlicher Weise, jedoch anderer Form, auch bei der Schalungsbeanspruchung vorhanden sind. Allerdings entspricht das statische System sowie die Konstruktion einer Schalung nicht dem einer im Grundbau üblichen Wandvorrichtung. Das entsprechende Berechnungsmodell berücksichtigt jedoch alleine nur die Einbaugeschwindigkeit und basiert auf einer empirischen Modellvorstellung. Im Wirkungsbereich von Innenrüttlern wurde bei den Frischbetondruckversuchen eine hydrostatische Druckverteilung verzeichnet. Specht [49] geht dagegen auf die beschriebenen Phänomene nicht weiter ein, berücksichtigt jedoch die Reibungsbeiwerte zwischen Wand und Beton, die aber hauptsächlich für geneigte Schalungen von Bedeutung sind. Die dazugehörige Grundgleichung basiert dagegen auf der Gleichung (1) nach [22], die wiederum auf den Grundlagen der Erdrucktheorie basiert.

$$p_b = \gamma \cdot h \cdot \lambda \quad (1)$$

mit:

p_b	Frischbetondruck [kN/m^2]
γ	Frischbetonrohichte [kN/m^3]
h	Einbauhöhe des Betons [m]
λ	Seitendruckbeiwert [-]

Als eine weitere Grundlage lässt sich beispielsweise die Zugrundelegung der Silodrucktheorie nennen, die in [19] aufgeführt ist. Des Weiteren wird in verschiedenen Veröffentlichungen über die Problematik unterschiedlicher Einteilungen nach reinen Flüssigkeiten oder Halbflüssigkeiten berichtet [35]. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine schlüssige Klärung der Entwicklung des Frischbetondrucks noch nicht eindeutig gelungen ist [27]. Zusätzlich existieren auch hinsichtlich der Bedeutung und des Einflusses der Rheologie für NB vereinzelte Beobachtungen [43].

Für SVB sind die maßgebenden Mechanismen der Schalungsbelastung durch Frischbeton noch weniger ausreichend erforscht. Hierfür gibt es im Wesentlichen bis zum heutigen Zeitpunkt vereinzelte Modellvorstellungen, jedoch keine mit allgemeiner Gültigkeit. Grundlagen für eine Modellvorstellung sind dabei:

- die Hydromechanik
- die Schüttgütermechanik
- die Rheologie

Dies führt dazu, dass aufgrund der rheologischen Einteilung des SVB die Schalungsbemessung für den vollen Flüssigkeitsdruck erfolgen muss, sofern nicht im Einzelfall Erfahrungen über geringere Druckwerte vorhanden sind [16]. Die Tatsache, dass es sich dabei lediglich um eine Richtlinie und nicht eine Norm handelt, bestätigt die große Ungewissheit hinsichtlich der Beschreibung des Frischbetondruckverhaltens von SVB. So basieren die einzelnen Bemessungsansätze auf dem hydrostatischen Ansatz [16], der Anlehnung an die Silodrucktheorie mit [38] und ohne [55] Berücksichtigung des Erstarrungsvorganges sowie rheologischen Ansätzen [31, 36]. Vergleichbare grundsätzliche Materialmodelle zur Erarbeitung einer Norm wie für die von NB sind jedoch zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vorhanden.

Die Empfehlungen und Untersuchungen des Frischbetondrucks von SVB der Japan Society of Civil Engineers [30] deuten hingegen darauf hin, dass die aus der Hydromechanik bekannten Phänomene, wie die Ausbildung einer grundsätzlich hydrostatischen Schalungsbeanspruchung, auch bei SVB vorhanden sind. Diese Betrachtung wird auch in weiteren Untersuchungen bestätigt [21, 37, 42]. Bezüglich der Höhe dieser Beanspruchung werden jedoch Abminderungen im Bereich ab 6 m Höhe von ca. 10 % beobachtet.

Billberg [8] gibt dagegen an, dass der Einfluss der Steiggeschwindigkeit unter Umständen zu einer geringeren Beanspruchung führt, als dem hydrostatischen Druck. Sowohl ein nicht hydrostatischer Druck [28] als auch der Einfluss der Einbaugeschwindigkeit [11] werden durch ältere Untersuchungen bestätigt. Des Weiteren wird in neueren Arbeiten auf einen Bezug zu dem rheologischen Verhalten von SVB verwiesen [4, 5, 36]. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine schlüssige Klärung der Phänomenologie des Frischbetondruckverlaufs auch bei dem Einsatz von SVB bislang nur ansatzweise gelungen ist.

Ein umfassendes Versuchsprogramm zum Frischbetondruckverhalten von SVB unter Betrachtung seines rheologischen Verhaltens wurde von [5] durchgeführt. Den Kern der Untersuchungen bildeten Frischbetondruckversuche an Wänden mit unterschiedlichen Abmessungen. In diesen Versuchen konnten vollständige Zeit-Druckbeziehungen von SVB bei Variation unterschiedlicher Einflussparameter ermittelt werden. Zeitgleich wurden in verschiedenen Zeitabständen rheologische Untersuchungen des eingebauten Betons mit einem Rheometer vorgenommen. Die Auswertung der Messergebnisse zeigte nach einer ersten Betrachtung eine annähernd hydrostatische Druckverteilung für den Maximalwert des Schalungsdrucks, der jedoch in Abhängigkeit von der Betonrheologie abweichend wirken kann. Als Ergebnis der obengenannten Tendenz für den Einfluss der Einbaugeschwindigkeit auf den Frischbetondruck von SVB ergab sich kein erkennbarer Zusammenhang zwischen den einzelnen Einbaugeschwindigkeiten und den maximalen horizontalen Druckwerten. Dies bestätigt nicht die Beobachtungen verschiedener Untersuchungen zum Frischbetondruckverhalten [8, 10, 41].

Ein erster Ansatz zur Beschreibung des Schalungsdruckverhaltens von SVB anhand der rheologischen Eigenschaften gelang [36]. Die darin enthaltene Gleichung ist für die Praxis relativ gut geeignet, vernachlässigt jedoch weitere maßgebende Einflüsse. So werden z. B. in keiner Weise die Schalungsbeschaffenheit bzw. -steifigkeit sowie die Abhängigkeit des Seitendruckbeiwertes von der Fließgrenze berücksichtigt.

2.3 Folgerungen

Die jeweiligen Modellvorstellungen beziehen sich lediglich entweder auf NB oder SVB, ergeben aber keinerlei zusammenhängende Erklärung für die Beschreibung des Frischbetondruckverhaltens. Zur Bestimmung des Frischbetondruckverhaltens während des Einbauvorgangs wird in verschiedenen Abhandlungen hauptsächlich erst ansatzweise auf die Erstellung von Gedankenmodellen zurückgegriffen. Die dadurch erhaltenen Vorgaben dienen jedoch lediglich als Näherungswerte. Eine detaillierte Beschreibung eines Modellansatzes kann [49] entnommen werden. Fast alle bisherigen Modellansätze weisen jedoch einen signifikanten Nachteil auf. Sie sind lediglich auf der Grundlage einfacher Frischbetondruckversuche entwickelt worden und berücksichtigen nicht Effekte, die durch

die rheologischen Eigenschaften, die für die Praxis von besonderer Bedeutung sind, hervorgerufen werden. Vereinzelt sind diese rheologischen Ansätze zur Beschreibung des Frischbetondrucks von SVB vorhanden, sind jedoch entweder nicht umfassend genug [36] oder basieren auf empirischen Auswertungen [31]. Dabei entspricht die Annahme eines konstanten K-Faktors bzw. λ -Wertes zur Beschreibung des Seitendruckverhaltens nicht den realen Verhältnissen, s. [36]. Des Weiteren vernachlässigt [36] weitere maßgebende Einflüsse. Ferner ist ersichtlich, dass die dem Gedankenansatz der Norm zugrunde liegende Gleichung (1), s. Abschnitt 2.2, ungeeignet ist, da der Faktor λ nicht alle notwendigen Einflussparameter beinhaltet, so z. B. insbesondere die Nichtberücksichtigung von der durch die Schalungsverformung aktivierten Rückstellkraft sowie der rheologischen Eigenschaften.

Aus der vorgenommenen Gegenüberstellung der gemessenen Einbaugeschwindigkeit-Frischbetondruck-Beziehungen von SVB wird deutlich, dass die bislang verbreitete Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung [16] bzw. der Einfluss der Steiggeschwindigkeit [8, 10, 32] nicht das wirkliche Materialverhalten widerspiegeln können. Diese Annahmen sind allenfalls für bestimmte Geschwindigkeiten bzw. Bauwerkstypen gültig. Aufgrund dieser Tatsache beschränkt sich auch die Anwendbarkeit aller bisher bekannten Berechnungsansätze auf den genannten Bereich. Modellvorstellungen unter Berücksichtigung der Reibung zwischen Beton und Schalhaut [38, 54] weisen die in [36] beschriebenen Nachteile und Schwächen auf. Des Weiteren bewegt sich der Wert der Schalungsdurchbiegung in einem derart geringen Bereich, dass dieser eher vernachlässigbar ist.

Die Notwendigkeit der Erstellung eines geeigneten Materialmodells zeigt sich alleine aus der Tatsache, dass bei Vorhandensein desselben das horizontale Druckverhalten neuer Betonarten in Abhängigkeit von dem rheologischen Verhalten abgeleitet werden könnte. Somit wäre der vorherrschende Forschungsbedarf für dieses Druckverhalten von SVB nicht erforderlich. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Untersuchung der Einbaugeschwindigkeit. Neuere, auf der Silotheorie basierenden Ansätze setzen das Betonverhalten unter Berücksichtigung des Erstarrungsvorgangs dem eines Schüttgutes mit Wandreibung gleich. Vereinzelt rheologische Ansätze basieren hingegen auf einer empirischen Auswertung der erhaltenen Ergebnisse oder vernachlässigen weitere maßgebende Einflussparameter. Da diese Ansätze entweder auf für den Werkstoff Beton nicht zutreffenden Annahmen bzw. empirischen Auswertungen beruhen, stellen diese in keiner Weise eine physikalische Beschreibung des Materialverhaltens dar. Zusätzlich werden baubetriebliche Aspekte in keiner ausreichenden Weise berücksichtigt.

Demzufolge beinhaltet keiner dieser nur auf eine Betonart beschränkter Ansätze ein geeignetes Konzept für die Entwicklung eines angepassten Stoffgesetzes. Bei der hier vorgestellten allgemeingültigen Modellentwicklung sollen unter Berücksichtigung der Phänomene der Rheologie insbesondere die Einflüsse der Schalungsverformung sowie des stationären und instationären Druckverhaltens erfasst werden. Folglich soll im Hinblick auf eine Anwendung auf alle Betonarten, der Einfluss der Betonzusammensetzung und ihre Auswirkung auf die rheologischen Betoneigenschaften abgeleitet werden, insbesondere aufgrund der zusätzlichen Einflüsse des Wasser-Zement-Gehalts sowie des Fließmittelanteils [24] für SVB.

3 Theoretische Modellbildung

Als maßgebende baubetriebliche Prozesse sind die Betonherstellung, der Betontransport sowie der Einbauvorgang zu nennen. Im Rahmen der durchgeführten experimentellen Untersuchungen ist v. a. der Betoneinbau von Bedeutung, welcher gemeinsam mit der Betonförderung als weiterer Teilvorgang den gesamten Betonierprozess beschreibt. Hinsichtlich des Betoneinbaus sind grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten zu unterscheiden. Das Einbringen des Betons in die Schalung kann durch Befüllung „von oben“ (NB und SVB) oder „von unten“ (SVB) erfolgen. Für den Fall einer Schalungsbefüllung „von unten“ kommt eine Betonpumpe zum Einsatz, hingegen kann eine Schalungsbefüllung „von oben“ entweder anhand einer Betonpumpe, einem Betonkübel oder aber einer Betonrutsche erfolgen.

Die nachfolgend beschriebenen experimentellen Untersuchungen wurden aufgrund des gewählten Versuchsaufbaus anhand des Betoneinbaus „von oben“ und mittels einer eigens dafür konstruierten Betonrutsche durchgeführt [7]. Des Weiteren wurde für die rheologische Beschreibung des Werkstoffs Beton grundsätzlich ein Bingham-Fluid bzw. für einen SVB ohne oder mit sehr geringer Fließgrenze vereinfacht ein Newton-Fluid zugrunde gelegt. Die Berücksichtigung des Einflusses der Einbaugeschwindigkeit erfolgt anhand einer zusätzlichen Auflast, die sich aus der Anwendung des Impulssatzes für die Dauer des Betoneinbaus ergibt. Aufgrund der Komplexität des Betoneinbaus muss zwischen einem Befüllungsbereich (Beton in Bewegung) und einem Ruhebereich (Beton in Ruhe) unterschieden werden. In den nachfolgenden Abschnitten soll lediglich auf den Ruhebereich eingegangen werden. Eine Beschreibung des Befüllungsbereiches kann [7] entnommen werden. Aufgrund der jeweiligen Materialeigenschaften bzw. der jeweiligen Betoneinbauart und der daraus resultierenden Einflussparameter für NB und SVB ergibt sich eine weitere Unterscheidung.

Für die hier dargestellten experimentellen Untersuchungen wurde aufgrund der eigenen Modellvorrichtung der Einfluss der Vibrationswirkung für NB nicht berücksichtigt, da für die dargestellte Versuchsreihe in erster Linie das alleinige Stoffverhalten des Betons beschrieben werden sollte. Jedoch wird der Verdichtungseinfluss während des Betoneinbaus in [7] betrachtet. Zusätzlich wurden bei der Beschreibung des resultierenden Frischbetondrucks die Einflüsse der Biegesteifigkeit der Schalung und damit verbunden der jeweiligen Feldlängen auf eine mögliche Rückstellkraft berücksichtigt.

3.1 Berücksichtigung einbaumechanischer Effekte

3.1.1 Verlauf der Fließgrenze über die Einbauhöhe

Beton wird gemäß seiner grundsätzlichen rheologischen Betrachtung als Bingham-Fluid durch die Fließgrenze τ_0 und die plastische Viskosität η beschrieben. Als Sonderfall kann SVB bei sehr geringer oder Fehlen der Fließgrenze τ_0 für diesen Zeitraum vereinfacht als Newton-Fluid beschrieben werden. Bei dem Einsatz von NB kann der Verdichtungsprozess die Fließgrenze aufheben. Aufgrund der Thixotropie sowie des einsetzenden Hydratationsprozesses von Beton und des daraus resultierenden Erstarrungsvorgangs, verbunden mit den baubetrieblichen Aspekten des Betoneinbaus, sind diese beiden rheologischen Einflussparameter als Veränderliche über die Zeit t zu betrachten und können eine Funktion $f(t, h)$ über die Höhe h ergeben, s. auch Abschnitt 3.2.

Für diesen Fall (der veränderlichen Fließgrenzenverteilung über die Schalungshöhe) ist aufgrund der Zeitabhängigkeit der genannten rheologischen Einflussparameter deren Verteilung über die gesamte Schalungshöhe nicht konstant. Die unterschiedlichen Werte ergeben sich aufgrund der Zeitversetzung infolge der Einbaugeschwindigkeit. Aufgrund des Einbauprozesses erreicht der in die Schalung eingebrachte Beton in einer Höhe $h_2 > h_1$ erst zeitversetzt den Zustand (τ_0, η) , den der Beton z. B. am Schalungsboden (h_1) unmittelbar nach seinem Einbringen erfahren hat, s. Abbildung 3.

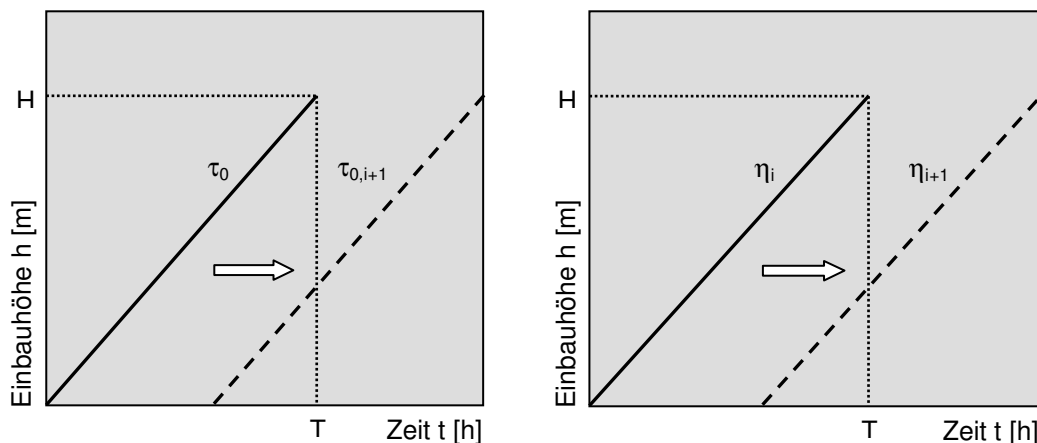


Abb. 3: Zeit- und Füllhöhenabhängigkeit von Fließgrenze und plastischer Viskosität (Fließgrenzen- und Viskositätsverlauf)

In Abbildung 3 bezeichnen H die Schalungs- und damit die Gesamtbefüllungshöhe sowie T die dazugehörige Zeit des Einbau- bzw. Befüllendes. Die Größe bzw. der Wert einer bestimmten Fließgrenze $\tau_{0,i}$ bzw. plastischen Viskosität η_i an einer bestimmten Höhe $h_{\tau_{0,i}}$ bzw. h_{η_i} ergibt sich aus den Gleichungen (2) bzw. (3).

$$h_{\tau_{0,i}} = v \cdot t_i \quad (2)$$

$$h_{\eta_i} = v \cdot t_i \quad (3)$$

mit:

h Einbauhöhe des Betons [m]

v Einbaugeschwindigkeit [m/h]

t Einbauzeit bis Erreichen der jeweiligen Einbauhöhe [h]

Die unterschiedliche Verteilung der Fließgrenze τ_0 sowie der Viskosität η über die jeweilige Einbauhöhe h und die damit verbundenen Differenzen Δh_{τ_0} und Δh_{η} resultieren zwar von dem Einbauvorgang her, bleiben jedoch auch über das Einbauende hinweg bestehen.

Darüber hinaus ist jedoch auch eine weitere Überlegung von Bedeutung. Dabei ist hinsichtlich des zeitlichen Fließgrenzenverlaufs zwischen den einzelnen Mischchargen zu unterscheiden. Innerhalb einer Mischcharge bleibt die Fließgrenzenentwicklung gleich (sowohl die dynamische Fließgrenze $\tau_{0,dyn}(t)$ als auch die statische Fließgrenze $\tau_{0,stat}(t)$). Befindet sich die Mischung im Ruhezustand, wirkt die statische Fließgrenze. Hingegen ist bei einem Fließzustand die dynamische Fließgrenze maßgebend, welche aber in einem darauf folgenden Ruhezustand wieder durch die

statische Fließgrenze ersetzt wird. Dies hat zur Folge, dass der bereits in die Schalung eingebaute Beton einer Mischcharge eine über die Höhe konstante statische Fließgrenze $\tau_{0,stat}(t)$ besitzt.

Bei einer Gegenüberstellung zweier verschiedener, d. h. zeitlich versetzt hergestellter Mischchargen, gelten die Ausführungen zu Beginn dieses Abschnittes (d. h. bzgl. des Falls einer über die Schalungshöhe veränderlichen Fließgrenzenverteilung).

3.1.2 Impulswirkung des Betoneinbaus

Wie in Abschnitt 2 gezeigt wurde, konnte bis zum heutigen Zeitpunkt noch keine, dem Einbau- und Stoffverhalten Rechnung tragende Erklärung für die Wirkung des Frischbetoneinbaus und dem damit verbundenen Einfluss der Steiggeschwindigkeit v hergeleitet werden. Bisher ist es noch keiner Modellvorstellung gelungen, die einbaumechanischen Effekte der Schalungsbefüllung zu beschreiben und damit zu berücksichtigen. Der nachfolgende Abschnitt beschreibt den dynamischen Einfluss der Einbaugeschwindigkeit v .

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. Dieser Vorgang wird in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Jedoch ist die Wirkungsweise aufgrund des Verdichtungsvorgangs für den Einbau von NB entsprechend verändert.

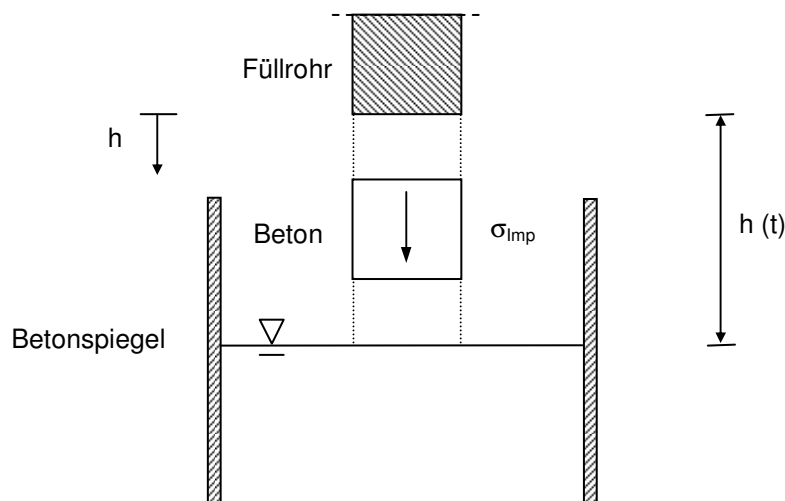


Abb. 4: Impulswirkung aufgrund des Betoneinbaus

Aus Abbildung 4 ergibt sich die Herleitung der zusätzlichen Auflast F_{imp} [N] bzw. der daraus resultierenden Spannung σ_{imp} [N/m^2] infolge einer Betoniergeschwindigkeit v [m/s] sowie dem für die Modellvorrichtung maßgebenden Querschnitt A [m^2] und einer Frischbetondichte ρ [kg/m^3] gemäß den Gleichungen 4 bzw. 5 zu

$$F_{imp} = \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{imp} = \rho \cdot v^2 \quad (5)$$

Diese zusätzliche Impulsauflast wirkt nur während des Betoneinbaus und ist konstant über diesen gesamten Zeitraum. Abbildung 5 veranschaulicht die Einwirkung der zusätzlichen Geschwindigkeits- bzw. Einbauauflast graphisch.

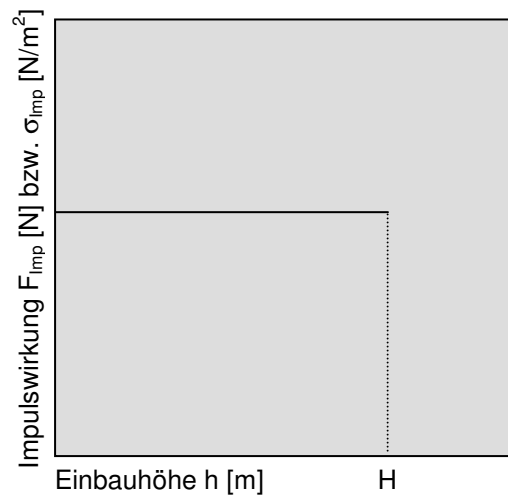


Abb. 5: Einwirkleistung der Einbauauflast F_{imp} bzw. Einbauspaltung σ_{imp} während des Betoneinbaus

3.2 Zeitliche Entwicklung der rheologischen Betoneigenschaften

Da bis zum heutigen Zeitpunkt kaum derartige Kenntnisse existieren, ergaben zahlreiche eigene rheologische Untersuchungen für verschiedene Betone (NB, SVB) eine lineare Abhängigkeit der Fließgrenze τ_0 über die Zeit t [7]. Bis zum Einsetzen des Erstarrungsprozesses ist diese funktionale Beziehung gültig. Diese Abhängigkeit wird für SVB auch in [36] bestätigt. Aufgrund ihres relativ geringen Betrages bzw. ihres Fehlens kann dabei für SVB die zu Beginn des Einbauprozesses vorhandene Fließgrenze $\tau_{0,i}$ vernachlässigt werden. In diesem Fall wird der SVB wie ein Bingham-Fluid betrachtet. Gleichung 6 beschreibt die o. g. prinzipielle funktionale Abhängigkeit (und damit sowohl der dynamischen als auch der statischen Fließgrenze, s. Abschnitt 3.1.1):

$$\tau_0(t) = \tau_{0,i} + C_{\tau_0} \cdot t \quad (6)$$

Dabei bezeichnet C_{τ_0} die Fließgrenzenkonstante $[N/(mm^2 \cdot s)]$, die den zeitlichen Verlauf der Fließgrenze τ_0 charakterisiert. Die funktionale Abhängigkeit der Fließgrenze τ_0 von der Zeit t wird in Abbildung 6 sowohl für NB als auch für SVB graphisch dargestellt. Für SVB bestätigt Gleichung 6 die Erkenntnisse von [36] hinsichtlich der Thixotropie.

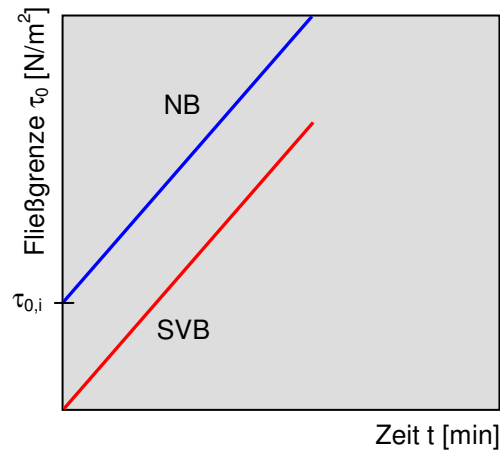


Abb. 6: Funktionale Abhängigkeit der Fließgrenze von der Zeit

Dabei ist zu beachten, dass, je nach der Art des eingesetzten Rheometers, die Fließgrenze τ_0 auch in der Einheit [Nmm] angegeben werden kann [7].

3.3 Ansatz für die Bestimmung des Frischbetondrucks

3.3.1 Kräftegleichgewicht in der Schalung

Gemäß seiner rheologischen Einteilung wird der Werkstoff Beton grundsätzlich als Bingham-Fluid betrachtet. Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben wurde, kann SVB bei sehr geringer oder fehlender Fließgrenze τ_0 vereinfacht auch einem Newton-Fluid entsprechen. Für das dargestellte Materialmodell wird das Kräftegleichgewicht ähnlich dem Scheibenelementverfahren bzw. der Janssen-Gleichung [29] angesetzt. Jedoch wird bei dem vorliegenden Materialmodell, anstelle der bei Silo-Theorie wirkenden Schubspannung bzw. Reibung τ_w zwischen Schüttgut und Silowand, in gleicher Richtung die Fließgrenze τ_0 angesetzt. Dabei wird die Fließgrenze τ_0 , gemäß ihrer Definition, als diejenige Spannung betrachtet, die überwunden werden muss, bevor der Beton fließen kann. Aufgrund der Schalungskonstruktion und der Lage des eingebauten Betons in der Schalung ist seine Hauptfließrichtung vertikal, in Richtung Schalungsboden. Dementsprechend versucht der Beton hauptsächlich in vertikaler Richtung zu fließen. Aufgrund der im Verhältnis zu den Schalungsabmessungen sehr geringen Verformungen kann die horizontale Fließrichtung vernachlässigt werden. Es wird der Grenzzustand in Ruhe betrachtet, d. h. der Beton erreicht gerade seine charakteristische Fließgrenze τ_0 . Bei Verbleiben in der Schalung wird diese Fließgrenze τ_0 jedoch nicht überschritten. Demzufolge ergibt sich das Kräftegleichgewicht an einem Scheibenelement der Breite b gemäß Abbildung 7. Der Befüllungsbereich (Scherzone) wird aufgrund seiner geringen Höhe vernachlässigt. Des Weiteren wird an dieser Stelle aus Gründen der Vereinfachung die Höhenabhängigkeit der Fließgrenze τ_0 nicht berücksichtigt und stattdessen für den weiteren Rechengang ein Mittelwert verwendet. Die Funktion für die Höhenabhängigkeit der Fließgrenze τ_0 ergibt sich durch Einsetzen der Beziehung $t = h/v$ in Gleichung 6 des vorangegangenen Abschnitts. Bei der ausführlichen Frischbetondruckermittlung in [7] wird dies bei allen nachfolgenden Gleichungen, insbesondere den Gleichungen 8 und 9, berücksichtigt. Dementsprechend ergeben sich

bei einer ausführlichen Darstellung für den Zustand des Betoneinbaus und der befüllten Schalung unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der Integration über die Höhe h [7].

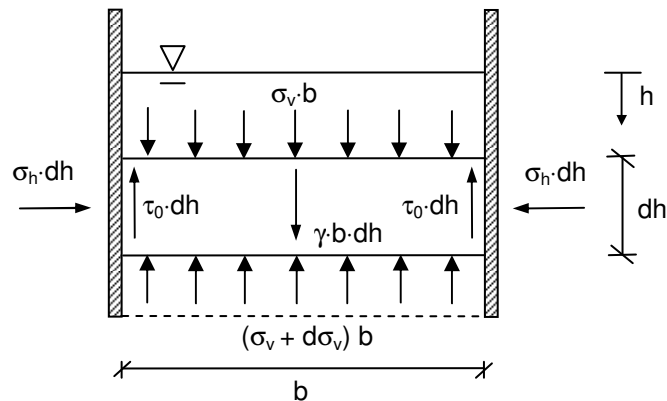


Abb. 7: Kräftegleichgewicht am Scheibenelement der Schalung

Dementsprechend ergibt sich für die Summe aller Kräfte bzw. Spannungen in vertikaler Richtung (h -Richtung) gemäß Gleichung 7:

$$\sigma_v \cdot b + \gamma \cdot b \cdot dh = b \cdot (\sigma_v + d\sigma_v) + 2 \cdot \tau_0 \cdot dh \quad (7)$$

mit:

- σ_v Vertikalspannung [kN/m^2]
- b Schalungsdicke [m]
- γ Frischbetonrohichte [kN/m^3]
- h Einbauhöhe [m]
- τ_0 Fließgrenze [N/m^2]

Daraus ergibt sich folgende Darstellung nach Gleichung 8:

$$\sigma_v \cdot b + \gamma \cdot b \cdot \int dh = b \cdot \sigma_v + b \cdot \int d\sigma_v + 2 \cdot \tau_0 \cdot \int dh \quad (8)$$

Hinsichtlich der Lösung des in Gleichung 7 aufgestellten Kräftegleichgewichts sind zwei Fälle zu unterscheiden, s. Abschnitt 3.1.1.

1. Fall

Die Verteilung der Fließgrenze wird über die Schalungshöhe als konstant angesehen. Für diese Annahme entfällt die Integration von τ_0 in den Gleichungen 7 und 8. Diese Lösung ergibt sich weniger aus dem Ansatz eines Scheibenelementes, sondern vielmehr aus dem Kräftegleichgewicht bei Betrachtung des Spannungszustands der gesamten Schalung (auf dessen Darstellung in Form einer Abbildung an dieser Stelle verzichtet werden soll), welches hier aus mathematischer Sicht eher empfohlen wird.

Unter Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit von τ_0 beträgt dann die resultierende vertikale Spannung σ_v nach Gleichung 9:

$$\sigma_v = \gamma \cdot h - 2 \cdot \tau_0(t) \cdot h/b \quad (9)$$

Unter Vernachlässigung der Veränderlichkeit der Fließgrenze τ_0 über die Höhe h aufgrund ihrer Zeitabhängigkeit aus Gleichung 6 ergibt sich, bei gleichzeitiger Nichtberücksichtigung der Scherzone, für den Zustand des Betoneinbaus mit der Einbauzeit t ($h = v \cdot t$):

$$\sigma_v = \gamma \cdot h - 2 \cdot \tau_{0,1} \cdot h/b - 2 \cdot C_{\tau_0} \cdot h^2/(b \cdot v) \quad (10)$$

Für den Zustand der befüllten Schalung ergibt sich dementsprechend:

$$\sigma_v = \gamma \cdot h - 2 \cdot \tau_{0,1} \cdot h/b - 2 \cdot C_{\tau_0} \cdot h \cdot t/b \quad (11)$$

Wie aus den Gleichungen 10 und 11 zu erkennen ist, wird dabei die Anfangsfließgrenze $\tau_{0,1}$ berücksichtigt, welche jedoch in der Regel (sowohl für NB als auch für SVB) vernachlässigt werden kann.

2. Fall

Die oben dargestellten Gleichungen ermöglichen somit die Beschreibung des Frischbetondruckverhaltens für den Einbauprozess sowie für die befüllte Schalung. Jedoch kann auch für eine detaillierte Beschreibung des Einbauprozesses die Höhenabhängigkeit der Fließgrenze τ_0 bei der zugehörigen Integralrechnung berücksichtigt werden, s. [7]. Dabei muss beachtet werden, dass auch hinsichtlich der in Gleichung 8 erforderlichen Integration zwischen dem Einbauzustand mit $\tau_0(t, h)$ und der befüllten Schalung mit $\tau_0(t)$ unterschieden werden muss. Die während des Einbauvorgangs zu integrierende Funktion $\tau_0(t, h)$ ergibt sich – unter Berücksichtigung der Beziehung $h = v \cdot t$ und bei Vernachlässigung von $\tau_{0,1}$ sowie der Scherzone (bei SVB) bzw. des Verdichtungsbereichs (bei NB) – nach Gleichung 12 zu:

$$\tau_0(t, h) = (C_{\tau_0} \cdot t \cdot h)/H = (C_{\tau_0} \cdot h^2)/(H \cdot v) \quad (12)$$

mit:

H Gesamthöhe der zu befüllenden Schalung [m]

Für diesen Fall muss die Fließgrenzenveränderlichkeit über die Schalungshöhe bei der Lösung der Gleichungen 7 bzw. 8 mit berücksichtigt werden.

Die Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit der Fließgrenze (Gleichung 6) in Gleichung 7 führt unter der Vernachlässigung von $\tau_{0,1}$ zu Gleichung 13 (mit $h = v \cdot t$):

$$\sigma_v = \gamma \cdot h - C_{\tau_0} \cdot h^2/(b \cdot v) \quad (13)$$

Für den Zustand der befüllten Schalung ergibt sich dementsprechend:

$$\sigma_v = \gamma \cdot h - 2 \cdot C_{\tau_0} \cdot h \cdot t/b \quad (14)$$

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Rechenschritte von den Gleichungen 10 bzw. 11 ausgehend vereinfacht weitergeführt. Die Ermittlung der Horizontalspannungen aus den

Gleichungen 13 und 14 ergibt sich entsprechend. Die zugehörigen Gleichungen für eine Berücksichtigung der Scherzone bzw. des Verdichtungsbereichs sowie der Fließgrenzenfunktion $\tau_0(t, h)$ können [7] entnommen werden. Bei Bedarf müssen in dem oben dargestellten Ansatz (Gleichung 7) zusätzliche Reibungs- und Dauerlasteinflüsse berücksichtigt sowie die sich daraus ergebenden Kräfte bzw. Spannungen entsprechend angesetzt werden, s. [7]. Des Weiteren kann der Ansatz nach Gleichung 7 entsprechend der Janssen-Gleichung [29] durch ein Ersetzen des Parameters Schalungsdicke b in Gleichung 7 anhand des Parameters Schalungsquerschnittsfläche A sowie ein Ersetzen des Faktors 2 aus dem Term $2 \cdot \tau_0 \cdot dh$ in Gleichung 7 durch den Parameter Schalungsumfang U ausgedrückt werden, s. [7].

3.3.2 Berücksichtigung des Seitendruckbeiwertes

Wie aus Abbildung 7 ersichtlich, wirkt bei dem betrachteten Scheibenelement in vertikaler Richtung die Spannung σ_v . Die Spannung des Frischbetons in horizontaler Richtung σ_h resultiert aus dieser hauptsächlich infolge Eigengewicht verursachten Vertikalspannung σ_v . Der Beiwert λ beschreibt aufgrund der Abhängigkeit der Horizontalspannung σ_h von der Vertikalspannung σ_v das Verhältnis dieser beiden Spannungen zueinander anhand des sog. Horizontallastverhältnisses bzw. Seitendruckverhältnisses. Er ergibt sich nach Gleichung 15 zu:

$$\lambda = \sigma_h / \sigma_v \quad (15)$$

mit:

λ	Seitendruckbeiwert [-]
σ_h	Horizontalspannung [kN/m ²]
σ_v	Vertikalspannung [kN/m ²]

In Abhängigkeit des in die Schalung eingebauten Materials variiert der Wert von λ . Während Fluide generell und damit auch Newtonsche-Fluide durch ein Horizontallastverhältnis von 1 charakterisiert sind, beträgt das Horizontallastverhältnis eines ideal steifen Festkörpers 0. Ein SVB ohne Fließgrenze τ_0 zeichnet sich demzufolge ebenfalls durch ein Seitendruckverhältnis von 1 aus. Mit zunehmender Fließgrenze τ_0 erfährt der Werkstoff Beton eine dementsprechende Abminderung des Beiwertes λ .

Für die Ermittlung des Seitendruckverhältnisses der untersuchten Betone wird die Betrachtungsweise eines Kontinuums angenommen. Folglich wird an dieser Stelle zur Herleitung des Seitendruckbeiwertes λ und seiner Variierung die Kontinuumsmechanik hinzugezogen. Mit Hilfe des Mohrschen Spannungskreises, einer Darstellungsmöglichkeit von Normal- und Schubspannungen auf einer in einem bestimmten Winkel α geneigten Schnittfläche, lässt sich die Beziehung zwischen Horizontalspannung σ_h und Vertikalspannung σ_v sowie der vorhandenen Fließgrenze τ_0 geometrisch veranschaulichen [7]. Für hydrostatische Druckverhältnisse ergibt sich in dem Mohrschen Spannungskreis aufgrund der Unabhängigkeit von dem Schnittwinkel α der Spannungsebenen lediglich ein Punkt. Für den generell vorliegenden Fall eines Bingham-Fluides werden sowohl die Horizontal- als auch die Vertikalspannung als Hauptspannungen $\sigma_1 (= \sigma_v)$ und $\sigma_2 (= \sigma_h)$ in dem Mohrschen Spannungskreis dargestellt. Die Fließgrenze τ_0 ergibt sich dabei als die dazugehörige maximale Schubspannung τ_{max} , s. Abbildung 8.

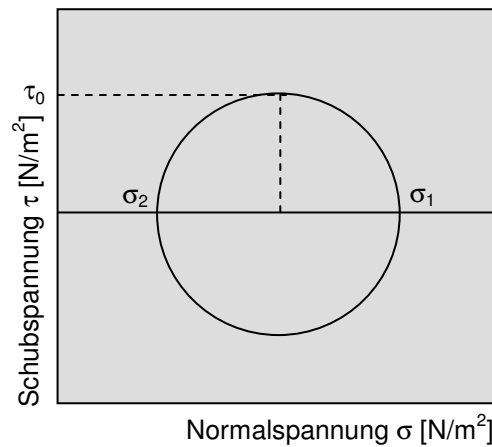


Abb. 8: Bestimmung des Seitendruckverhältnisses auf der Grundlage des Mohrschen Spannungskreises

Aus der Beziehung des Mohrschen Spannungskreises resultiert nach Abbildung 8 unter der o. g. Bedingung die Horizontalspannung σ_h entsprechend Gleichung 16:

$$\sigma_h = \sigma_v - 2 \cdot \tau_0 \quad (16)$$

Damit beträgt das entsprechende Seitendruckverhältnis λ :

$$\lambda = \sigma_h / \sigma_v = 1 - 2 \cdot \tau_0(t) / \sigma_v \quad (17)$$

Aus Gleichung 17 ist ersichtlich, dass aufgrund der funktionalen Abhängigkeiten der Seitendruckbeiwert λ weder eine Konstante über die Höhe h noch über die Zeit t darstellt. Bei einer ausführlichen Darstellung des Seitendruckverhältnisses λ nach Gleichung 17 muss aufgrund des Schalungsbefüllungsvorgangs die Fließgrenzenfunktion $\tau_0(t, h)$ (s. Gleichung 12) mit berücksichtigt werden, s. [7].

Im Folgenden wird auf der sicheren Seite liegend auf eine Integration des Seitendruckbeiwertes λ über die Schalungshöhe verzichtet, welche evtl. jedoch für den 2. Fall in Abschnitt 3.3.1 berücksichtigt werden könnte, s. [7].

3.3.3 Berücksichtigung der Rückstellspannung bzw. des Bettungsmoduls

Ein weiterer Parameter, der zur Bestimmung der Horizontalspannung σ_h berücksichtigt werden muss, ist neben dem Seitendruckbeiwert λ die Rückstellspannung $\sigma_{\text{Rück}}$. Sie ist diejenige Spannung, die es dem in der Schalung belassenen Beton ermöglicht, infolge Schalungsverformung seitlich zu fließen. Demzufolge spielt bei gleicher Biegesteifigkeit EI die Länge l eines jeden Feldes der Schalungskonstruktion eine maßgebende Rolle. Vom Prinzip her lässt sich die Rückstellspannung für den Anwendungsfall der Schalung entsprechend dem Prinzip einer Rückstellkraft z. B. eines Federpendels veranschaulichen, s. Gleichung 18. Die nachfolgende Gleichung zeigt das grundsätzliche Prinzip der Wirkungsweise einer Rückstellkraft und damit ihrer entsprechenden Spannung:

$$F_{\text{Rück}} = - D \cdot s \quad (18)$$

mit:

$F_{\text{Rück}}$	Rückstellkraft [N]
D	Federkonstante [N/m]
s	Elongation [m]

Die entsprechende Rückstellspannung $\sigma_{\text{Rück}}$ ergibt sich aus der Rückstellkraft $F_{\text{Rück}}$ pro bezogener Flächeneinheit A [m^2].

Dabei besagt das negative Vorzeichen, dass die Richtung der Elongation entgegengesetzt der Wirkrichtung der Rückstellspannung $\sigma_{\text{Rück}}$ gerichtet ist. In den nachfolgenden Abschnitten wird vorausgesetzt, dass sich aufgrund der Schalungsverformung eine entsprechende Wirkung und damit ein druckmindernder Zustand einstellt. Bei einer gleichen Biegesteifigkeit EI der Schalung unterscheiden sich die einzelnen Felder jeweils nur in ihrer Feldlänge l , der darauf wirkenden Seitenlast σ_h sowie der daraus resultierenden Durchbiegung f .

Für eine praxismäßige Umsetzung eignet sich in diesem Zusammenhang die Ermittlung eines Bettungsmoduls, s. Gleichung 19. 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.

$$k = \sigma_h / f \quad (19)$$

mit:

k	Bettungsmodul [kN/m^3]
σ_h	Horizontalspannung [kN/m^2]
f	Schalungsdurchbiegung [mm]

Eine ausführliche Beschreibung kann [7] entnommen werden.

3.3.4 Ermittlung des horizontalen Frischbetondrucks

Unter Vernachlässigung des Bettungsmoduls und des Einbauimpulses ergibt sich der horizontale Frischbetondruck für den Einbauvorgang nach Gleichung 20 zu (für den 1. Fall, Abschnitt 3.3.1):

$$\sigma_h = \gamma \cdot h - 2 \cdot \tau_{0,1} \cdot h / b - 2 \cdot C_{\tau 0} \cdot h^2 / (b \cdot v) - 2 \cdot C_{\tau 0} \cdot h / v \quad (20)$$

mit:

σ_v	Frischbetondruck [kN/m ²]
σ_v	Vertikalspannung [kN/m ²]
b	Schalungsdicke [m]
γ	Frischbetonrohichte [kN/m ³]
h	Einbauhöhe [m]
τ_0	Fließgrenze [N/m ²]
$\tau_{0,1}$	Fließgrenze zu Einbaubeginn [N/m ²]
C_{τ_0}	Fließgrenzenkonstante [N/m ² s]
v	Einbaugeschwindigkeit [m/s]

bzw. unter Vernachlässigung der Fließgrenze $\tau_{0,1}$ zu Einbaubeginn:

$$\sigma_h = \gamma \cdot h - 2 \cdot C_{\tau_0} \cdot h^2 / (b \cdot v) - 2 \cdot C_{\tau_0} \cdot h / v \quad (21)$$

Entsprechend ergeben sich die Schalungsdruckbeanspruchungen für die befüllte Schalung sowie für den 2. Fall in Abschnitt 3.3.1.

Gleichung 21 kann entsprechend umformuliert werden, um die gewonnenen Untersuchungsergebnisse anhand des vorgestellten Materialmodells zu überprüfen. Dementsprechend ergibt sich der dazugehörige Soll-Materialkennwert $C_{\tau_0, \text{soll}}$ (Fließgrenzenkonstante) für die Charakterisierung der Entwicklung der Fließgrenze τ_0 .

3.4 Abgrenzung zu bestehenden Modellvorstellungen

Neben weiteren Einflussparametern wird der Frischbetondruck hauptsächlich durch seine spezifische Wichte und Kohäsion, die Betoniergeschwindigkeit sowie die Schalungssteifigkeit beeinflusst. Demzufolge ist der Frischbetondruck in erster Linie abhängig von den rheologischen Eigenschaften des Betons, den stationären und instationären Druckeigenschaften sowie der Schalungssteifigkeit und -verformbarkeit. Aufgrund eines fehlenden physikalischen Materialmodells wurden diese Aspekte bis zum heutigen Zeitpunkt hinsichtlich der Modellierung des Frischbetondruckverhaltens verschiedener Betone nicht ausreichend berücksichtigt.

Daraus ergibt sich die Betrachtung von maßgebenden Kriterien. Grundlage für eine physikalische Beschreibung des allgemeinen Frischbetondruckverhaltens ist zunächst die Einbeziehung der rheologischen Eigenschaften des Betons. Ohne diese Charakteristik ist eine physikalisch zutreffende Modellerstellung nicht möglich, was für die meisten Untersuchungen bzw. Modellvorstellungen zutreffend ist. Erst seit kurzer Zeit wurde dies in vereinzelt Untersuchungen berücksichtigt [4, 31, 36, 53, 54]. Jedoch haben diese die zusätzlichen essentiellen Parameter gar nicht bzw. nicht ausreichend berücksichtigt.

Infolgedessen beinhaltet, wie im nachfolgenden Abschnitt gezeigt wird, das vorgestellte Materialmodell erstmalig für jede Betonart alle drei maßgebenden Einflussparameter, deren sich gegenseitig beeinflussende Wirkung das Frischbetondruckverhalten hauptsächlich bestimmt.

Die Analyse der Ergebnisse der Frischbetondruckversuche unter Berücksichtigung der Erkenntnisse zur Rheologie des Betons ermöglichte es, ein allgemeingültiges Werkstoffmodell zur Beschreibung des Schalungsdruckverhaltens von Beton im Einbauzustand und befüllten Zustand zu entwickeln. Die Einarbeitung der neuen Erkenntnisse der einzelnen Einflussparameter in das Materialmodell erfolgte durch die Einführung zusätzlicher rheologischer Kenngrößen, die Entwicklung neuer Materialkennwerte sowie die Zuweisung geeigneter Druckfunktionen an die Kenngrößen und Materialkennwerte.

Die Beschreibung des auf diese Weise entwickelten Werkstoffmodells basiert auf den entsprechenden mathematischen Ausdrücken und wurde zu einem Stoffgesetz zusammengefasst. Anschließend wurde das Stoffgesetz kalibriert und verifiziert [7].

Den Abschluss bildete die Herleitung praxisgerechter Beziehungen zur Beschreibung des allgemeinen horizontalen Frischbetondruckverhaltens verschiedener Betone [7].

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Allgemeines

Im Mittelpunkt der durchzuführenden Untersuchungen stand die Entwicklung eines allgemeingültigen Stoffgesetzes für die horizontale Schalungsbeanspruchung durch Frischbetondruck, welches den stoffspezifischen rheologischen Eigenschaften – von u. a. sowohl NB als auch SVB – Rechnung trägt und somit auf einer abgesicherten physikalischen Grundlage beruht.

Eine ausführliche Dokumentation der Vorgehensweise ist [7] zu entnehmen. Dazu wurde eine entsprechende Modellvorrichtung speziell zur Simulation der Schalungsbelastung durch Frischbetondruck konstruiert. Anhand dieses Wandträgerschalungsmodells ist es möglich, verschiedene Betonierhöhen zu simulieren und die daraus resultierenden Belastungs- und Spannungszustände zu erfassen.

Zur Gewinnung neuer Erkenntnisse über den Einfluss des rheologischen Verhaltens auf den Frischbetondruck, wurden die während der Frischbetondruckuntersuchungen auftretenden rheologischen Eigenschaften erfasst. Eine detaillierte Beschreibung ist [7] zu entnehmen.

Aufbauend auf den Ergebnissen der experimentellen und rheologischen Untersuchungen wurde ein physikalisch begründetes Modell entwickelt, auf dessen Grundlage das angestrebte Stoffgesetz formuliert worden ist.

4.2 Versuchsprogramm

Die hier dargestellte Untersuchung der Beeinflussung des Frischbetondrucks durch die rheologischen Eigenschaften, der Einbaugeschwindigkeit sowie der Schalungsverformung erfolgte exemplarisch aufgrund des aktuellen Interesses an einem SVB. Weitere Untersuchungen verschiedener Betonarten sind [7] zu entnehmen.

Die Konstruktion der Modellvorrichtung ermöglichte die gleichzeitige Erfassung der Frischbetonschalungsdrücke und der dazugehörigen Schalungsverformungen. Die rheologischen Untersuchungen wurden anhand eines Rotations-Rheometers durchgeführt [7].

In [7] erfolgt eine ausführliche Darstellung der einzelnen Parameter des Untersuchungsprogramms. Gleichsam sind darin auch die grundsätzlichen Überlegungen für Ihre jeweilige Gewichtung dargestellt sowie eine eingehende Beschreibung der betontechnologischen Untersuchungen bzw. Frischbetonuntersuchungen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die ermittelten Mess- und untersuchten Prüfparameter.

Tab. 2: Übersicht über das Versuchsprogramm der Frischbetondruckbeanspruchung

Messgrößen	p-t → γ, τ_0, η, f	
Betonart	SVB	
	SVB I	SVB II
Steiggeschwindigkeit [m/h]	$v_1 = 7$	$v_2 = 56$

Neben der Erfassung der vorgegebenen Wichte γ erfolgte die Messung die Erfassung der rheologischen Eigenschaften anhand eines Rotations-Rheometers. Die Messung der Schalungsverformung und damit der resultierenden Durchbiegung f erfolgte anhand von DMS. Die Einbaugeschwindigkeiten für den SVB betragen $v_1 = 7$ m/h sowie $v_2 = 56$ m/h [7].

4.3 Versuchsaufbau und Messeinrichtung

Die Versuche zur Bestimmung des Frischbetonverhaltens wurden an einer konventionellen Trägerschalung mit den Abmessungen 150 cm x 200 cm x 40 cm (Länge x Breite x Dicke) durchgeführt. Obwohl die Höhe der Trägerschalung lediglich 1,50 m betrug, wurden Schalungshöhen von bis zu 6 m durch Aufbringen einer Auflast simuliert. Zur Simulation der einzelnen Einbauhöhen wurde ein spezieller Stahlrahmen entworfen, an dem eine hydraulische Zylinderpumpe angebracht war, s. Abbildung 10.

Die vertikale Lastaufbringung ergibt sich entsprechend nachfolgendem Prinzip: In Abhängigkeit von der Dichte des jeweiligen Betons werden die den einzelnen Einbauhöhen entsprechenden Lasten

rechnerisch ermittelt und anschließend unter Verwendung der hydraulischen Zylinderpumpe aufgebracht.

Zur Erfassung der Frischbetondruckwerte wurden jeweils drei DMD auf einer gleichen Höhe an der Schalhaut angebracht, s. Abbildung 10. Zur Erfassung der aus dem Frischbetondruck resultierenden Schalungsverformungen wurden gleichsam DMS an der zweiten Schalhaut den jeweils entsprechenden DMD gegenüberliegend befestigt.

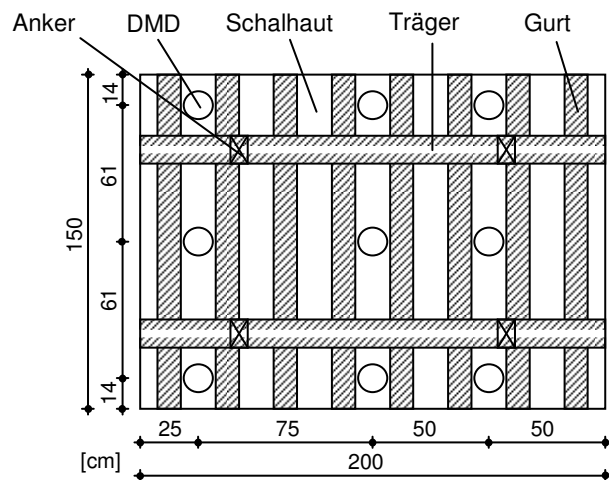
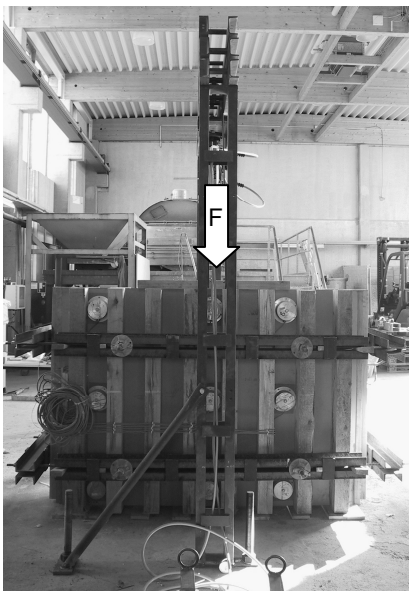


Abb. 10: Versuchsaufbau zur Simulation verschiedener Schalungshöhen, alle Abmessungen in [cm]

4.4 Versuchsergebnisse

Die praxisgerechte Anwendung des vorgestellten Materialmodells soll nun exemplarisch anhand von 2 Beispielen veranschaulicht werden. Aufgrund der Aktualität und des noch großen Forschungsbedarfs soll dies, wie in dem vorangegangenen Abschnitt beschrieben, an einem SVB geschehen. Dieser wurde mit den Geschwindigkeiten ($v_1 = 7 \text{ m/h}$, $v_2 = 56 \text{ m/h}$) in die Schalung eingebaut. Grundsätzlich ist das dargestellte Materialmodell auch für NB gültig und anwendbar [7]. Da bei beiden Versuchen der SVB während des Einbauprozesses nahezu keine Fließgrenze τ_0 aufgewiesen hat sowie $\sigma_{h,rel}$ nahezu 1 war, werden an dieser Stelle exemplarisch die Ergebnisse nach Ende des Betoneinbaus für eine befüllte Schalung dargestellt.

Die vorgestellten Gleichungen aus Abschnitt 3.3.4 gelten sowohl für den Einbauzustand als auch für den Zustand der befüllten Schalung. In dem Einbauzustand wird in den Gleichungen h durch $v \cdot t$ ersetzt. Die Gleichungen erhalten außerdem direkt den Seitendruckbeiwert λ und berücksichtigen damit dessen Veränderlichkeit über die Zeit und Höhe. Die nun folgenden Abbildungen 11 und 12 zeigen beispielhaft die zur Erfüllung des Materialmodells benötigten C_{τ_0} -Sollwerte der Fließgrenzenkonstante und vergleichen diese mit den vorhandenen Istwerten. Die Wirkung der Rückstellspannung muss direkt darin berücksichtigt werden.

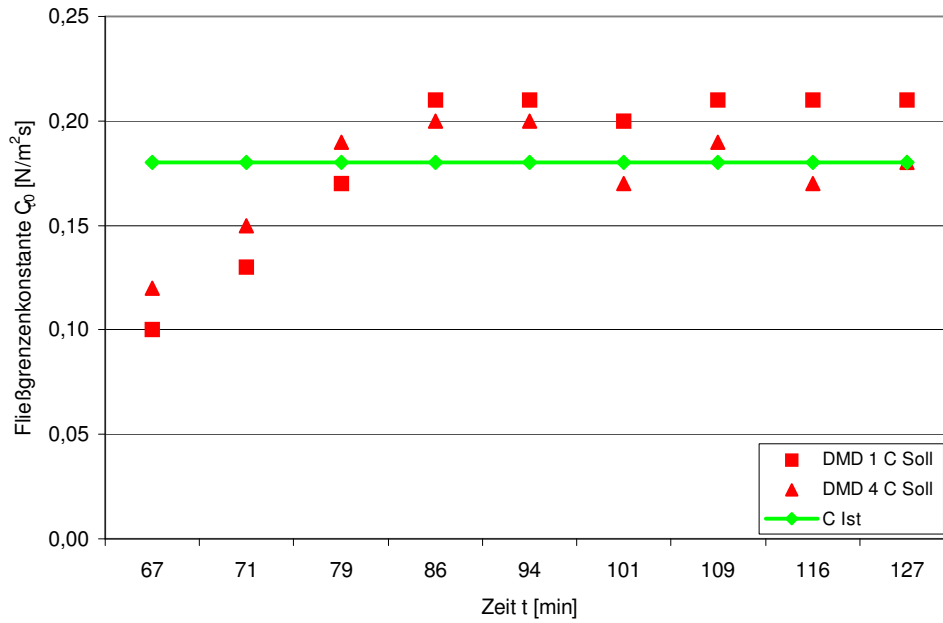


Abb. 11: Vergleich der Soll- und Istwerte der Fließgrenzenkonstante $C_{\tau 0}$ für SVB I

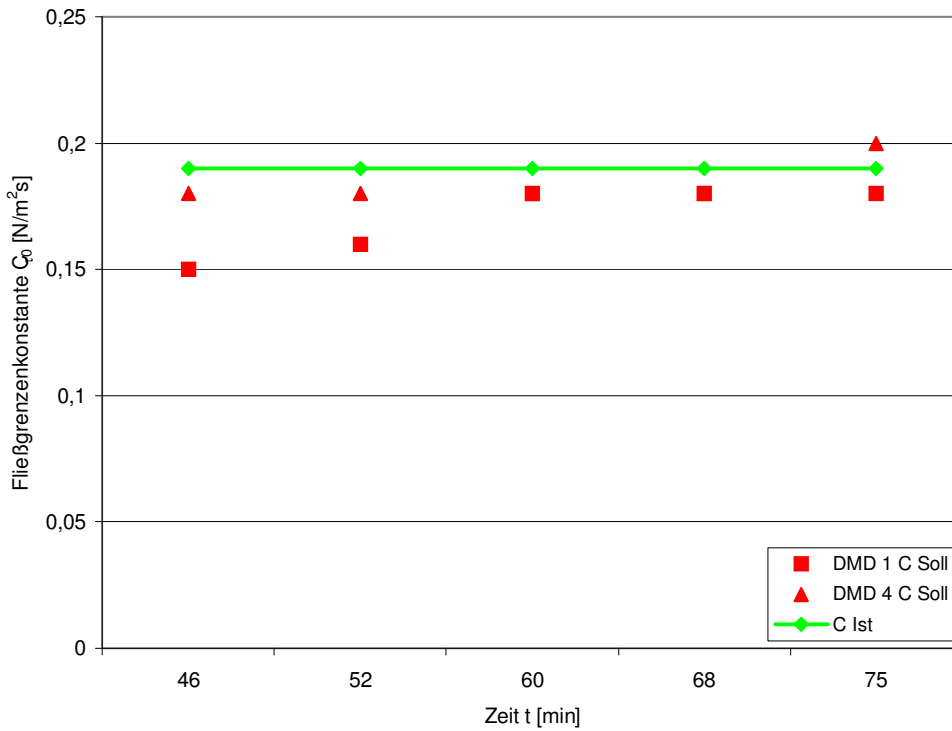


Abb. 12: Vergleich der Soll- und Istwerte der Fließgrenzenkonstante $C_{\tau 0}$ für SVB II

Unter Berücksichtigung der generellen Problematik rheologischer Untersuchungen sowie der Komplexität der experimentellen Untersuchungen ist aus den Abbildungen 11 und 12 ersichtlich, dass die Übereinstimmung der Ist- und Sollwerte der Fließgrenzenkonstante C_{τ_0} sehr gut ist. Die Werte der aus den experimentellen Untersuchungen erhaltenen Fließgrenzenkonstante C_{τ_0} haben die gleiche Größenordnung wie vergleichbare Werte aus der Literatur [36]. Auch dies ist eine zusätzliche Bestätigung für die allgemeine Gültig- und Anwendbarkeit des vorgestellten Materialmodells zur Bestimmung des Frischbetondruckverhaltens. Anhand des vorgestellten Materialmodells lässt sich das Frischbetondruckverhalten demzufolge realitätsnahe und damit praxisgerecht darstellen.

5 Zusammenfassung

Ziel der durchgeführten experimentellen Untersuchungen war die Ableitung eines allgemeingültigen physikalischen Materialmodells zur Beschreibung des Frischbetondruckverhaltens. Dabei wurde ein Stoffgesetz entwickelt, welches unter Berücksichtigung baubetrieblicher und statischer Aspekte auf dem maßgebenden rheologischen Materialverhalten des Betons beruht. Unter Beachtung der jeweiligen einbauspezifischen Aspekte und betontechnologischen Unterschiede bildet das dargestellte Materialmodell die Grundlage zur allgemeinen Beschreibung des Frischbetondrucks unter Berücksichtigung der spezifischen Betoneigenschaften und der damit verbundenen baubetrieblichen Aspekte von NB und SVB. Ein weiterer Vorteil liegt in der Anwendbarkeit und Eignung sowohl für den Einbauvorgang als auch für die befüllte Schalung. Es wurde gezeigt, dass die Entwicklung des Frischbetondrucks hauptsächlich von den rheologischen Eigenschaften des Betons, dem Einbauvorgang sowie der statischen Betrachtung der Schalungskonstruktion bzw. der zu erwartenden Schalungsdurchbiegung abhängig ist.

Es ist ersichtlich, dass unmittelbar auch noch nach Beendigung des Betoneinbaus der Frischbetondruck für SVB annähernd dem hydrostatischen Druck entspricht. Dies ist u. a. auf den thixotropen Eigenschaften des Materials begründet. Mit zunehmendem Zeitfortschritt kommt es aufgrund des einsetzenden Hydratationsprozesses und der zunehmenden Erhöhung der Fließgrenze zu einer Reduzierung des resultierenden Schalungsdrucks. Der Verlauf des Seitendruckbeiwertes λ ist aufgrund seiner Abhängigkeit von der Fließgrenze τ_0 veränderlich über die Schalungshöhe h sowie die Zeit t . Auch ist der Einfluss der Schalungsdurchbiegung auf das resultierende Druckverhalten zu berücksichtigen.

Anhand der sehr guten Eignung des dargestellten Materialmodells sowohl für den Einbauvorgang als auch für die Betrachtung der befüllten Schalung ist diese auch entsprechend für die praxisgerechte Anwendung von u. a. sowohl NB als auch SVB geeignet und sehr einfach einsetzbar. Weiterführende Untersuchungen und Beschreibungen sowie die damit verbundenen Optimierungen sind [7] zu entnehmen.

6 Literatur

- [1] ACI Committee 622 (1958): Pressures on Formwork. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 30, No. 2.
- [2] ACI Committee 347-04 (2004): Guide to Formwork for Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills.
- [3] ACI Committee 347 (2001): Guide to Formwork for Concrete (ACI 347-01). American Concrete Institute, Farmington Hills.
- [4] Assaad, J.; Khayat, K. H.; Mesbah, H. (2003): Variation of Formwork Pressure with Thixotropy of Self-Compacting Concrete. ACI Material Journal, No. 100.
- [5] Beitzel, M. (2004): Modelling fresh concrete pressure on vertical formwork. 5th International PhD Symposium in Civil Engineering, U. Walraven et al. (Hrsg.), Taylor Francis Group, London.
- [6] Beitzel, H.; Beitzel, M.; Müller, H. S.; Uebachs, S. (2006): Zusammenstellung nationaler und internationaler Forschungsergebnisse. DAfStb-Sachstandsbericht Frischbetondruck fließfähiger Betone, C.-A. Graubner et al. (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin.
- [7] Beitzel, M. (2009): Dissertation, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe (TH) (in Vorbereitung).
- [8] Billberg, P. (2003): Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete. Self-Compacting Concrete, RILEM Proceedings PRO 33, Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium, O. Wallevik & I. Nielsson (Hrsg.), RILEM Publications, Bagnex.
- [9] Böhm, H. (1965): Über den Seitendruck des frisch eingebrachten Betons. Beton und Eisen, Heft 18, Berlin.
- [10] Brameshuber, W.; Uebachs, S. (2003): Investigations on the Formwork Pressure Using Self-Compacting Concrete. Self-Compacting Concrete, RILEM Proceedings PRO 33, Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium, O. Wallevik & I. Nielsson (Hrsg.), RILEM Publications, Bagnex.
- [11] Breitenbücher, R. (2001): Erste Erfahrungen mit selbstverdichtendem Beton in der Praxis. Congress Documentation for the 45th Ulm Concrete and Precast Congress, Betonwerk + Fertigteil-Technik, 67. Jahrgang, Heft 1.
- [12] CIB-CEB-FIB (1977): Manual de Technologie, Coffrage.
- [13] CIRIA Research Report Nr. 1 (1965): The pressure of concrete in formwork. Construction Industry Research and Information Association, London.
- [14] CIRIA Research Report Nr. 108 (1985): The pressure of concrete in formwork. Construction Industry Research and Information Association, London.
- [15] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (1980): DIN 18 218 Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen. Beuth Verlag, Berlin.
- [16] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (2003): DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). Beuth Verlag, Berlin.

- [17] Doka Schalungstechnik GmbH: Betonieren mit SVB – Frischbetondruck (unveröffentlicht).
- [18] Doka Schalungstechnik GmbH (2004): Bildmaterial, www.doka.com.
- [19] Drechsel, W. (1950): Die Gleitschalung. Ernst & Sohn, Berlin.
- [20] Ertingshausen, H. (1965): Über den Schalungsdruck von Frischbeton. Schriftenreihe des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau, Heft 5, Technische Hochschule Braunschweig.
- [21] Friedle, R. (2001): Anwendungsbeispiele selbstverdichtender Beton und Schalungsdruck. Congress Documentation for the 45th Ulm Concrete and Precast Congress, Betonwerk + Fertigteil-Technik, 67. Jahrgang, Heft 1.
- [22] Gaede, K. (1944): Zuschrift zu R. Hoffmann „Der Schalungsdruck von frischem Beton“. Beton- und Stahlbetonbau 43, Heft 15/16.
- [23] Graf, O.; Kaufmann, F. (1960): Schalungsdruck beim Betonieren. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 135, Beuth Verlag, Berlin.
- [24] Hauck, H. G. (2001): Hochleistungsverflüssiger für SVB. Herstellung, Transport und Einbau von Selbstverdichtendem Beton (SVB/SCC), Symposium, H. Beitzel (Hrsg.), Institut für Bauverfahrens- und Umwelttechnik (IBU), Föhren.
- [25] Hermann, M. (1984): Gleitbauweise im Stahlbetonbau. Schriftenreihe Baubetrieb und Baumaschinen, Mitteilungen, Heft 7, Technische Universität Berlin.
- [26] Hoffmann, R. (1943): Der Schalungsdruck von frischem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 42, Heft 17/18.
- [27] Hurd, M. K. (2002): Putting the Pressure on Formwork. Concrete International, No. 10.
- [28] Ikäheimonen, J. (1998): Formwork Pressure Due to Self-Compacting Concrete – Measurements on Abutment Breast Walls. TRITA-BKN, Report 55, Department of Structural Engineering, Royal Institute of Technology Stockholm.
- [29] Janssen, H. A. (1895): Versuche über den Getreidedruck in Silozellen. VDI-Zeitschrift, Vol. 39.
- [30] Japan Society of Civil Engineers (1999): Recommendation for Self-Compacting Concrete. University of Tokyo, T. Uomoto & K. Ozawa (Hrsg.).
- [31] Khayat, K. H.; Assaad, J. (2005): Use of Rheological Properties of SCC to Predict Formwork Pressure. Proceedings of the 2nd North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the 4th RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago.
- [32] Leemann, A.; Hoffmann, C. (2003): Pressure of Self-Compacting Concrete on the Formwork. Self-Compacting Concrete, RILEM Proceedings PRO 33, Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium, O. Wallevik & I. Nielsson (Hrsg.), RILEM Publications, Bagneux.
- [33] L'Hermite, R. (1948): La vibration du béton frais. Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Nr. 11.
- [34] Macklin et al. (1958): Discussion of a report by ACI Committee 622 – Pressures on Formwork. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 30, No. 12.
- [35] Noack, P. (1919): Ergebnisse neuer Forschungsarbeiten über die Eigenschaften des Zementbetons und Versuche zur Bestimmung seines Seitendrucks. Technische Hochschule Dresden.

- [36] Ovarlez, G.; Rousset, N. (2006): A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork. *Materials and Structures*, Vol. 39, Springer, Niederlande.
- [37] Österberg, T. (2001): Swedish Experience of Civil Engineering SCC. Self-compacting concrete – Mix design and production in practise, Copies of Slides, Symposium, Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI) Stockholm.
- [38] Proske, T. (2005): Schalungsdruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton – Ein neues Konzept für die Berechnung. 45. DAfStb-Forschungskolloquium – 100. Jahrgang Beton- und Stahlbetonbau, Wien.
- [39] Proske, T. et al. (2006): Berechnungsmodelle und Vergleich der Ansätze. DAfStb-Sachstandsbericht Frischbetondruck fließfähiger Betone, C.-A. Graubner et al. (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin.
- [40] Pürner, E. (1987): Einflüsse auf den Schalungsdruck. *Österreichische Bauzeitung*, Nr. 29.
- [41] Pürner, E. (1999): Selbstverdichtender Beton: Erfahrungen und Erfordernisse. *Beton*, Heft 11.
- [42] Pürner, E. (1999): Qualitätsbeton ohne Rütteln?. *bd Baumaschinendienst*, Heft 11.
- [43] Pusch, G. (1983): Problematik der Frischbetondruckermittlung für vertikale Schalungen. *Betontechnik*, 4, Heft 4.
- [44] Rings, K.-H. (2000): SCC-Einfluß der Ausgangsstoff- und Produktionsschwankungen. *Fachtagung Zement und Beton, Kolloquium – SCC, Beton und Zement*, Nr. 4.
- [45] Ritchie, A. G. B. (1962): The triaxial testing of fresh concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 14, Nr. 40.
- [46] Rodin, S. (1952): Pressure of Concrete on Formwork. *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, Vol. 1.
- [47] Skarendahl, A. (1998): Self-Compacting Concrete in Sweden – Research and Application. *Proceedings of the International Workshop on Self-Compacting Concrete, Kochi, Japan*, K. Ozawa & M. Ouchi (Hrsg.).
- [48] Shunk, F. R. (1909): Pressure of Concrete on Forms. *Engineering News*, Vol. 62, No. 11.
- [49] Specht, M. (1973): Die Belastung von Schalung und Rüstung durch Frischbeton. *Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität Hannover, Werner-Verlag, Düsseldorf*.
- [50] Specht, M. (1981): Der Frischbetondruck nach DIN 18 218 – die Grundlagen und wichtigsten Festlegungen. *Die Bautechnik*, 58. Jahrgang, Heft 8.
- [51] Specht, M. (1987): Theorie des Frischbetondrucks – gegenwärtiger Stand und ungeklärte Probleme. *Bautechnik*, Heft 3.
- [52] Toussaint, E. (1973): Beitrag zur Theorie des Schalungsdruckes. *Mayreder-Zeitschrift*.
- [53] Toussaint, E. (1982): Belastung lotrechter Schalwände durch Frischbeton, *Zement und Beton*. 27, Heft 3.
- [54] Vanhove, Y. et al. (2001): Study of Self-Compacting Concrete Pressure on Formwork. *The 2nd International Symposium of Self-Compacting Concrete, Proceedings, COMS Engineering Coporation, Fukui, Japan*.

- [55] Vanhove, Y.; Djelal, C.; Magnin, A. (2004): Prediction of lateral pressure exerted by self-compacting concrete on formwork. Magazine of Concrete Research, Vol. 56, No. 1.