

**Frischbetondruck unter Berücksichtigung  
der rheologischen Eigenschaften**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTOR-INGENIEURS**

von der Fakultät für

**Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften  
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)**

genehmigte

**DISSERTATION**

von

**Dipl.-Ing. Marc Beitzel**

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung:

3. Dezember 2009

Hauptreferent:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller

Korreferent:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher

Karlsruhe 2009

## Kurzfassung

Zur Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit des Frischbetondrucks bedarf es expliziter Kenntnisse über die auftretenden Einflüsse und deren Implementierung in die Schalungsbemessung. Daher ist es von essentieller Bedeutung, die bestehenden Kenntnislücken hinsichtlich des Zusammenspiels der maßgebenden Einflussparameter zu schließen. In der Baupraxis könnte ein allgemeingültiges Material- bzw. Bemessungsmodell insbesondere die Wirtschaftlichkeit von Betonbaustellen erhöhen. Dies erfordert allerdings ein physikalisches Materialgesetz, das nicht nur die rheologischen Frischbetoneigenschaften, sondern auch die einbaudynamischen und schalungskonstruktiven Aspekte berücksichtigt. Jedoch existiert ein derartiges Materialgesetz derzeit noch nicht.

Demzufolge wurde in der vorliegenden Arbeit ein neues „physikalisches Materialmodell“ zur Beschreibung des Frischbetondrucks erarbeitet, das auf den rheologischen Frischbetoneigenschaften beruht. Darüber hinaus berücksichtigt es die maßgebenden betontechnologischen und schalungsgeometrischen Kenngrößen, welche zur Beschreibung des Frischbetondrucks sowohl von Normalbeton als auch von selbstverdichtendem Betonen von signifikanter Bedeutung sind. Des Weiteren wurde das „physikalische Materialmodell“ hin zu einem „rheologisch-mechanischen Stoffmodell“ erweitert. Ein wesentlicher Schwerpunkt dieses Stoffgesetzes war die Einarbeitung einbaudynamischer und schalungskonstruktiver Zusammenhänge.

Zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen wurde ein Modellschalungssystem entwickelt und konstruiert, das die Simulierung von Einbauhöhen, welche über die effektive Schalungshöhe hinausgehen, ermöglicht. Im Rahmen der Modellschalungssystem-Versuche wurde der Frischbetondruck verschiedener Normalbetone und selbstverdichtender Betone praxisnah simuliert. Dabei wurde der Einfluss der Mischungszusammensetzung, der Einbaugeschwindigkeit, der Schalhautdehnung, der Fließgrenze, der Konsistenz, der Schalungsgeometrie sowie der Betontemperatur untersucht.

Die Verifizierung der Modellschalungssystem-Versuche erfolgte mittels experimenteller Untersuchungen an einer Rahmenschalung. Dabei wurde der Frischbetondruck von selbstverdichtendem Beton ermittelt. Die betrachteten Einflussparameter waren die Einbaugeschwindigkeit und die Konsistenz.

Um eine zielsichere Bestimmung des Frischbetondrucks gewährleisten zu können, wurden unter Einbeziehung der neuen Materialmodelle aus den Ergebnissen der Modellschalungssystem-Versuche und der Rahmenschalungsversuche wichtige Schlussfolgerungen gezogen. Obwohl in der Baupraxis einige dieser Folgerungen bereits bekannt sind, sind diese jedoch gegenüber früheren Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit experimentell abgesichert.

Die neuen Materialmodelle bilden ein Werkzeug, mit dem der Frischbetondruck betonartübergreifend wirtschaftlich beschrieben werden kann.

## **Abstract**

In order to increase the prediction of formwork pressure, the explicit knowledge of the various influences and their implementation into the formwork design process is essential. Therefore, it is of significant importance to complete the actual knowledge with regards to the interaction of the decisive influencing parameters. A universal material model could particularly enhance the economical concrete production. However, this requires a physical approach, which not only considers the rheological fresh concrete properties but also the stationary and unstationary pressure characteristics, as well as the structural formwork reactions.

A new physically sound material model for the description of the general fresh concrete pressure on vertical formwork was developed. This considers the decisive material and formwork geometrical parameters, which are of significant importance for the calculation of the fresh concrete pressure of normal and self-compacting concrete. Furthermore, a rheological-mechanical material model was derived, which additionally implements the mechanical casting influences and the structural formwork characteristics.

To simulate different heights and casting rates, a new formwork model was developed and designed. Applying this formwork model, experiments with varying casting rates were performed in order to analyse the behaviour of the normal and self-compacting concrete's formwork pressure. The investigated parameters were the mixture composition, casting rate, formwork facing strain, yield stress, consistency, formwork geometry and concrete temperature.

A panel wall formwork system was used for the verification of the experimental formwork model results. Within these experiments the formwork pressure of self-compacting concrete was investigated. The influencing parameters were the casting rate and consistency.

For assuring an unerring calculation of the fresh concrete pressure, fundamental conclusions were derived from the formwork model and the panel wall formwork system experiments. Several conclusions have been known to experts for quite some time, but were experimentally ensured within this thesis.

The new material models can be a valuable tool for the economical calculation of the fresh concrete pressure of different kinds of concrete.

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Vorgehensweise	3
<b>2</b>	<b>Literatursichtung</b>	<b>6</b>
2.1	Rheologie frischer zementgebundener Werkstoffe	6
2.1.1	Rheologische Betrachtungsebenen	6
2.1.2	Definitionen	7
2.1.2.1	Rheologische Modelle	9
2.1.2.2	Zeitliche Abhängigkeit von Fließ- und Viskositätsfunktionen	11
2.1.3	Rheologische Einordnung von frischem Zementleim, Mörtel und Beton	12
2.1.3.1	Zeitunabhängiges rheologisches Verhalten	12
2.1.3.2	Zeitabhängige rheologische Eigenschaften	18
2.1.4	Bestimmung rheologischer Kennwerte frischer zementgebundener Werkstoffe	22
2.1.4.1	Allgemeingültige Methoden	22
2.1.4.2	Standardisierte Prüfverfahren für frischen Mörtel und Beton	24
2.1.4.3	Rheometrische Prüfverfahren	25
2.2	Betriebszustände des Betoneinbaus	26
2.3	Schalungstechnik zur Erstellung von Betonbauteilen	27
2.3.1	Klassifikation	27
2.3.2	Schalungselemente und -aufbau	28
2.4	Einflussfaktoren auf den Frischbetondruck	29
2.4.1	Frischbetonrheologie und Konsistenz	32
2.4.2	Einbaugeschwindigkeit	33
2.4.3	Durchbiegung vertikaler Schalungen	34
2.4.4	Folgerungen für die eigenen experimentellen Untersuchungen	35
2.5	Konzepte zur Beschreibung des Frischbetondrucks	36
2.5.1	Bodenmechanische Ansätze	38
2.5.2	Schüttgutmechanische Modelle	41
2.5.3	Hydrostatische Modellansätze	44
2.5.4	Rheologische Konzepte	45
2.5.5	Empirische Modelle	47
2.5.6	Konzepte aus Normen und Richtlinien	48
2.5.7	Schlussfolgerungen	48

<b>3</b>	<b>Experimentelle Frischbetondruckuntersuchungen</b>	<b>51</b>
3.1	Einführung	51
3.2	Übersicht über das Versuchsprogramm	51
3.3	Frischbetondruck in einem Modellschalungssystem	53
3.3.1	Versuchsprogramm	53
3.3.2	Versuchsaufbau und Messtechnik	56
3.3.2.1	Modellschalungssystem zur Simulation der Schalungsbeanspruchung	56
3.3.2.2	Einbauvorrichtung	64
3.3.2.3	Messeinrichtung	65
3.3.3	Versuchsdurchführung	70
3.3.3.1	Zusammensetzung der Mörtel und Betone	70
3.3.3.2	Eigenschaften der Mörtel und Betone	72
3.3.3.3	Herstellung und Einbau der Mörtel und Betone	74
3.3.3.4	Simulation von über die Schalungshöhe hinausgehenden Einbauhöhen	76
3.3.3.5	Kalibrierung der Druckmessdosen	78
3.4	Frischbetondruck von selbstverdichtendem Beton in einer Rahmenschalung	78
3.4.1	Allgemeines	78
3.4.2	Versuchsprogramm	78
3.4.3	Versuchsaufbau und Messtechnik	79
3.4.3.1	Rahmenschalung	79
3.4.3.2	Messeinrichtung	81
3.4.4	Versuchsdurchführung	81
3.4.4.1	Betonzusammensetzung	81
3.4.4.2	Betoneigenschaften	82
3.4.4.3	Betonherstellung und -einbau	83
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion der experimentellen Untersuchungen</b>	<b>84</b>
4.1	Experimentelle Frischbetondruckuntersuchungen in einem Modellschalungssystem	84
4.1.1	Allgemeines	84
4.1.2	Einfluss der Mischungszusammensetzung	84
4.1.3	Abhängigkeit von der Einbaugeschwindigkeit	87
4.1.4	Einfluss der Schalhautdehnung	89
4.1.5	Einfluss von Fließgrenze und Konsistenz	92
4.1.5.1	Parameterwahl	92
4.1.5.2	Fließgrenzenverlauf in Abhängigkeit von der Zeit	93
4.1.5.3	Zeitliche Konsistenzentwicklung	94
4.1.5.4	Frischbetondruck-Zeitbeziehung	96
4.1.6	Verteilung des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe und -breite	99
4.1.7	Einfluss der Betontemperatur	101

4.2	Experimentelle Frischbetondruckuntersuchungen von selbstverdichtendem Beton in einer Rahmenschalung	105
4.2.1	Einfluss der Konsistenz	105
4.2.2	Druckverlauf über die Schalungshöhe und -breite	107
4.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	109
<b>5</b>	<b>Materialmodelle für den Frischbetondruck</b>	<b>112</b>
5.1	Einleitung	112
5.2	Physikalisches Materialmodell	112
5.2.1	Anforderungen an ein ausführliches Materialmodell	112
5.2.2	Herleitung des Stoffmodells	113
5.2.2.1	Grundsätzliche Annahmen und Vorgehensweise	113
5.2.2.2	Kräftegleichgewicht am Scheibenelement einer Schalung	116
5.2.2.3	Einführung des Seitendruckbeiwerts	120
5.2.2.4	Grenzwertbestimmung	123
5.2.2.5	Vertikaler Frischbetondruckverlauf	124
5.2.3	Überprüfung des physikalischen Materialmodells	125
5.2.4	Gegenüberstellung mit aus der Literatur bekannten Berechnungsmodellen	128
5.2.5	Vergleich mit aus Normen und Richtlinien bekannten Konzepten	132
5.3	Rheologisch-mechanisches Stoffmodell	135
5.3.1	Grundsätzliche Erwägungen	135
5.3.2	Ableitung des Materialmodells	135
5.3.2.1	Einarbeitung einbaumechanischer Einflüsse	135
5.3.2.2	Entwicklung schalungskonstruktiver Beziehungen	138
5.3.2.3	Zusammenführung der einbaumechanischen und schalungskonstruktiven Elemente	140
5.4	Zusammenfassung und Diskussion	142
<b>6</b>	<b>Folgerungen für die Baupraxis</b>	<b>144</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>146</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>149</b>
	<b>Anhang</b>	

# 1 Einführung

## 1.1 Problemstellung

Schalungen sind für die Herstellung und Konstruktion von Betonbauteilen und -werken unabdingbar. Ihr Einsatz beeinflusst nicht nur die Wirtschaftlichkeit von Betonbaustellen, sondern auch ihre Sicherheit. So können die verhältnismäßig hohen Lohn- und Materialkosten im Hochbau bis zu ca. 60 % der Rohbaukosten betragen [5]. Zudem kann in Abhängigkeit von ihrer Tragfähig- und Gebrauchstauglichkeit eine unzureichende Dimensionierung ein mögliches Schalungsversagen in sich bergen.

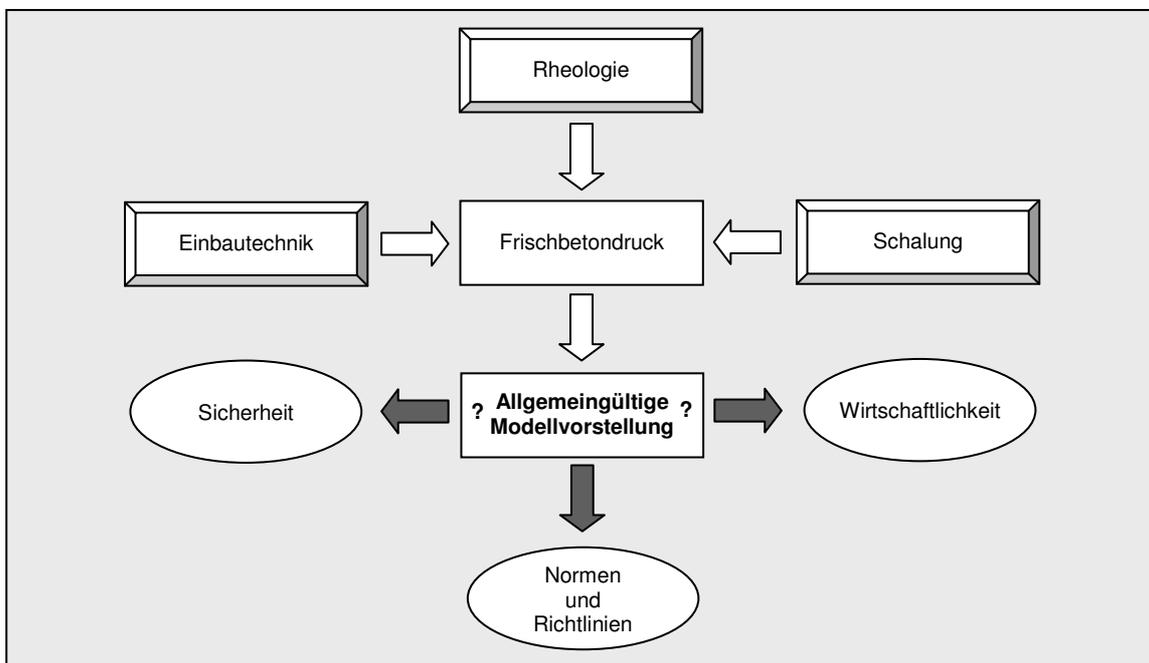
Die Schalungsbelastung ergibt sich in erster Linie aus der Rohdichte des frischen Betons bzw. dem Frischbetondruck. Dessen exakte Größe und Verteilung über die Schalungsgeometrie ist weitgehend unbekannt. Allerdings bedarf es für eine wirtschaftliche und sichere Schalungsbeurteilung umfassender Kenntnisse über die Ausbildung und Entwicklung dieser Beanspruchung. Aufgrund der Bedeutung senkrechter Betonbauteile für die Konstruktion von Bauwerken ist die Bemessung vertikaler Schalungen besonders bei dem Einsatz selbstverdichtender Betone von elementarem Interesse.

Zur Vorhersage und Beurteilung des Frischbetondrucks sind in der Vergangenheit partiell auf experimentellem Wege verschiedene Modellvorstellungen entwickelt und auch teilweise in Normen und Richtlinien eingebunden worden. Obwohl eine Standardisierung von Versuchen zwingend erforderlich wäre, unterscheiden sich die Experimente bezüglich der Messeinrichtung und des Versuchaufbaus zumeist signifikant. Dies erschwert einen objektiven Vergleich der erzielten Ergebnisse.

Zwar sind auf diese Weise Grundlagen zur Bemessung des Frischbetondrucks geschaffen worden. Jedoch ist es trotzdem nicht eindeutig gelungen, die wesentlichen Einflussparameter zu identifizieren. Dies führte z. T. zu widersprüchlichen Frischbetondruckmodellierungen. Bislang wurde dabei meist auf empirische, boden- oder schüttgutmechanische Modelle zurückgegriffen. Insofern wurden nicht nur wesentliche einbauspezifische und schalungskonstruktive Einflussparameter, sondern auch stoffphysikalische Frischbetoneigenschaften außer Acht gelassen. Deshalb genügen diese Bemessungsmodelle den heute erhöhten Ansprüchen in Bezug auf eine sichere und wirtschaftliche Dimensionierung nicht.

Bisher blieben auch intensive Bemühungen erfolglos, die vorhandenen Modellvorstellungen an betontechnologische Neuentwicklungen anzupassen. Aus diesem Grunde sind sie und die auf ihnen beruhenden Normen [7], [46] oder [51] lediglich näherungsweise für Normal-, Schwer- und Leichtbeton anwendbar, nicht aber für neue Betongenerationen und Sonderbetone, insbesondere selbstverdichtenden Beton. Die gültigen Normen und Richtlinien [98] beruhen auf keinem strukturphysikalischen Zusammenhang. Sie besitzen keinen zufrieden stellenden theoretischen Hintergrund und keine ausreichend experimentelle Grundlage. Dies führt zu einer erheblichen Beeinflussung der Schalungsbeurteilung.

Rheologische Modelle erscheinen hingegen erfolversprechend, da sie auf einem stoffphysikalischen Fundament basieren. Darüber hinaus lassen sie gegenüber den bisher entwickelten Modellvorstellungen zum Frischbetondruck eine verbesserte Veranschaulichung zu und sind ihnen infolgedessen vorzuziehen. Hierbei wird eine Beschreibung des Frischbetondrucks ohne Bezugnahme auf klassische Ansätze ermöglicht. Mithin kann auf eine Berücksichtigung zahlreicher bisher betrachteter Einflussparameter, wie z. B. Schalhaut bzw. Trennmittel, verzichtet werden. Die Herleitung stoffphysikalischer Gesetzmäßigkeiten bedarf komplexer und umfassender experimenteller Untersuchungen, in erster Linie bezüglich der maßgebenden Einflussparameter. Gleichzeitig können solche rheologischen Modellvorstellungen sehr leicht auf verschiedene Betonarten übertragen und angewendet werden. Eine derartige physikalische Ableitung ist bereits vereinzelt ansatzweise für selbstverdichtenden Beton gelungen, siehe [130] oder [152].



**Bild 1.1:** Schaubild zur Ableitung einer allgemeingültigen Modellvorstellung zur Bestimmung des Frischbetondrucks

Hinsichtlich einer wirklichkeitsnahen Beschreibung des Frischbetondrucks sind aber nicht nur das alleinige Stoffverhalten, sondern auch dynamische und mechanische Faktoren wie der Einbauvorgang und die Schalungssteifigkeit von Bedeutung. Deshalb bedarf es entsprechend der in Bild 1.1 dargestellten Problemkette auch einer hinreichenden Berücksichtigung dieser Parameter.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines allgemeingültigen physikalischen Materialmodells zur Beschreibung und Bestimmung der Frischbetondruckbeanspruchung lot-rechter Schalungen. Ein derartiges „rheologisches Materialmodell“ soll sich darüber hinaus

durch eine erstmalig wirklichkeitsnahe Erweiterung um dynamische und statische Einflussparameter zu einem „rheologisch-mechanischen Materialmodell“ auszeichnen.

Zum Erreichen des gesetzten Forschungsziels erscheint es sinnvoll, dass als Ausgangspunkt und Arbeitshypothese – entsprechend den Prinzipien der Kontinuumsmechanik – unter Einbeziehung der rheologischen Materialeigenschaften ein Kräftegleichgewicht an einem Scheibenelement der Schalhaut angesetzt wird. Die einzelnen Parameter des gewählten Ansatzes sollen den Anforderungen an einen mittels umfassender experimenteller Untersuchungen neu zu erarbeitenden, erweiterten Kenntnisstand genügen. Zur Durchführung der Versuche soll eine Versuchseinrichtung entwickelt werden, welche eine zukünftige experimentelle Standardisierung erleichtert.

Trotz der komplexen und diffizilen Thematik soll der neuartige Ansatz zur Ableitung einer ausreichend präzisen Methode zur Frischbetondruckvorhersage zu einer logischen und allgemeingültigen Formulierung führen. Diese dient im Idealfall als Grundlage für die Ableitung eines vereinfachten Bemessungskonzeptes. Daher müssen aufgrund der u. a. großen Abweichungen bisheriger experimenteller Ergebnisse voneinander sowie der bestehenden Wissensdefizite auch vereinfachte Annäherungen ausgewählt und verwendet werden.

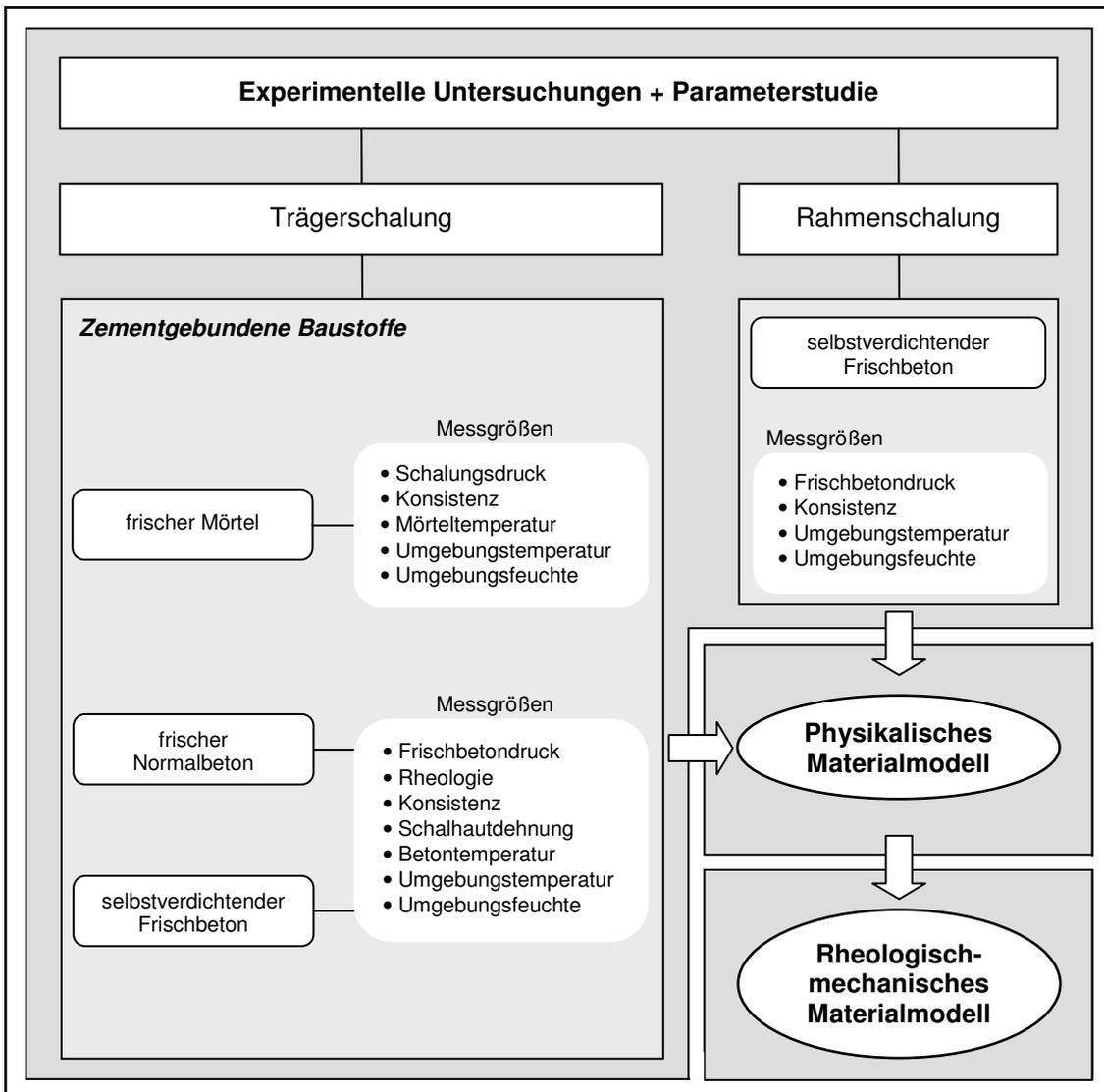
### 1.3 Vorgehensweise

Auf die Einführung in *Kapitel 1* folgt anhand der Literatursichtung in *Kapitel 2* die Bildung und Analyse des Fundaments zur erfolgreichen Behandlung der in Abschnitt 1.1 veranschaulichten Problematik.

Die weitere prinzipielle Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit ist in Bild 1.2 schematisch abgebildet. Entsprechend der gewählten Methodik erfolgt zunächst die Durchführung eines umfassenden experimentellen Untersuchungsprogramms, bei dem sowohl eine Trägerschalung als auch eine Rahmenschalung zum Einsatz kommen.

In *Kapitel 3* werden die experimentellen Untersuchungen zum Frischbetondruck beschrieben. Hierbei werden sowohl frischer Mörtel (mit und ohne Fließmittel) als auch Frischbeton (konventionell und selbstverdichtend) betrachtet. Um einheitliche Versuchsbedingungen und eine sorgfältige Erfassung sämtlicher Einflussparameter zu gewährleisten, wird zuvor erstmals eine spezielle Simulationsmodellvorrichtung entwickelt. Diese wird im Rahmen der Versuchsdurchführung zusammen mit der Trägerschalung kombiniert und ermöglicht somit bei frei steuer- sowie kontrollierbaren Einbaugeschwindigkeiten die wirklichkeitsnahe Abbildung unterschiedlicher Einbauhöhen. Hierbei wird der Einbau „von oben“ betrachtet. Im Rahmen der Versuchsdurchführung werden die Parameter Schalungs- bzw. Frischbetondruck, Ausbreit- (Normalbeton bzw. -mörtel) bzw. Setzfließmaß (selbstverdichtender Beton bzw. Mörtel), Baustofftemperatur, Umgebungstemperatur und -feuchte erfasst. Darüber hinaus werden für die Untersuchungen mit frischem Normalbeton bzw. selbstverdichtendem Beton die Parameter Schalhautdehnung, Fließgrenze (und damit indirekt der Einfluss zahlreicher bisher betrachteter Einflussparameter wie z. B. der Gesteinskörnung) ermittelt. Neben der

Berücksichtigung der rheologischen Baustoffeigenschaften liefert die differenzierte Betrachtung dynamischer und mechanischer Parameter wichtige Erkenntnisse über den effektiven Frischbetondruck.



**Bild 1.2:** Schaubild zur Vorgehensweise im Rahmen der Forschungsarbeit

Die darauf folgenden, ebenfalls in *Kapitel 3* beschriebenen, experimentellen Untersuchungen des Frischbetondrucks von selbstverdichtendem Beton in einer Rahmenschalung zielen auf den Erhalt weiterführender baupraktischer Erkenntnisse ab. Dabei erweist es sich aus messtechnischer Sicht als ausreichend, lediglich den Frischbetondruck sowie die Umgebungstemperatur und -feuchte aufzuzeichnen. Gleichzeitig wird die sich jeweils ausbildende Frischbetonkonsistenz in Form des Setzfließmaßes bestimmt.

Aus den in *Kapitel 3* gewonnenen Ergebnissen können in *Kapitel 4* anhand von Parameterstudien diejenigen Faktoren definiert und diskutiert werden, welche in erster Linie für den Frischbetondruck ausschlaggebend sind. Dementsprechend sind diese zur Herleitung eines physikalischen Materialmodells unerlässlich.

Die so gewonnenen Ergebnisse bilden das wissenschaftliche Fundament für das in *Kapitel 5* hergeleitete „physikalische Materialmodell“ zur Beschreibung des Frischbetondrucks. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf der einfachen und stoffgesetzlich nachvollziehbaren Ableitung und Formulierung. In einem nächsten Schritt wird dieses Modell durch die explizite Berücksichtigung des Einbauprozesses sowie der Schalungssteifigkeit zu einem „rheologisch-mechanischen Materialmodell“ erweitert.

Anschließend werden in *Kapitel 6* auf der Grundlage der neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse konkrete Empfehlungen für die Baupraxis ausgesprochen.

Schließlich fasst *Kapitel 7* die wesentlichsten Erkenntnisse dieser Abhandlung zusammen, verbunden mit einem Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf.

## 2 Literatursichtung

Zur Gewährleistung eines zielführenden Verständnisses des komplexen Frischbetondrucks und der damit einhergehenden Einflussfaktoren und Modellvorstellungen bedarf es theoretischer Grundlagen. Diese setzen sich nicht nur aus betontechnologischen und stoffphysikalischen Phänomenen, sondern auch aus baubetriebstechnologischen Verfahrensweisen zusammen. Im Rahmen der nachfolgenden Literatursichtung wird der entsprechende Stand der Erkenntnis eingehend behandelt.

### 2.1 Rheologie frischer zementgebundener Werkstoffe

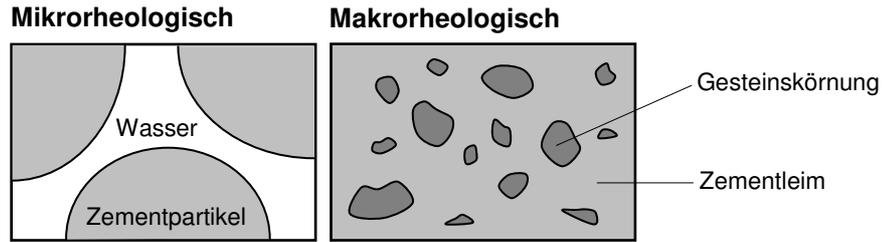
Der Terminus Rheologie wurde erstmals von BINGHAM [35] im Jahre 1922 eingeführt und bezeichnet die Wissenschaft der Fließeigenschaften von Stoffen [25]. Ein ausführlicher Überblick über die Ursprünge und Entwicklung der Rheologie wurde in [73] zusammengestellt. Entsprechend ihrer Definition betrachtet die Rheologie sowohl das sich infolge einer äußeren Kraft ergebende Fließen von Flüssigkeiten als auch die daraus resultierenden Deformationen – das sog. Deformations- bzw. Verformungsverhalten – von Festkörpern. Darüber hinaus zählt dazu die Betrachtung von Stoffen, deren strukturphysikalische Charakteristik zwischen der einer Flüssigkeit und der eines Festkörpers einzuordnen ist, wie z. B. plastische Körper oder kolloidale Systeme. Rheologische Betrachtungsweisen ermöglichen demzufolge die Ableitung stoffphysikalischer Gesetzmäßigkeiten [36], [108], [135].

Für eine physikalische Beschreibung des Materialverhaltens frischer zementgebundener Werkstoffe sind sowohl die Rheologie als auch die Rheometrie unerlässlich. Voraussetzung für das Verständnis der Rheologie zementgebundener Werkstoffe sind allgemeine rheologische Grundlagen. Diese werden in den unmittelbar nachfolgenden Abschnitten dargelegt. Soweit für das Verständnis der vorliegenden Arbeit nötig, werden anschließend die spezifischen rheologischen Eigenschaften frischer zementgebundener Werkstoffe näher betrachtet.

#### 2.1.1 Rheologische Betrachtungsebenen

Die Beschreibung des Fließ- und Deformationsverhaltens von zwei- oder mehrphasigen Stoffen lässt sich unter Berücksichtigung ihrer strukturellen Charakteristik auf verschiedene Weise realisieren. Dabei können in Bezug auf die spezifische Stoffstruktur zwei verschiedene Betrachtungsebenen – die mikro- und die makrorheologische – unterschieden werden [25], [163], [217].

Anhand der Mikrorheologie können die Erkenntnisse über das rheologische Verhalten einer feineren Ebene auf die nächst höhere Betrachtungsebene projiziert werden. Dies lässt bei einer Betrachtung von Zwei- oder Mehrphasensystemen von der Kenntnis des rheologischen Verhaltens der einzelnen Bestandteile auf die Rheologie des Gesamtsystems schließen, siehe Bild 2.1, links (siehe auch [146]). Die Modellbildung der rheologischen Eigenschaften von Frischbeton basiert grundsätzlich auf mikrorheologischen Ansatzweisen [217].



**Bild 2.1:** *Strukturphysikalische Betrachtung auf einer mikrorheologischen Ebene (links) und einer makrorheologischen Ebene (rechts) am Beispiel des Werkstoffs Beton*

Die makrorheologische Betrachtungsebene ermöglicht hingegen eine direkte und angemessene Analyse des Fließ- und Deformationsverhaltens der Gesamtheit eines Zwei- oder Mehrphasensystems, indem der jeweilige Stoff als ein Kontinuum angesehen wird, siehe Bild 2.1, rechts. Dabei bleiben die kleinsten diskreten Elemente unberücksichtigt. Entsprechend ihrer phänomenologischen Definition können lediglich ideale Flüssigkeiten sowie reine Einzelkristalle aus einer einzigen Phase bestehen und somit als homogene Medien bezeichnet werden. Voraussetzung für ein quasi-homogenes Material ist, dass die geometrischen Abmessungen seines größten Partikels (und damit Elements) signifikant geringer ausgeprägt sind als die des betrachteten kleinst möglichen Volumenelements. Dementsprechend lassen sich frische zementgebundene Werkstoffe, wie beispielsweise (der grundsätzlich heterogene) Beton, als quasi-homogener Stoff einteilen [217].

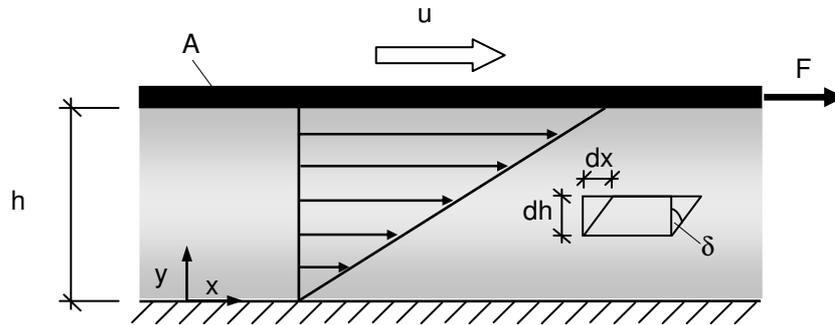
Unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen kann eine makrorheologische Betrachtungsebene demzufolge ebenfalls die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften frischer zementgebundener Werkstoffe ermöglichen.

### 2.1.2 Definitionen

Die Darstellung des rheologischen Stoffverhaltens erfordert die Definition physikalischer Parameter. Dabei wird in der Regel eine laminare, stationäre Schichtenströmung vorausgesetzt. Eine Bewegung der obersten Probenschicht solcher Strömungen bewirkt infolge der auftretenden Kohäsionskräfte eine Verschiebung der unteren Schichten. Dieser Vorgang, der zu einer Probekörperdeformation führt, wird als „Scherung“ bezeichnet [36], [135], [216].

Die Herleitung der rheologischen Größen, die zur Beschreibung des mechanischen Widerstands, der Deformation sowie der Deformationsgeschwindigkeit benötigt werden, erfolgt an einem Volumenelement eines homogenen Körpers. Dieser befindet sich zwischen zwei planparallelen Platten, was als sog. „Zwei-Platten-Modell“ bezeichnet wird (siehe Bild 2.2) [36]. Dabei bewegt sich die obere Platte der Fläche  $A$  in einem Abstand  $h$  mit einer konstanten Geschwindigkeit  $u$  infolge einer tangential angreifenden Kraft  $F$ . Daraus ergibt sich der resultierende Deformationswinkel  $\delta$ . Die Haftbedingung gilt als erfüllt, d. h. die untere Platte ist bei einer Geschwindigkeit von  $u_y = 0$  unbeweglich [1], [116], [169]. Der Verformungsgrad wird durch den Widerstand der inneren Reibung der Probe beschränkt. Diese ist sowohl von der physikalischen als auch von der (ursprünglichen, durch die Mischungszusammensetzung und

damit z. B. die Zugabe von Zusatzmittel beeinflussten) chemischen Stoffstruktur vorgegeben [19].



**Bild 2.2:** Definition der physikalischen Grundgrößen im Scherversuch an einem Zwei-Platten-Modell; in Anlehnung an [116]

Aufbauend auf dem oben dargelegten Grundgedanken und unter Berücksichtigung der erforderlichen Randbedingungen können nach Bild 2.2 die rheologischen Größen bestimmt werden. Dabei bezeichnet die Scherspannung den mechanischen Widerstand, den ein Stoff einer von außen einwirkenden Belastung entgegenbringt. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der von außen aufgebrauchten Scherkraft und der bewegten Fläche [36], [116]:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

mit	$\tau$ :	Scherspannung	$[\text{kN}/\text{m}^2]$
	F:	Scherkraft	$[\text{kN}]$
	A:	Scherfläche	$[\text{m}^2]$

Die hervorgerufene Scherung ergibt sich aus der Proportionalität zwischen der oberen Plattenauslenkung sowie des Plattenabstandes [36], [113]:

$$\gamma = \frac{dx}{dh} = \tan \delta \quad (2.2)$$

mit	$\gamma$ :	Scherung	$[-]$
	dx:	Auslenkung	$[\text{m}]$
	dh:	Plattenabstand	$[\text{m}]$
	$\delta$ :	Deformationswinkel	$[\text{°}]$

Das Geschwindigkeitsgefälle der Probe bestimmt ihre Schergeschwindigkeit. Sie ist ein Maß für die Scherbeanspruchung und ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit der sich bewegenden oberen Platte und dem Plattenabstand [35], [116]:

$$\dot{\gamma} = \frac{u}{h} \quad (2.3)$$

mit	$\dot{\gamma}$ :	Schergeschwindigkeit	$[\text{s}^{-1}]$
	$u$ :	obere Plattengeschwindigkeit	$[\text{m/s}]$
	$h$ :	Plattenabstand	$[\text{m}]$

Neben der Scherbelastung kann in Abhängigkeit von der betrachteten Materialstruktur der Zeiteinfluss bei der Beschreibung der rheologischen Eigenschaften von Bedeutung sein. Entsprechend bedarf es gesonderter Betrachtungsweisen.

### 2.1.2.1 Rheologische Modelle

Hinsichtlich der funktionalen Darstellung der rheologischen Stoffeigenschaften ist zwischen Fließ- sowie Viskositätsfunktionen zu unterscheiden. Beide Funktionsarten werden aus der Schergeschwindigkeit gebildet. Während bei der Fließfunktion die resultierende Scherspannung abgebildet wird, berücksichtigt die Viskositätsfunktion die sich aus der Belastung ergebende dynamische Viskosität  $\eta$  (siehe Bild 2.3, links).

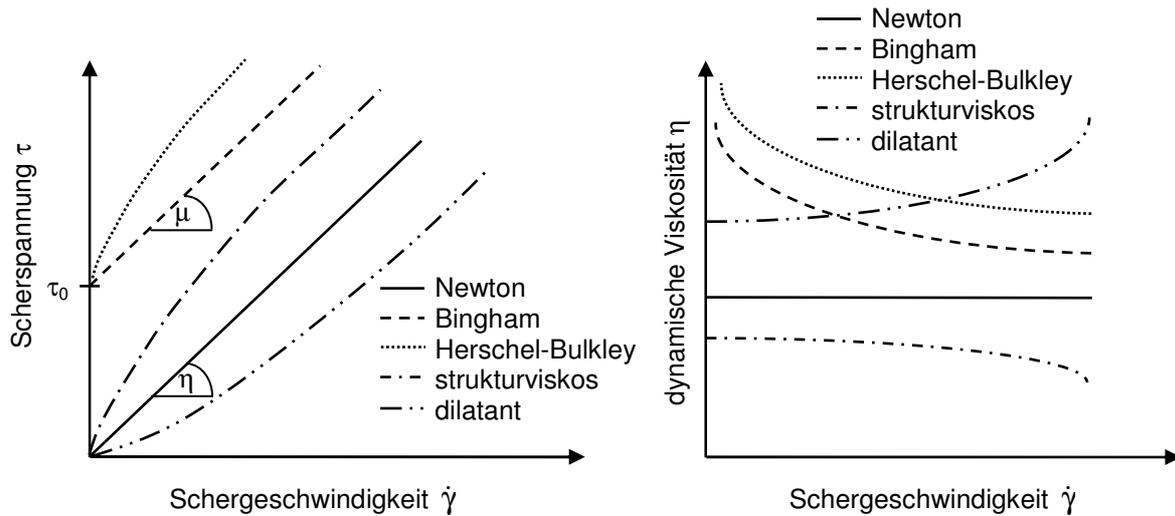
Unter der dynamischen Viskosität  $\eta$  einer Probe wird die Zähigkeit verstanden. Als Quotient aus Scherspannung  $\tau$  und Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  gibt sie den Kraftaufwand nur auf indirektem Wege wieder [36]:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.4)$$

mit	$\eta$ :	dynamische Viskosität	$[\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}^2]$
-----	----------	-----------------------	---------------------------------------

Da die dynamische Viskosität auch durch die Temperatur und die Druckspannungen beeinflusst wird, stellt sie keinen ausschließlichen Stoffkennwert dar [135], [217]. Mit Hilfe der Gleichungen 2.1 bis 2.4 lassen sich die in der Rheologie geläufigsten Fließ- (Bild 2.3, links) und Viskositätsfunktionen (Bild 2.3, rechts) darstellen.

Bild 2.3, links zeigt qualitativ rheologisch bedeutende Fließfunktionen. Die dazugehörigen Viskositätsfunktionen sind in Bild 2.3, rechts abgebildet. Dabei ist zu erkennen, dass sich sowohl die Fließkurve eines BINGHAM-Körpers als auch die eines HERSCHEL-BULKLEY-Körpers signifikant von den übrigen Fließfunktionen – NEWTON-Flüssigkeit, strukturviskosen und dilatanten Stoffen – in dem Schnittpunkt mit der  $\tau$ -Achse unterscheiden. Im Gegensatz zu Stoffen, deren Fließfunktion durch den Koordinatenursprung verläuft, beginnen ein BINGHAM- oder ein HERSCHEL-BULKLEY-Körper erst dann zu fließen, wenn ihr charakteristischer Grenzwert für die Fließgrenze  $\tau_0$  überschritten worden ist [217]. Entsprechend bezeichnet die Fließgrenze die Spannung, die zum Einsetzen des Fließvorgangs erst von einer auf den Körper einwirkenden Kraft überwunden werden muss. Infolge der inneren Strukturkräfte entspricht bei einem derart plastischen Körper das spezifische Fließverhalten, innerhalb eines Beanspruchungsbereichs unterhalb der Fließgrenze, dem eines elastischen oder viskoelastischen Festkörpers. Bei Überschreiten der Fließgrenze gleicht es jedoch dem einer Flüssigkeit [135], [217].



**Bild 2.3:** Qualitativer Verlauf bedeutender Fließ- (links) und Viskositätsfunktionen (rechts) für unterschiedliches rheologisches Stoffverhalten; in Anlehnung an [75], [109], [114] und [116]

Wie aus Bild 2.3, links bzw. rechts ersichtlich, zeichnet sich eine NEWTON-Flüssigkeit durch eine konstante dynamische Viskosität  $\eta$  aus. Diese entspricht der Steigung der zugehörigen Fließkurve und ist aufgrund ihres linearen Kurvenverlaufs unabhängig von der aufgebracht Schergeschwindigkeit. Dieser Fall wird als idealviskos bezeichnet. Da die dynamische Viskosität für nicht-NEWTONsche Stoffe keine Stoffkonstante ergibt, wird sie auch als „scheinbare Viskosität“ bezeichnet [36], [135]. Sie ist vielmehr von der Schergeschwindigkeit abhängig und damit von diskontinuierlicher Natur. Entsprechend wird hinsichtlich eines BINGHAM-Körpers von einem idealplastischen Verhalten gesprochen. Seine differentielle Viskosität ergibt in einem Scherspannungsbereich oberhalb der Fließgrenze ebenfalls eine Konstante und wird als plastische Viskosität  $\mu$  bezeichnet [109], [217]. Ein geläufiger Begriff ist auch BINGHAM-Viskosität. Die funktionale Darstellung lässt sich in Anlehnung an [36], [109] und [217] entsprechend der nachfolgenden Gleichung 2.5 angeben:

$$\mu = \frac{\tau - \tau_0}{\dot{\gamma}} \tag{2.5}$$

mit  $\mu$ : plastische Viskosität [kN·s/m<sup>2</sup>]

Sowohl Stoffe mit als auch ohne Fließgrenze können strukturviskos (siehe Bild 2.3, links) ausgeprägt sein, wenn sich ihre (dynamische bzw. plastische) Viskosität mit zunehmender Belastung bzw. Schergeschwindigkeit (bei einem BINGHAM-Körper oberhalb von  $\tau_0$ ) verringert [217]. Strukturviskose Flüssigkeiten werden auch als pseudoplastisch bezeichnet. Dilatante Stoffe hingegen zeichnen sich bei steigender Schergeschwindigkeit durch eine zunehmende dynamische Viskosität aus. Sowohl die Fließ- (Bild 2.3, links) und Viskositätskurven (Bild 2.3, rechts) strukturviskoser bzw. pseudoplastischer Stoffe als auch die dilatanten Stoffe gründen auf OSTWALD-DE-WAELE [75] und werden in [36] ausführlich beschrieben.

Die in Bild 2.3 abgebildeten Fließ- (Bild 2.3, links) und Viskositätsfunktionen (Bild 2.3, rechts) beruhen auf mathematischen Zusammenhängen. Nachfolgend werden die Fließfunktionen vorgestellt, welche für die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit von Bedeutung sind. Neben dem Fließfunktionsverlauf durch den Koordinatenursprung zeichnen sich NEWTONsche Flüssigkeiten durch eine lineare Proportionalität zwischen Scherspannung und -geschwindigkeit aus. Dies ergibt sich aus den sehr geringen Wechselwirkungen ihrer einzelnen Moleküle. Aus Gleichung 2.4 lässt sich die Scherspannung nach dem NEWTONschen Gesetz in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit in der nachfolgenden Form darstellen [36], [75]:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Zeichnen sich Stoffe anhand einer ausgeprägten Fließgrenze aus, so können sie durch die lineare BINGHAM-Fließkurve oder – bei einem nichtlinearen Verlauf ihrer Fließkurve – das HERSCHEL-BULKLEY-Modell dargestellt werden. Für die Beschreibung des BINGHAM-Modells muss entsprechend der nachfolgenden Gleichung 2.6 zu der NEWTONschen-Funktion eine Fließgrenze addiert und die dynamische Viskosität durch die plastische ersetzt werden [24], [36], [80]. Dies entspricht einer Umformung von Gleichung 2.5:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \tag{2.6}$$

mit  $\tau_0$ : Fließgrenze [kN/m<sup>2</sup>]

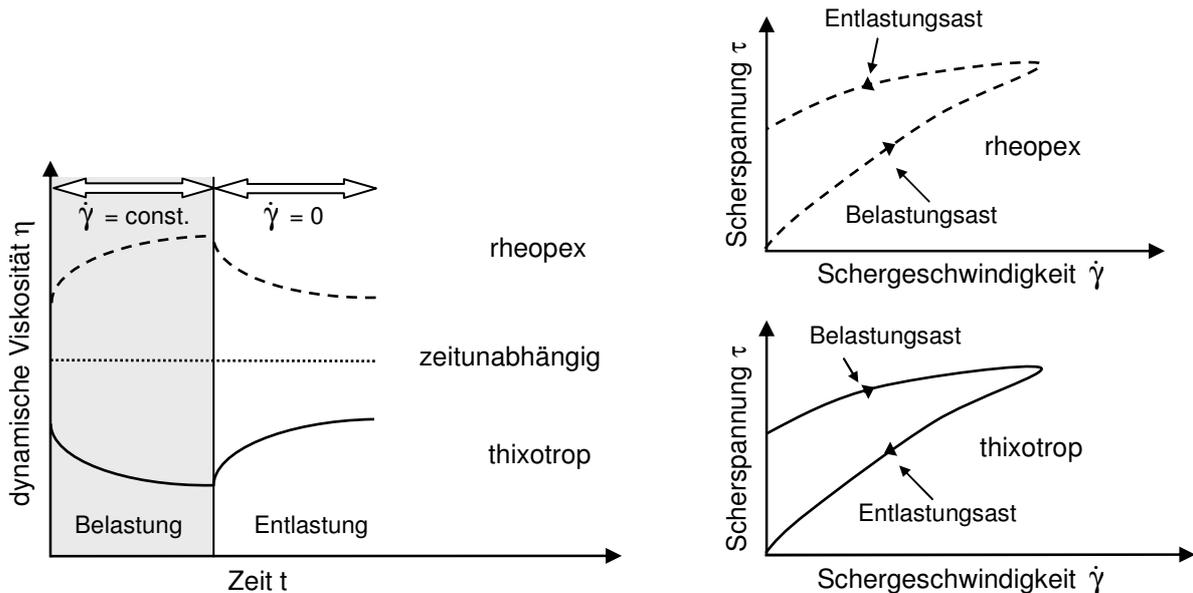
Eine exakte physikalische Wiedergabe der Fließkurven nach OSTWALD-DE-WAELE und HERSCHEL-BULKLEY wird insofern erschwert, als bei der Formulierung dieser beiden nichtlinearen Gesetzmäßigkeiten weitere Konstanten benötigt werden, deren Bestimmung alleine überschlüssig oder auf empirischem Wege erfolgen kann [135]. Eine Darstellung der zugehörigen Fließ- und Viskositätsfunktionen ist in [36], [75] oder [126] zu finden.

### 2.1.2.2 Zeitliche Abhängigkeit von Fließ- und Viskositätsfunktionen

In Abhängigkeit von seiner spezifischen Struktur kann die dynamische Viskosität eines Stoffes bei einer konstant aufgebrauchten Scherbelastung eine Zeitabhängigkeit aufzeigen. Diese erweist sich besonders in Bezug auf seine Fließfunktion als signifikant. Dabei ist entsprechend dem nachfolgend dargestellten Bild 2.4 zwischen einem thixotropen sowie einem rheopeyen Stoffverhalten zu unterscheiden [36], [135], [217].

„Thixotropie“ ist die zeitabhängige Viskositätsabnahme bei einer konstant aufgebrauchten Scherbelastung, siehe Bild 2.4, links. Diese Viskositätsreduzierung resultiert aus dem von einer mechanischen Einwirkung hervorgerufenen internen Strukturabbau. Wie die Abnahme der  $\eta$ -t-Beziehung zeigt, wird dadurch zunächst die der Beanspruchung entgegenwirkende innere Widerstandskraft reduziert, siehe Bild 2.4, rechts. Es handelt sich um einen reversiblen Vorgang, denn der innere Strukturabbau wird während der Ruhephase vollständig wiederhergestellt. Das thixotrope Verhalten eines Körpers ist sowohl von der Belastungsdauer als auch

von der Belastungsart abhängig. Ihm liegen die gleichen Ursachen zugrunde, die für die Strukturviskosität verantwortlich sind. Allerdings darf thixotropes Stoffverhalten nicht mit Strukturviskosität verwechselt werden. Wie in Abschnitt 2.1.2.1 bereits erläutert, wird diese durch die stationäre Viskositätsabnahme bei anwachsender Schergeschwindigkeit charakterisiert [36], [135], [217]. Eine normkonforme Definition thixotroper Stoffe ist in [57] bzw. [217] angegeben: „Thixotrope Stoffe zeigen ein zeitabhängiges Fließverhalten, bei dem die Viskosität infolge andauernder mechanischer Beanspruchung vom Wert im Ruhezustand her gegen einen Endwert hin abnimmt und nach Aufhören der Beanspruchung wieder zunimmt.“



**Bild 2.4:** Zeitabhängigkeit bei konstanter Scherbelastung der dynamischen Viskosität zweier Stoffe im Vergleich zu einer zeitunabhängigen NEWTON-Flüssigkeit (links) sowie der sich daraus ergebenden Beeinflussung der entsprechenden Fließfunktionen (rechts); in Anlehnung an [36], [75], [108] und [117]

Ebenso wie die Thixotropie ist die Rheopexie eine zeitabhängige Erscheinung, siehe Bild 2.4, links. Jedoch kommt es im Gegensatz zu thixotropem Stoffverhalten im Rahmen einer Scherbeanspruchung zum Aufbau einer Überstruktur (Bild 2.4, rechts), was nach dem Belastungsende zu einer verminderten Viskosität führt [36]. Ein rheopexes Stoffverhalten kann allerdings nur bei geringen Schergeschwindigkeiten festgestellt werden [187], [217].

### 2.1.3 Rheologische Einordnung von frischem Zementleim, Mörtel und Beton

#### 2.1.3.1 Zeitunabhängiges rheologisches Verhalten

Entsprechend der in Abschnitt 2.1.1 angegebenen rheologischen Betrachtungsebenen kann die rheologische Untersuchung von Frischbeton auf drei verschiedenen Wegen erfolgen. Entweder an Zementleim und -mörtel (mikrorheologische Betrachtungsebene) oder aber auch an Beton selber (makrorheologische Betrachtungsebene). Aufgrund der Bestandteile von sowohl Zementleim als auch von Zementmörtel, ihrer Zusammensetzung, der damit verbundenen verwandten Werkstoffcharakteristik sowie ihres Einflusses auf die Betoneigenschaften ist

eine derartige Annahme gerechtfertigt. Insbesondere für Fließbetone oder selbstverdichtende Betone (und damit nicht nur für Normalbeton) sind die Bindemittelleigenschaften in erster Linie für die Baustoffrheologie verantwortlich [19]. Darüber hinaus spielen die Gesteinskörnung, die Zusatzmittel (und damit auch die Zusatzstoffe) sowie die Konzentration des Feststoffvolumens eine bedeutende Rolle. Es handelt sich um komplexe scherempfindliche Mehrphasensysteme [36], [115]. Dies gilt auch für Mörtel, da dieser sich bei einem Vergleich mit einem entsprechenden Beton lediglich in dem jeweiligen Größtkorn unterscheidet und somit beide Werkstoffe eine einheitliche physikalische Stoffstruktur aufweisen [94], [115], [124].

Hinsichtlich der Ableitung der rheologischen Betoneigenschaften aus Zementleim und Mörtel bestehen jedoch auch vereinzelt anderweitige Auffassungen. So haben Untersuchungen gezeigt, dass unterschiedliche Frischbetone trotz der andersartigen Fließcharakteristik der ihnen zugehörigen Zementleime und deren Vermischung mit Gesteinskörnung ein übereinstimmendes Fließverhalten aufweisen [135], [189]. Zudem lässt sich das rheologische Verhalten von Fließbetonen bzw. selbstverdichtenden Betonen im Gegensatz zu Mörtel aufgrund des vergleichsweise hohen Gesteinskörnungsanteils nicht aus den rheologischen Zementleimeigenschaften ableiten [98]. Diesbezüglich besteht somit noch gesonderter Forschungsbedarf.

Das rheologische Fließverhalten frischer zementgebundener Baustoffe ist zumeist durch ein pseudoplastisches Verhalten charakterisiert [34]. Wie die frischen zementgebundenen Baustoffe Mörtel und Beton entspricht die rheologische Einordnung eines Zementleims dem einer „Suspension“ [135]. Eine Suspension ist ein heterogenes Stoffgemisch, welches aus einer Flüssigkeitsphase und einer fein verteilten Feststoffphase besteht. Eine Unterscheidung in Bezug auf die Feststoffphase muss zwischen Festkörperpartikeln (in NEWTONschen Flüssigkeiten) und verformbaren Partikeln erfolgen [25]. Im Hinblick auf eine detaillierte Definition unterscheiden sich die drei o. g. Werkstoffe in ihrer jeweiligen, nachfolgend beschriebenen Suspensionseinteilung [207].

### **Zementleim**

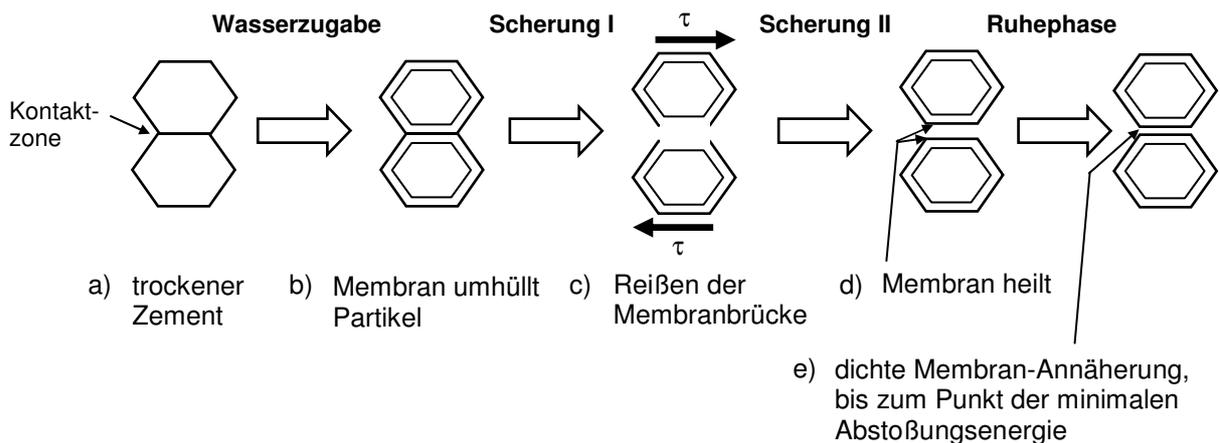
Als hochkonzentrierte Suspensionen werden die rheologischen Eigenschaften von frischem Zementleim von verschiedenen Einflussparametern beeinflusst [19], [80], [217]. Eine ausführliche Auflistung der allgemeingültigen Zusammenhänge ist in [217] enthalten. Diese sind u. a.: der Feststoffanteil und die Viskosität der flüssigen Phase [74], die Partikelgestalt [25] bzw. -form [107], die Feststoffkonzentration [79], [147], [163], der Partikelradius sowie der Radius der hypothetischen Oberfläche [176].

Eine rheologische Einordnung von Zementsuspensionen erweist sich nach dem heutigen Stand der Erkenntnis als teilweise widersprüchlich. In der Literatur wird frischer Zementleim verschiedenen Fließfunktionen (z. B. BINGHAM, HERSCHEL-BULKLEY etc.) zugeordnet. Somit existieren unterschiedliche qualitative sowie quantitative Auffassungen [24]. Dabei ist den jeweiligen Betrachtungsweisen hinsichtlich ihres spezifischen Fließverhaltens ein wesentliches Merkmal gemein – die Fließgrenze  $\tau_0$  (siehe Abschnitt 2.1.2.1). Diese ergibt sich als eine Funktion der relativen Feststoffkonzentration [79]. Bei einer Beanspruchung des frischen

Zementleims unterhalb seiner Fließgrenze weist dieser dementsprechend elastische Eigenschaften auf [34]. In [44] zeigt der frische Zementleim kein NEWTONsches Verhalten, da dies ansonsten bei einem Frischbeton aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte zu einer Entmischung führen würde. Neben dem BINGHAM-Modell [189], [208], [213] sowie dem HERSCHEL-BUKLEY-Modell [23], [135] können noch weitere Modellvorstellungen auf Zementleim angewendet werden. Diese sind z. B. das ROBERTSON-STIFF-Modell oder das „modifizierte“ BINGHAM-Modell (s. u.) und unterscheiden sich vor allem in der Anzahl und mathematischen Formulierung der zusätzlich zu der Kenngröße Fließgrenze hinzugezogenen Stoffkonstanten [20], [25], [218].

Eine Ursache für diese unterschiedlichen Ergebnisse und Einteilungen liegt u. a. in den experimentellen Techniken und Geräten, die jeweils bei den einzelnen Untersuchungen verwendet wurden [24]. Hinsichtlich der Bestimmung rheologischer Kenngrößen frischer zementgebundener Werkstoffe, vor allem von Zementleim, sind besonders der Mischzeiteinfluss und der damit verbundene spezifische Energieeintrag von Interesse. Ein wesentliches Kriterium ist der Strukturbruch, der eine Reduzierung des Scherwiderstands einer Suspension hervorruft [20], [23], [135].

Das nachfolgende Bild 2.5 zeigt die Modellvorstellung eines Strukturbruchs in [24]. Aufgrund der gegenseitigen (sich infolge der wirkenden Anziehungskräfte einstellenden) Haftung können sich trockene Zementpartikel grundsätzlich miteinander verbinden, siehe Bild 2.5 a). Die Wasserzugabe führt nach Bild 2.5 b) zu einer Erhöhung dieser Haftverbindung. Dies steht im Zusammenhang mit der Gelstruktur, die sich aufgrund der durch die Wasserzugabe einstellenden chemischen Reaktionen bildet und mehrere (bereits im trockenen Zustand aneinanderhaftende) Zementpartikel umfassen kann [19], [153], [217]. In Bild 2.5 c) ist der eigentliche Strukturbruch dargestellt.

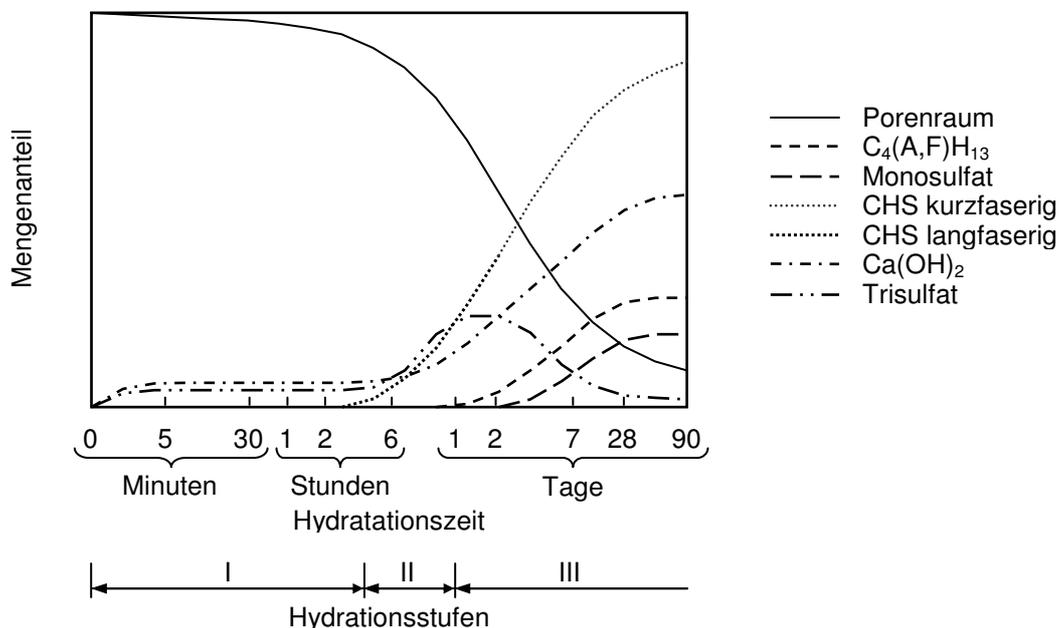


**Bild 2.5:** Strukturbruchmodell zementöser Systeme; in Anlehnung an [24]

Im Rahmen des eigentlichen Strukturbruchs ruft eine äußere Scherbeanspruchung des (frischen) Zementleims eine Lösung der zuvor mit einer Membran umhüllten Zementpartikel hervor. Die Ausrichtung der gescherten Partikel erfolgt an der Belastung [189]. An der aufgehobenen Kontaktfläche zweier Zementpartikel kann nun, wie in Bild 2.5 d) erkennbar ist, eine

neue Membran- bzw. Hydratschicht entstehen. Die durch den Strukturbruch verursachte Veränderung der Membrancharakteristik ist somit irreversibel. Im Anschluss daran kann entsprechend Bild 2.5 d) nach Beendigung der Scherbeanspruchung der abermalige Strukturaufbau einsetzen [19], [20].

Wesentlich für den Frischbetondruck ist die Hydratationsstufe I (siehe Bild 2.6), in welcher bereits ein Strukturbruch auftreten kann. Diese erstreckt sich von der Wasserzugabe hin bis zu einem Zeitpunkt von vier bis sechs Stunden danach. Nach der Bildung von Calciumhydroxid und Trisulfat sind innerhalb dieser „Ruhephase“ für eine geraume Zeit keine weiteren chemischen Reaktionen erkennbar. Hingegen zeichnen sich die Hydratationsstufe II bzw. Hydratationsstufe III durch die Vielzahl der in ihnen ablaufenden chemischen Reaktionen aus (siehe Bild 2.6) [103].



**Bild 2.6:** Schematische Darstellung der Hydratphasenbildung und der Gefügeentwicklung im Rahmen der Zementhydratation (CSH = Calciumsilikathydrat,  $C_4(A,F)H_{13}$  = eisenoxidhaltiges Tetracalciumaluminathydrat); in Anlehnung an [103]

Wie bereits erwähnt, hat der Strukturbruch von Zementsuspensionen – insbesondere da dieser für einen BINGHAM-Körper irreversibel ist – einen großen Einfluss auf die Bestimmung ihrer rheologischen Kenngrößen. Eine Messung vor dem Erreichen des Strukturbruchs führt zu überhöhten Werten [19], [20]. Zur Bestimmung der rheologischen Parameter von Frischbeton muss daher in [44] zunächst, z. B. anhand des Mischvorgangs, ein Strukturbruch herbeigeführt werden. Das Strukturbruchausmaß wird vornehmlich durch die „Belastungsvorgeschichte“, die Messgeometrie bzw. das Messprofil sowie die Agglomerationsgeschwindigkeit bestimmt [126], [135], [189].

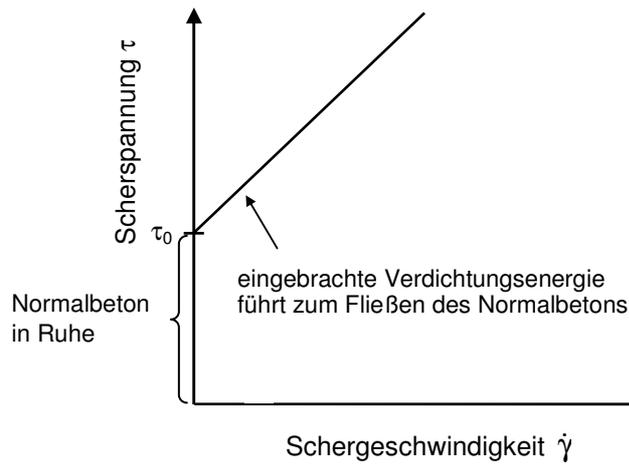
### ***Frischer Mörtel und Beton***

Auch frischer Mörtel (siehe [54]) und Beton (siehe [48] bzw. [60]) werden der Gruppe der Suspensionen (s. o.) – als polydispers [115] oder hochkonzentriert [217] – zugeordnet.

Die Komponenten sowie die Verarbeitung von Beton bestimmen anhand einer Vielzahl von Einflüssen seine rheologischen Eigenschaften. Dabei wird in [81] zwischen erstrangigen und zweitrangigen Einflussparametern unterschieden. Zu den erstrangigen Einflussparametern zählen die Betonzusammensetzung (ggf. auch Zusatzmittel bzw. -stoffe), die Gesteinskörnung (Form, Art etc.), der Wassergehalt sowie die Zementeigenschaften, siehe [84], [134] oder [164]. Die zweitrangigen Einflussparameter bilden die Mischerart, die Dosierreihenfolge bzw. Mischdauer sowie die Umgebungstemperatur. Eine Nichtberücksichtigung der zweitrangigen Parameter kann trotz eines identischen Mischungsentwurfs zu unterschiedlichen Fließeigenschaften führen. Darüber hinaus müssen bezüglich der spezifischen rheologischen Frischbetoneigenschaften auch die Betoneinbau-, Verdichtungs- und Nachbehandlungsart betrachtet werden, siehe auch [2] oder [127].

Aufgrund der Temperaturempfindlichkeit, insbesondere von Fließmitteln, müssen die o. g. erstrangigen Parameter um die Frischbetontemperatur ergänzt werden [98], [102], [148]. Dabei ist zu differenzieren, dass zum einen eine Erhöhung der Frischbetontemperatur eine Verringerung der Konsistenz und damit der Verarbeitbarkeit zur Folge hat. Zum anderen wird die Ansteifgeschwindigkeit im Wesentlichen durch die Frischbetontemperatur beeinflusst, indem eine Erhöhung zu einer Beschleunigung des Ansteifvorgangs (und auch des Hydratationsvorgangs bzw. der Erhärtungsgeschwindigkeit) führt [148]. Hinsichtlich des Gesteinskörnungseinflusses ist insbesondere ein gegenüber Normalbeton erhöhter Mehlkornanteil und dementsprechend verringerter Grobkornanteil von Bedeutung [84], [102].

Sowohl das rheologische Verhalten von Mörtel [21], [208], [213] als auch von Beton [82], [136], [192] lässt sich mit dem BINGHAM-Modell beschreiben. Bild 2.7 zeigt exemplarisch die Fließkurve eines konventionellen Normalbetons. Dabei ist zu erkennen, dass sich der Frischbeton bei einer Scherbeanspruchung unterhalb der Fließgrenze noch im Ruhezustand befindet. Erst bei einem Überschreiten der Fließgrenze infolge einer von außen wirkenden Verdichtungsenergie setzt der Fließvorgang ein. Ein Überblick über mögliche Fließgrenzengrößenordnungen ist in Tabelle 2.1 gegeben. Demnach kann z. B. die Fließgrenze frischer Normalbetone (NB) zwischen  $500 \text{ N/m}^2$  und  $2000 \text{ N/m}^2$  betragen, die frischer selbstverdichtender Betone (SVB) sich in einem Bereich zwischen  $50 \text{ N/m}^2$  und  $200 \text{ N/m}^2$  befinden [24]. Bei einer rheologischen Klassifizierung als BINGHAM-Modell kann sich für selbstverdichtenden Beton die Fließgrenze als gering [44] bzw. sehr gering erweisen oder sogar den Wert Null annehmen [81]. Ihr Wert wird in [217] als weit unter  $500 \text{ N/m}^2$  angegeben. In [19] beträgt die Fließgrenze eines Normalbetons das Fünffache des Wertes eines selbstverdichtenden Betons. Dies wird durch die (in dem selbstverdichtenden Beton auftretende) Fließmittelwirkung begründet.



**Tabelle 2.1:** Größenordnung der Fließgrenze für Frischbeton

Beton	Fließgrenze $\tau_0$ [N/m <sup>2</sup> ]	Literaturquelle
NB	500-2000	[24]
SVB	50-200	[24]
	< 500	[217]

**Bild 2.7:** Fließkurve eines konventionellen Normalbetons; in Anlehnung an [115]

Im Rahmen der physikalischen Interpretation des BINGHAM-Modells wird der Frischbeton als eine Suspension aus einem Korngemenge (u. a. aus Zement, Zusatzstoffen sowie Gesteinskörnung) und Wasser definiert, siehe [79] bzw. [81]. Bezüglich der Fließgrenzenbestimmung ist dabei die Affinität des Kornanteils für das verwendete Zusatzmittel berücksichtigt [79]. Die Fließgrenze eines Frischbetons wird von der inneren Reibung der Gesteinskörnung beeinflusst [79], [115]. Bei einer makroskopischen Betrachtung lässt sich das Fließverhalten von Frischbeton in [80] sogar mit einer NEWTON-Flüssigkeit beschreiben.

In der jüngsten Vergangenheit ist festzustellen, dass in Bezug auf die rheologische Beschreibung bestimmter Betone, wie z. B. selbstverdichtender Betone, die Verwendung des BINGHAM-Modells zu negativen Fließgrenzenwerten führte. Diese Beobachtung bedarf jedoch ausführlicher Untersuchungen. Für derartige Sonderfälle eignet sich eher die Verwendung des HERSCHEL-BULKLEY-Modells [115]. Zugleich wurde versucht, bei Verwendung des HERSCHEL-BULKLEY-Modells die erforderliche Modellparameteranzahl zu reduzieren und so eine Art vereinfachtes BINGHAM-Modell zu erhalten [78], [79], [81]. Eine grundsätzlich gute Übereinstimmung des HERSCHEL-BULKLEY-Modells bzw. eines modifizierten BINGHAM-Modells mit dem herkömmlichen BINGHAM-Modell wurde in einem Schergeschwindigkeitsbereich von 0 bis 6 s<sup>-1</sup> in [79] festgestellt. Damit ist in Bereichen geringer Schergeschwindigkeiten die Anwendung des BINGHAM-Modells allgemeingültig [19]. Für das BINGHAM-Modell spricht, dass in [79] die oben erwähnte physikalische Interpretation vorgestellt wurde.

Darüber hinaus liegen über die rheologischen Eigenschaften von selbstverdichtendem Beton ebenfalls verschiedene Erkenntnisse vor. Sie können durch ein BINGHAM-Modell (s. o.) [134], ein HERSCHEL-BULKLEY- bzw. modifiziertes BINGHAM-Modell [84], ein dilatantes [98] oder ein einfaches NEWTON-Modell [102], [148] interpretiert werden.

Detaillierte Ausführungen über die rheologische Wirkung von Hochleistungsverflüssigern können [85], [143] oder [189] entnommen werden. Diese führen zu einer signifikanten Verminderung der Fließgrenze eines frischen Zementleims (und damit auch des Frischbetons),

indem sie die aneinanderhaftenden bzw. agglomerierten Zementpartikel dispergieren [24], [189].

Grundsätzlich ist eine Verdichtung während des Einbauprozesses, außer für selbstverdichtenden Beton und evtl. Fließbeton, aus stoffphysikalischen Gründen zwingend erforderlich (siehe Abschnitt 2.2). Die am weitesten verbreitete Methode ist die Rüttelverdichtung. Prinzipiell wird infolge des Vibrationsvorgangs durch die extern aufgebrachte Einwirkung die Fließgrenze des Frischbetons aufgehoben [24], wodurch in diesem Zustand wie bei selbstverdichtendem Beton oder Fließbeton ihr Wert Null beträgt, siehe auch [22], [190] oder [191].

### **2.1.3.2 Zeitabhängige rheologische Eigenschaften**

#### ***Zementleim***

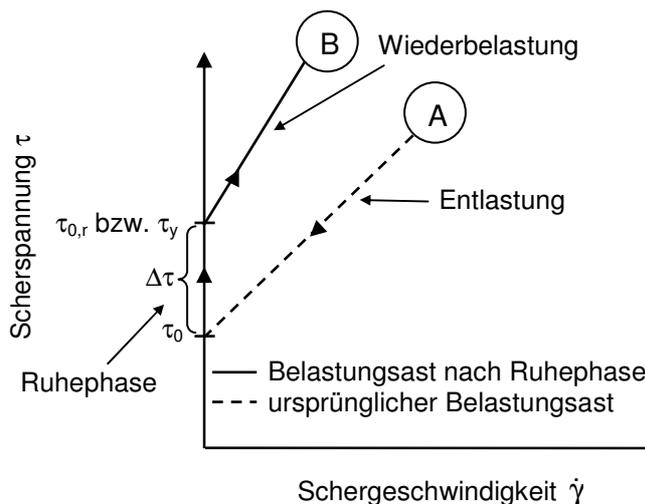
Da zementgebundene Werkstoffe sich durch einen Ansteif- bzw. Hydratationsvorgang auszeichnen (s. o.), führt dies (zunächst während des Ansteifvorgangs) zu einer Zeitabhängigkeit ihres Fließverhaltens im frischen Zustand [36], [186], [214]. Das zeitabhängige rheologische Verhalten von frischem Zementleim wird in der Regel als thixotrop eingestuft [34], [135], [201]. In Abhängigkeit von dem Zusatzstoff- bzw. Zusatzmittelanteil kann dabei der Thixotropiegrad größer (frischer selbstverdichtender Zementleim) oder geringer (frischer konventioneller Zementleim) ausgeprägt sein. Hinsichtlich des frischen konventionellen Zementleims überwiegt dabei die Auffassung, dass dieser nach einem Strukturbruch (siehe Abschnitt 2.1.3.1 bzw. Bild 2.5) nicht wieder seine ursprüngliche Struktur wiederherstellen kann. Insofern ist dieser Vorgang als nur „quasi-thixotrop“ anzusehen. Infolge des Zusatzstoff- und Zusatzmittelgehalts kann jedoch hinsichtlich dem selbstverdichtendem Zementleim schon eher von einem thixotropen Verhalten ausgegangen werden [34], [138], [139]. Daher sind in diesem Zusammenhang zunächst auch die zeitabhängigen Zementleimeigenschaften von besonderem Interesse.

Während des temperaturabhängigen Ansteif- bzw. Hydratationsvorgangs werden die Zementleimeigenschaften durch den Einfluss einer zeitlichen Scherbelastung auf die Partikelformationen gekennzeichnet. Entsprechend müssen in diesem Zusammenhang auch die temperaturabhängigen Zementleimeigenschaften berücksichtigt werden, insbesondere bei der Zugabe von Fließmittel [217]. Folglich wird die Zeitabhängigkeit der rheologischen Eigenschaften neben der Dauer der auftretenden Scherdeformation vor allem auch durch den temperaturabhängigen Ansteif- bzw. Hydratationsvorgang beeinflusst [36], [181], [201]. Bedingt durch ihre Temperaturabhängigkeit kann eine Verwendung von Fließmittel [133], [181], [219] oder organischem bzw. anorganischem Stabilisierer die Stoffrheologie beeinträchtigen [103], [114], [217]. Entsprechend sind in diesem Zusammenhang auch weitere Zusatzmittel wie Verzögerer und Luftporenbildner zu nennen.

**Frischer Mörtel und Beton**

In Abhängigkeit von dem Zusatzstoff- bzw. Zusatzmittelanteil weisen sowohl frischer Mörtel als auch Beton in der Regel einen Wiederaufbau nach einem Strukturbruch auf [34]. Dies gilt beispielsweise auch für den Einsatz von Stabilisierern [106]. Der Strukturwiederaufbau kann entsprechend den oben beschriebenen zeitabhängigen Zementleimeigenschaften mehr oder weniger ausgeprägt sein. Die thixotropen Eigenschaften können somit als reversibel betrachtet werden [34], [115], [135]. Sie sind unter Umständen für frischen Mörtel bzw. Beton nicht in dem gleichen Maße ausgeprägt wie bei einem entsprechenden Zementleim [135], werden aber wesentlich durch diesen beeinflusst [206]. Eine eingehende Darstellung der thixotropen Eigenschaften von Normalbeton und selbstverdichtendem Beton ist [34] oder [208] zu entnehmen. So wurde beispielsweise in [34] gezeigt, dass sich sowohl für frischen Normalbeton als auch frischen selbstverdichtenden Beton nach einem Strukturbruch ein Strukturwiederaufbau einstellt. Dieser ist im Wesentlichen von der Zugabe von Zusatzstoffen und -mitteln abhängig.

In [111], [120] sowie [205] ergibt sich das thixotrope Verhalten von Frischbeton aus dem auf den Strukturbruch (Punkt A, Bild 2.8) folgenden Wiederaufbau bereits wenige Minuten, nachdem die Ruhephase eingeleitet hat, siehe Bild 2.8. Infolgedessen wird eine Unterscheidung zwischen der herkömmlichen Fließgrenze bzw. dynamischen Fließgrenze  $\tau_0$  und einer sog. Ruhe-Fließgrenze  $\tau_{0,r}$  bzw. statischen Fließgrenze  $\tau_y$  vorgenommen. Um ein erneutes Fließen oder eine neue Verformung (Punkt B, Bild 2.8) hervorzurufen, muss die Ruhe-Fließgrenze bzw. statische Fließgrenze überwunden werden. Diese kann bis zu dem 6-fachen Wert der einfachen Fließgrenze betragen. Für das thixotrope Verhalten und damit die  $\tau_0$ - sowie  $\tau_{0,r}$ - bzw.  $\tau_y$ -Werte von Frischbeton ist in [11] in erster Linie die Betonmischung verantwortlich.



**Tabelle 2.2:** Größenordnung der Fließgrenzendifferenz für NB (unverdichtet) und SVB

Beton	Fließgrenzendifferenz $\Delta\tau$ [N/m <sup>2</sup> ]	Literaturquelle
NB	1115-1531	[120]
SVB	423	[34]

**Bild 2.8:** Qualitativer Zusammenhang zwischen dynamischer Fließgrenze und statischer Fließgrenze infolge Thixotropie am Beispiel eines Bingham-Körpers; in Anlehnung an [120] und [207]

Die statische Fließgrenze ist in [208] vor allem in Bezug auf den Frischbetondruck von Bedeutung, da diese es ermöglicht, einen Teil des Betoneigengewichts (und damit der Schalungsbelastung) infolge des zeitlichen Strukturaufbaus abzutragen. Die dynamische Fließgrenze sorgt hingegen für eine Beendigung des Fließprozesses innerhalb der Schalung. Die Differenz  $\Delta\tau = \tau_y - \tau_0$  (bzw.  $\Delta\tau = \tau_{0,r} - \tau_0$ ), d. h. zwischen statischer und dynamischer Fließgrenze, kann sich zum einen aus dem Betrag des thixotropen Strukturaufbaus sowie zum anderen aus der sich mit einer Belastung einhergehenden Veränderung der Partikelpackung ergeben.

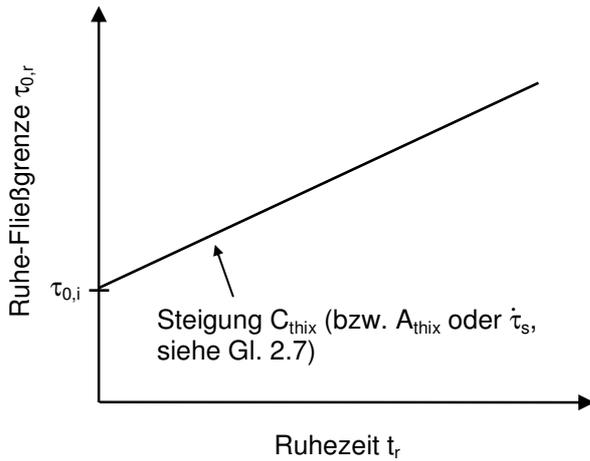
Im Zuge der in [120] vorgestellten experimentellen Ergebnisse von frischem Hochleistungsbeton betragen beispielsweise die entsprechenden  $\Delta\tau$ -Werte unverdichteter Betone 1115 N/m<sup>2</sup> bis 1531 N/m<sup>2</sup>, siehe Tabelle 2.2. Für einen verdichteten Beton hingegen ergibt sich dabei ein  $\Delta\tau$ -Wert von -19 N/m<sup>2</sup>. Dieser zeigt zwar grundsätzlich den Einfluss der Verdichtung auf die  $\Delta\tau$ -Werte, aber gleichzeitig auch, wie wichtig es ist, – wenn erforderlich – zur Bestimmung rheologischer Kenngrößen explizit eine Verdichtung durchzuführen. Gleichzeitig kann der o. g. negative  $\Delta\tau$ -Wert ein Indiz dafür sein, dass die Verdichtung die Thixotropie des Frischbetons aufgehoben hatte. Es ist davon auszugehen, dass die Zeitspanne zwischen der Bestimmung der  $\tau_0$ - bzw.  $\tau_{0,r}$ -Werte nicht groß genug war, damit der Strukturwiederaufbau einsetzen konnte [120]. Für selbstverdichtenden Beton ergeben sich beispielsweise aus den in [34] durchgeführten experimentellen Untersuchungen  $\Delta\tau$ -Werte von ca. 423 N/m<sup>2</sup> (siehe Tabelle 2.2).

In [152] wurde der in Gleichung 2.7 dargestellte lineare Zusammenhang zwischen der Ruhefließgrenze  $\tau_{0,r}$  von selbstverdichtendem Beton und der Ruhezeit  $t_r$  festgestellt (siehe auch Bild 2.9):

$$\tau_{0,r}(t_r) = \tau_{0,i} + A_{\text{thix}} \cdot t_r \quad (2.7)$$

mit	$\tau_{0,r}$ :	Ruhe-Fließgrenze	[kN/m <sup>2</sup> ]
	$\tau_{0,i}$ :	ursprüngliche Fließgrenze	[kN/m <sup>2</sup> ]
	$A_{\text{thix}}$ :	Flockungskoeffizient	[kN/(m <sup>2</sup> ·s)]
	$t_r$ :	Ruhezeit	[s]

Um die Steigung (Flockungskoeffizient  $A_{\text{thix}}$ ) der mittels Gleichung 2.7 beschriebenen Geraden bestimmen zu können, sind zwei  $\tau_{0,r}$ -Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb des Thixotropiezeitraums von ca. drei Stunden ausreichend (siehe auch Bild 2.9) [10], [34].



**Tabelle 2.3:** Größenordnung des Thixotropiekoeffizienten

Beton	Thixotropie- koeffizient $C_{thix}$ [N/m <sup>2</sup> ·s]	Literaturquelle
NB	0,04-0,07	[120]
SVB	0,1-0,2	[34]
	0,2-0,6	[129]

**Bild 2.9:** Zeitliche Entwicklung der Ruhe-Fließgrenze (statischen Fließgrenze); in Anlehnung an [34], [120] und [152]

Dieses Ergebnis wurde in [34] für selbstverdichtenden Beton bestätigt sowie in [120] für Normalbeton (Hochleistungsbeton). In [34] wird zur Beschreibung des Strukturaufbaus statt des Flockungskoeffizientens  $A_{thix}$  die Kenngröße  $\dot{\tau}_s$  [N/(m<sup>2</sup>·min)] eingeführt. In der Regel kann bei der Ermittlung der Ruhe-Fließgrenze nach Gleichung 2.7 der ursprüngliche  $\tau_{0,i}$ -Wert (nach Mischungsende) vernachlässigt werden [152]. Die rheologische Kenngröße  $A_{thix}$  (bzw.  $\dot{\tau}_s$ ) ist nach Gleichung 2.7 ein Maß für die zeitliche Fließgrenzenentwicklung und damit für die Thixotropie bzw. Strukturaufbau eines Stoffes bzw. Frischbetons. Aufgrund der bisher unterschiedlichen Parameterdefinitionen hinsichtlich des Strukturwiederaufbaus bzw. der Thixotropie des Frischbetons, soll im Folgenden die Bezeichnung „Strukturaufbaukoeffizient“ bzw. „Thixotropiekoeffizient“  $C_{thix}$  gewählt werden (siehe Bild 2.9).

Bei der in [152] durchgeführten experimentellen Versuchsreihe betrug der Wertebereich des Thixotropiekoeffizienten  $C_{thix}$  für selbstverdichtenden Beton zwischen 0,1 N/(m<sup>2</sup>·s) und 0,2 N/(m<sup>2</sup>·s), siehe Tabelle 2.3. Weitere Untersuchungen verschiedener Autoren ergaben Thixotropiekoeffizienten von 0,2 N/(m<sup>2</sup>·s) sowie von 0,6 N/(m<sup>2</sup>·s) [129]. Für Normalbeton (Hochleistungsbeton, Konsistenzklasse S1) ergeben sich aus den in [120] vorgestellten experimentellen Ergebnissen  $C_{thix}$ -Werte von ca. 0,04 N/(m<sup>2</sup>·s) bzw. ca. 0,07 N/(m<sup>2</sup>·s). Im Rahmen der Literatursichtung wurden für weitere Konsistenzklassen von Normalbeton keine Angaben gefunden. Entsprechend besteht diesbezüglich noch ein weiterer Forschungsbedarf.

Eine Einteilung des Strukturaufbau- bzw. Thixotropiegrades selbstverdichtender Betone ist [168] zu entnehmen. Diese kann allgemeingültig auf Frischbeton (und damit auch Normalbeton) übertragen werden. Demnach wird zwischen nicht-thixotropen ( $C_{thix} < 0,1$  N/[m<sup>2</sup>·s]), thixotropen ( $0,1$  N/[m<sup>2</sup>·s]  $\leq C_{thix} \leq 0,5$  N/[m<sup>2</sup>·s]) und hoch-thixotropen ( $C_{thix} > 0,5$  N/[m<sup>2</sup>·s]) Betonen unterschieden.

Außerdem konnte [34] in seinen experimentellen Untersuchungen bezüglich des zeitlichen Verlaufs der Fließgrenze auch feststellen, dass der Strukturaufbau selbstverdichtender Betone im unmittelbaren Zusammenhang mit der zeitlichen Ausbildung der dynamischen Fließgrenze

steht. Diese wird hauptsächlich durch die Mischungszusammensetzung beeinflusst. Dabei sind insbesondere die folgenden Einflussfaktoren von Bedeutung (siehe auch [132]): Fließmittelgehalt, Fließmittelart, Bindemittelgehalt, spezifische Bindemitteloberfläche sowie die Belastungsgeschichte. Der Fließmitteleinfluss führt dabei zu einer Neutralisierung der durch die Partikelkonzentration hervorgerufenen Prozesse.

Auf die in diesem Zusammenhang auftretenden Mechanismen und Wechselwirkungen geht [34] ein. Beim Überschreiten der statischen Fließgrenze und dem damit einsetzenden Strukturbruch zeichnen sich zementgebundene Werkstoffe durch den Übergang von einem elastischen zum plastischen Verhalten aus. Von großer Bedeutung für die Fließgrenzengröße ist dabei, ob der Messvorgang an einem unbelasteten oder schon zuvor beanspruchten Probekörper durchgeführt wird (Einfluss der Belastungsgeschichte). Bei einem vorausgegangenen Strukturbruch ergeben sich nach erneutem inneren Strukturaufbau vergleichsweise höhere Werte als ohne vorherige Werkstoffbeanspruchung. Als Ursache wird eine sog. „Dehnungsverfestigung“ vermutet, welche die Flockenbildungsgeschwindigkeit bei einer Belastung beträchtlich erhöht. Hervorgerufen wird der thixotrope Strukturaufbau durch das Auftreten interpartikulärer Kräfte im kolloidalen Bereich, d. h. mindestens eine Dimension der Partikelgröße bzw. des Partikeldurchmessers muss sich in einer Größenordnung von [nm] bis [µm] bewegen (Einfluss der Mischungszusammensetzung, des Bindemittelgehalts und der spezifischen Bindemitteloberfläche). Die Steuerung der interpartikulären Wechselwirkung bzw. Flockenbildung erfolgt dabei anhand positiv geladener VAN DER WAALS-Kräfte sowie negativ geladener doppelschichtiger Kräfte. Hinzu kommt die Strukturentwicklung, welche durch BROWNSche Bewegungen ermöglicht wird. Entsprechend beeinträchtigt die Zugabe von z. B. dispergierenden Fließmittelmolekülen in dem Grenzbereich zwischen Partikeloberfläche und kontinuierlicher Phase (Wasser) einen dreidimensionalen Strukturaufbau (Einfluss der Fließmittelart und -menge) [34].

Die Versuche zur Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der rheologischen Kenngrößen selbstverdichtender Betone in [115] führten indessen zunächst zu relativ konstanten Fließgrenzen innerhalb eines Zeitraums von ca. 30 Minuten bis zu ihrer linearen Abnahme. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden oftmals negative Kennwerte bestimmt. Als eine Erklärung für dieses Phänomen sind die Unzuverlässigkeiten der Messwertbestimmung, die sich aus dem großen Einfluss des Anpassungsbereichs ergeben, angegeben worden.

Des Weiteren ist die Erzielung negativer Fließgrenzen aus rheologischer Sicht nicht erklärbar und bestätigt daher die grundsätzliche Problematik der rheometrischen Bestimmung rheologischer Kenngrößen zementgebundener Werkstoffe sowie deren Anpassung an rheologische Modelle.

## **2.1.4 Bestimmung rheologischer Kennwerte frischer zementgebundener Werkstoffe**

### **2.1.4.1 Allgemeingültige Methoden**

Wie bereits gezeigt wurde, lassen sich frische zementgebundener Werkstoffe rheologisch in die Gruppe der Suspensionen einordnen (siehe Abschnitt 2.1.3.1). Eine einfache und allge-

meingültige Bestimmung rheologischer Kennwerte von Suspensionen ist mit Hilfe verschiedener Modelle als Funktion ihres Feststoffanteils und der rheologischen Kenngrößen der einzelnen Phasen durchzuführen [47], [78], [217].

Beispielsweise sind in [78], [79] oder [217] semi-empirische Modelle zur Ermittlung der Fließgrenze bzw. der plastischen Viskosität von frischem Mörtel oder Beton zu finden. Hierbei erfolgt die Idealisierung des Mörtels bzw. Betons mittels einer festen und einer flüssigen Phase. Die Feststoffkonzentration  $\phi$  ergibt sich aus der Betonrezeptur. Sie wird aus der Gesteinskörnung, dem Zement und den Zusatzstoffen gebildet. Hingegen ergibt sich die flüssige Phase aus dem Wasser (siehe Abschnitt 2.1.3.1). Aufgrund der Berücksichtigung der Affinität der festen Phase bezüglich des Zusatzmittels ist hinsichtlich der Modellierung der Fließgrenze zu unterscheiden, ob eine Fließmitteldosierung vorgenommen wurde oder nicht. Die Bestimmung der Fließgrenze ohne Verwendung von Fließmittel erfolgt nach Gleichung 2.8 [78], [79], [217]:

$$\tau_0 = \exp(2,537 + 0,540 \cdot K'_g + 0,854 \cdot K'_s + 1,134 \cdot K'_c) \quad (2.8)$$

mit  $K'_g$ : Funktion der relativen Feststoffkonzentration der groben Gesteinskörnung [-]  
 $K'_s$ : Funktion der relativen Feststoffkonzentration des Sandes [-]  
 $K'_c$ : Funktion der relativen Feststoffkonzentration des Zements [-]

Gleichung 2.9 ermöglicht hingegen die Abschätzung der Fließgrenze bei der Zugabe von Fließmittel:

$$\tau_0 = \exp(2,537 + 0,540 \cdot K'_g + 0,854 \cdot K'_s + 0,224 \cdot K'_c) \quad (2.9)$$

Unabhängig von dem Fließmittelgehalt lässt sich nach Gleichung 2.10 die plastische Viskosität bestimmen:

$$\mu = \exp\left(26,75 \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_{\max}}\right) - 0,7448\right) \quad (2.10)$$

mit  $\frac{\phi}{\phi_{\max}}$ : relative Feststoffkonzentration [-]

Für die Mischungszusammensetzung zementgebundener Werkstoffe sind darüber hinaus insbesondere die Mahlfineinheit des Zements sowie der Wasserzementwert (w/z-Wert) von besonderer Bedeutung. Daher kann eine empirische Bestimmung der Fließgrenze und der plastischen Viskosität von Zementleim nach verschiedenen Methoden, siehe z. B. [88] und [204], erfolgen. Des Weiteren stehen zur Charakterisierung des rheologischen Frischbetonverhaltens geeignete, z. T. semi-empirische, Modelle zur Verfügung [47], [149], [217]. Da die Bestimmung der rheologischen Kennwerte im Rahmen der experimentellen Untersuchungen auf einem anderweitigen Wege erfolgte (siehe Abschnitt 3.3.2.3), sind diese Modelle jedoch für die vorliegende Arbeit nicht von weiterführendem Interesse.

### 2.1.4.2 Standardisierte Prüfverfahren für frischen Mörtel und Beton

Die Verarbeitbarkeit von frischem Mörtel und Beton charakterisiert die rheologischen Eigenschaften, ist jedoch nicht physikalisch definiert und keine messbare Kenngröße. Sie wird anhand der Konsistenz quantitativ beurteilt [201]. Somit können anhand der Verarbeitbarkeit bzw. Konsistenz (siehe auch [6], [8] und [122]) das Fließvermögen, die Verformbarkeit sowie für Normalbeton die Verdichtbarkeit beschrieben werden [135], [211]. Eine Klassifizierung der verschiedenen rheologischen Begriffe wird in [80] oder [188] vorgenommen. Diese können in qualitative (Klasse 1, z. B. Verarbeitbarkeit, Fließfähigkeit oder Konsistenz), quantitativ empirische (Klasse 2, z. B. Setzmaß oder Verdichtungsfaktor) sowie quantitativ fundamentale (Klasse 3, z. B. Viskosität oder Fließgrenze) Klassen eingeteilt werden.

Einfache bzw. herkömmliche rheologische Techniken zur Prüfung der Verarbeitbarkeit und damit der Fließgrenze und (plastischen) Viskosität von Frischbetonen sind für die Baustellenpraxis von elementarer Bedeutung. Die mit diesen Prüfmethoden einhergehende relativ geringe Aussagefähigkeit im Hinblick auf die absoluten rheologischen Kennwerte  $\tau_0$  oder  $\mu$  bzw.  $\eta$  führen jedoch zu einer Einschränkung ihres Anwendungsbereichs [36], [135], [211]. Insofern bezeichnet die Verarbeitbarkeit von Beton einen physikalischen Kennwert, der in erster Linie durch die Parameter Fließgrenze und Viskosität bestimmt wird [201]. Dies führt dazu, dass die entsprechenden Kenngrößen zwar „verschmiert“ die Fließgrenze und Viskosität enthalten [213], diese beiden rheologischen Parameter jedoch nicht eindeutig differenziert werden können. Dies wird in [36] bestätigt und u. a. dadurch begründet, dass der komplexe strömungsmechanische Ablauf während z. B. des Ausbreitmaßversuches zusätzlich durch die Unstetigkeit der Hubschläge des Ausbreitmaßversuches beeinflusst wird.

Als die wesentliche Frischbetoneigenschaft [201] wird auch in [148] die Verarbeitbarkeit durch verschiedene Parameter im Rahmen des Betonherstellungs- und Einbauprozesses bestimmt. Die für Mörtel [56], Normalbeton [59], [60] und selbstverdichtenden Beton [48] bei nationaler Anwendung bedeutendsten Prüfmethoden sind [134], [135], [196]:

- Ausbreitversuch zur Bestimmung des Ausbreitmaßes und damit der Konsistenzklasse von Normalbeton
- Setzfließversuch zur Erfassung des Setzfließmaßes von selbstverdichtendem Beton
- Trichterauslaufversuch zur Ermittlung der Trichterauslaufzeit von selbstverdichtendem Beton

Zu den verschiedenen standardisierten Prüfverfahren (siehe z. B. [208], [209] und [212] für Normalbeton bzw. [98], [134] und [136] für selbstverdichtenden Beton) zählen z. B. die Setzzeit, das Setzmaß und das Verdichtungsmaß (für frischen Normalbeton) [135] sowie das Setzfließmaß mit Blockierring (für selbstverdichtenden Beton). Eine Übersicht der Einflussparameter der Prüfmethoden ist in [135] sowie [148] dargestellt. Diese sind z. B. das Zusammenhaltevermögen, die Verdichtungswilligkeit oder die Sedimentationsneigung [135].

Bei standardisierten Prüfverfahren handelt es sich um „Ein-Punkt-Verfahren“, die es ermöglichen, die Frischbetonkonsistenz anhand rheologischer Ersatzgrößen zu bestimmen. Da sie lediglich einen einzigen Punkt auf der Fließ- oder (plastischen) Viskositätskurve ergeben, ist eine Aufstellung der zugehörigen rheologischen Funktion nicht möglich. Je nach Art beschreiben sie eher die Fließgrenze – so z. B. bei dem Ausbreitmaß- oder Setzfließmaßversuch – und die Viskosität (z. B. Verdichtungs- oder Trichterauslaufversuch) [80], [135], [136]. Jedoch lässt sich in [82] die plastische Viskosität noch nicht durch ein einfaches Prüfverfahren bestimmen.

Hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der standardisierten Prüfverfahren bestimmter Konsistenzgrößen ist festzuhalten, dass es nach Beendigung des Mischvorgangs mit zunehmender Zeit zu einer Reduzierung der Frischbetonkonsistenz kommt. Dies ist hauptsächlich in der Evaporation oder in den (physikalischen und) chemischen Reaktionen des (Ansteif- bzw.) Hydratationsprozesses begründet. Des Weiteren führen erhöhte Temperaturen zu einem Anstieg des Wasserverlustes und demzufolge zur Konsistenzabnahme [137].

### 2.1.4.3 Rheometrische Prüfverfahren

Aufgrund der in Abschnitt 2.1.4.2 beschriebenen Nachteile sind die standardisierten Prüfverfahren (z. B. Ausbreitmaß) hinsichtlich der absoluten Bestimmung der rheologischen Kenngrößen Fließgrenze und Viskosität subjektiv und von geringer Aussagekraft. Daher reichen diese rheologischen Messmethoden nicht aus und sind vor allem für die Entwicklung neuer Betone eher ungeeignet. Dies führt zu einem Bedarf an zusätzlichen rheometrischen Methoden [36]. Innerhalb der Rheologie ist es Aufgabe der Rheometrie anhand eines messtechnischen Vorgangs die charakteristischen Fließeigenschaften eines Stoffes zu bestimmen [135]. Sie ermöglicht die Präzisierung subjektiver Charakterisierungen, wie z. B. „erdfeucht“, anhand stoffspezifischer Messparameter [36]. Insofern dient die Rheometrie der Ermittlung physikalischer Materialgesetze. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass dabei für frische zementgebundene Baustoffe in der Regel die physikalischen Randbedingungen zur Erfassung absoluter Werte nicht eingehalten werden können. In diesem Zusammenhang ist die Zusammensetzung der untersuchten Suspensionen gemeinsam mit der gewählten Rheometerbauart bzw. -geometrie von wesentlicher Bedeutung. Diese bestimmen die Messgenauigkeit der zu ermittelnden Kennwerte, welche z. B. infolge auftretender Wandgleiteneffekte oder Scherfugenbildung mit Fehlern behaftet sein können [135].

Rheometrische Verfahren werden als „Zwei-Punkt-Versuche“ bezeichnet, da im Rahmen eines Versuchsdurchgangs die rheologischen bzw. rheometrischen Parameter infolge einer variierenden Geschwindigkeit der aufgetragenen Belastung erfasst werden können [135], [189]. Ein detaillierter Überblick über verschiedene Rheometerarten ist in [117] gegeben. Dabei handelt es sich z. B. um Torsions- oder Rotationsrheometer. Diese unterscheiden sich in der Art der Lastaufbringung.

Eine Erfassung rheologischer Parameter frischer zementgebundener Werkstoffe erfolgt in der Regel durch den Einsatz von Rotationsrheometern [36]. Bei einem Rotationsrheometer wird

ein Messkörper einer Drehung ausgesetzt, nachdem er entweder in die Probe eingetaucht oder auf die Probe aufgesetzt wurde. Bei vorgegebenen Strömungsverhältnissen werden die rheologischen Kennwerte anschließend rechnerisch aus den Parametern Winkelgeschwindigkeit und Drehmoment ermittelt. Jedoch ist die Rheometrie z. Zt. noch nicht so weit ausgereift, dass eine eindeutige Bestimmung problemlos durchgeführt werden kann. Wie oben bereits erwähnt, besitzt jedes Rheometer Nachteile. So können z. B. bei einer Untersuchung frischer zementgebundener Baustoffe infolge ihrer Partikelgrößenverteilung die geometrischen Randbedingungen nicht erfüllt werden [36].

Die rheometrisch erfasste Fließgrenze  $\tau_0$  wird in bedeutendem Maße von dem eingesetzten Rheometer und damit seiner charakteristischen Messgeometrie beeinflusst. Diese Problematik führt dazu, dass die Fließgrenze oftmals als „scheinbare Fließgrenze“ definiert wird. Weitere Probleme ergeben sich u. a. hinsichtlich der Auswertung der Messergebnisse [36].

Um die so erfassten Messgrößen, welche proportional zu der Fließgrenze und Viskosität des Frischbetons sind [19], in physikalisch eindeutige Werte umzuwandeln, müssen zuvor gerätespezifische Messkonstanten definiert werden [94]. Grundsätzlich erweist dies sich als sehr komplexer Vorgang, welcher in Abhängigkeit von der Rheometerbauart bzw. der damit verbundenen Umrechnung große Unsicherheiten in sich birgt.

Eine Auswahl von Messergebnissen verschiedener Rheometer für Mörtel, Normalbeton und selbstverdichtenden Beton ist in [34], [115] sowie [208] zusammengestellt und gibt einen Überblick über die unterschiedliche Größenordnung der erfassten rheologischen Kenngrößen. Dabei betragen beispielsweise bei gleicher Mischungszusammensetzung und Verwendung unterschiedlicher Rheometerarten die Differenzen der ermittelten Fließgrenzen  $\tau_0$  des untersuchten Frischbetons bis zu ca.  $1500 \text{ N/m}^2$ .

## 2.2 Betriebszustände des Betoneinbaus

Der Betoneinbau in die Schalung muss im Zusammenhang mit der Betontechnologie, der Bauwerksgeometrie, dem Fördersystem sowie der Verdichtungstechnik betrachtet werden. Als moderne Fördersysteme werden heute die Betonpumpe sowie die Schurre des Fahrmi-schers bei annähernd ebenem Einbau für die stetige, der Kran mit Kübel für die unetige Förderung eingesetzt. In der Regel erfolgt der Betoneinbau unabhängig von dem jeweiligen Fördersystem und der Betonkonsistenz „von oben“. Dabei müssen zur Vermeidung von Entmischungerscheinungen empfohlene bzw. vorgegebene Fallhöhen berücksichtigt werden [26], [27], [49]. Im Gegensatz zu verdichtendem Normalbeton (siehe [50]) kann bei selbstverdichtenden und fließfähigen Betonen (siehe [108] bzw. [109]) in Sonderfällen der Einbau mit Betonpumpen über einen besonderen Einfüllstutzen in die Schalung „von unten“ bzw. „seitlich“ erfolgen [98].

## 2.3 Schalungstechnik zur Erstellung von Betonbauteilen

### 2.3.1 Klassifikation

Eine Einteilung der einzelnen Schalungsarten lässt sich grundsätzlich vornehmen in [161]:

- Wandschalung
- Deckenschalung
- Projektschalung

Die primäre Aufgabe einer Schalung besteht darin, als Hilfskonstruktion bei dichtem kraftschlüssigen Formabschluss dem eingebauten Beton, unter normgeregelter Vorgabe einer Toleranz, die gewünschte Gestalt zu geben. Dabei müssen alle aus dem Einbau resultierenden Beanspruchungen bzw. Belastungen aufgenommen und in einen tragfähigen Untergrund abgeleitet werden [93], [161].

Die Wandschalung dient, unter den o. g. Anforderungen, der Aufnahme der mit dem Beton einbau verbundenen Belastungen in horizontaler Richtung. Die Deckenschalung übernimmt dieselbe Aufgabe wie die Wandschalung, allerdings zur Ableitung der Betoneinbaubeanspruchung in vertikaler Richtung. Zu der Gruppe der Projektschalungen zählen u. a. die Kletter-, die Gleitschalung sowie Sonderschalungen wie z. B. die Tunnelschalung oder die Behälter-schalung. Bei diesen Konstruktionsarten können im Einzelnen sowohl horizontale wie auch vertikale oder aber aus beiden Richtungen kombinierte Beanspruchungen auftreten.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung und Analyse des horizontalen Frischbetondrucks bei lotrechten bzw. vertikalen Wandschalungen. Insofern soll an dieser Stelle lediglich diese Schalungsart behandelt werden. Wandschalungen dürfen bei der Errichtung senkrechter Bauwerke und Wandbauteile einen von der Vertikalen abweichenden Neigungswinkel von maximal  $\pm 5^\circ$  besitzen [51].

Das Streben nach einer vereinfachten Bedienbarkeit und einer flexiblen Anpassung sowie sicherheitstechnische Vorteile – bei gleichzeitig hoher Verfügbarkeit – führten zur Entwicklung von Systemschalungen. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung der freien Schalung, welche entweder als Brettschalung oder durch Schalungsplatten ausgebildet werden [93], [171]. Eine Systemschalung besteht aus einer Auswahl standardisierter und frei kombinierbarer Schalungsmodule, die baukastenartig zusammengesetzt oder auseinandergesetzt werden können. Neben einem erheblich vereinfachten Schalungsaufbau können die Module auf diese Weise für verschiedene Aufgaben und Bauwerksarten eingesetzt werden.

In erster Linie sind Schalungsplatten die wesentlichen Bestandteile von Systemschalungen [156]. Bevorzugt werden Systemschalungen als Trägerschalung oder Rahmenschalung eingesetzt. Aufgrund der Konstruktionsweise von Trägerschalungen lassen sich Frischbetondruckeinflüsse auf die einzelnen Systemelemente gut untersuchen. Der Einsatz von Systemschalungen führt zu einer erheblichen Reduzierung der Lohn- und Materialkosten [145], [162]. Da-

durch wurden die Wirtschaftlichkeit erhöht und die Einsatz- sowie Verwendungsmöglichkeiten von Schalungen erheblich ausgeweitet [171].

Neben ihren technischen und konstruktiven Leistungsmerkmalen spielen u. a. auch wirtschaftliche Faktoren für die Schalungsauswahl eine entscheidende Rolle. Dies ist in besonderem Maße von Interesse, da aufgrund des allgemein hohen Arbeitszeitanteils und den damit verbundenen Lohnkosten die Schalung anteilmäßig einen der größten Kostenfaktoren von Betonbaustellen darstellt [161].

### 2.3.2 Schalungselemente und -aufbau

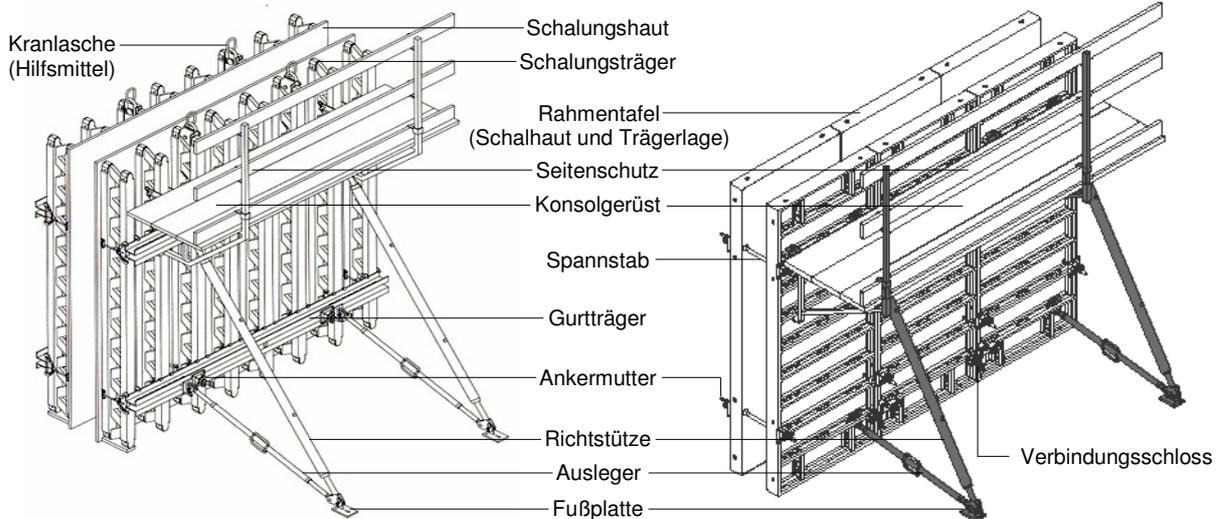
Grundsätzlich setzt sich eine Wandschalung – hier am Beispiel einer konventionellen Trägerschalung – aus den nachfolgenden Grundelementen zusammen, siehe auch Bild 2.10 [93], [171]:

- Schalungs- bzw. Schalhaut
- Schalungsträger (Schalhautunterstützung)
- Gurträger bzw. Riegel (Lastsammler)
- Verankerung bzw. Schalungsanker (Lastableiter, Unterstützungssystem)

Als unmittelbare Kontaktzone zu dem eingebauten Beton ist die Schalhaut für die Formgebung, die Oberflächenbeschaffenheit und -struktur verantwortlich. Dies führte zu einer Differenzierung der Schalhaut in saugend und nicht saugend. Der Unterschied dieser beiden Schalhautarten liegt darin begründet, dass bei einer saugenden Schalung das Überschusswasser des eingebauten Betons aufgenommen werden kann. Hingegen ist dies bei einer nicht saugenden Schalhaut, die sich durch eine glatte Betonoberfläche auszeichnet, nicht der Fall [171]. Je nach Bedarf können als Schalhautmaterial Massivholz, Holzwerkstoff, Metall oder Kunststoff gewählt werden. Dabei werden heute noch im Regelfall verschiedene Plattenarten aus Holzwerkstoffen wie z. B. Span-, Schichten- und Sperrholzplatten als die gebräuchlichsten Varianten eingesetzt. Als Auflager für die Schalhaut der Trägerschalung dienen Schalungsträger, die die von der Schalhaut aufgenommenen Kräfte in die Gurträger als Lastsammler in die Verankerung ableiten. In der Regel sind die Gurträger horizontal ausgerichtet und liegen damit rechtwinklig auf den Schalungsträgern auf [93], [171]. Je nach Bedarf kommen zusätzlich noch Aussteifungen, Verbindungsmittel bzw. -elemente sowie verschiedene Zubehörteile hinzu, wie z. B. Hüllrohre, die zum Schutz der Schalungsanker (Spannstab und Anker Mutter) vor dem eingebauten Beton dienen und damit deren Wiederverwendung ermöglichen [93]. Bei einem Aufstellen der Schalung wird ein Trennmittel auf die Schalhaut aufgebracht, welches eine evtl. Haftung des Betons an der Schalhaut verhindert [156]. Auch die übrigen Schalungsarten setzen sich in erster Linie aus den genannten Grundelementen zusammen, grenzen sich jedoch hinsichtlich der Art und Weise ihrer Konstruktion und Werkstoffe voneinander ab, siehe Bild 2.10.

**Trägerschalung**

**Rahmenschalung**



**Anmerkung:**  
aufgrund ihrer Positionierung sind hier die Schalungsanker der Trägerschalung nicht sichtbar

**Bild 2.10:** Grundelemente einer Trägerschalung (links) und einer Rahmenschalung (rechts); in Anlehnung an [156]

Im Hinblick auf die Wand-Systemschalung sind neben der Trägerschalung verstärkt Rahmenschalungen am meisten verbreitet. Sie ermöglichen durch ihre einheitliche Verbindung von Schalhaut, Schalungsträger und Gurtung (bzw. Gurträger) einen vereinfachten zeit- und lohnsparenden Baustelleneinsatz. Dabei wird die Lastableitung über die integrierten Grundelemente (Schalhaut, Schalungsträger und Gurtung) in die Verankerung geführt.

**2.4 Einflussfaktoren auf den Frischbetondruck**

Für eine wirklichkeitsnahe Bestimmung des horizontalen Frischbetondrucks sind aufgrund der Vielzahl der auftretenden Einflüsse fundierte Kenntnisse über ihre Gewichtung unabdingbar. Da die Summe der Einflussparameter in der Regel nicht einzeln, sondern kombiniert auf den resultierenden Frischbetondruck einwirkt, wird ihre Erfassung und Sondierung in erheblicher Weise beeinträchtigt. Zudem kommt erschwerend hinzu, dass ihr Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der eingebauten Betonart signifikanten Schwankungen ausgesetzt ist. So müssen bei dem komplexen Einbau von Normalbeton im Gegensatz zu dem vereinfachten Einbau von selbstverdichtendem Beton bestimmte Einflussparameter zusätzlich berücksichtigt werden. Eine grobe Einteilung der einzelnen Einflussgrößen, über welche in verschiedenen, hier nur exemplarisch aufgezeigten Veröffentlichungen berichtet wurde, lässt sich in die drei nachfolgenden Kategorien vornehmen:

- Einflussfaktoren, welche sich aus der Betonzusammensetzung ergeben
- Umwelteinflüsse, z. B. Umgebungstemperatur [76], [95] und -feuchte
- Einflussparameter aus Versuchsaufbau und -durchführung

In Tabelle 2.4 sind bisher untersuchte Rezeptureinflüsse auf den Frischbetondruck exemplarisch zusammengefasst.

**Tabelle 2.4:** Erkenntnisstand (Auswahl) über den Einfluss verschiedener Rezepturparameter auf den Frischbetondruck von frischem Normalbeton und selbstverdichtendem Beton mit zugehörigen Literaturangaben

Einflussparameter	Literaturquelle	
	Normalbeton	selbstverdichtender Beton
Betonmischung	[76], [165]	[32], [33]
Größtkorn	[90], [95]	[16], [142]
wirksamer Wassergehalt	[76], [166], [182]	–
Zementgehalt	[165], [166]	[15]
w/z-Wert	–	[16], [131]
Bindemittelart	–	[14], [142]
Zusatzmittelart	[151]	[131], [142]
Rohdichte	[95], [119]	–
Konsistenz	[105], [167], [195]	[14], [33], [39]
Rheologie	–	[12], [130], [141]
Frischbetontemperatur	[92], [166], [195]	[17], [39]
Erstarrungszeit	[4], [197], [215]	[14], [157], [194]

Bisher wurden verschiedene Klassifizierungen der einzelnen Einflussparameter sowohl für frischen Normalbeton [158], [159], [184] als auch für frischen selbstverdichtenden Beton [98], [132] vorgenommen. Bei den einzelnen Einordnungen fällt auf, dass sowohl für den Frischbetondruck von Normalbeton als auch für den von selbstverdichtendem Beton die Einflussgrößen Einbaugeschwindigkeit, Konsistenz, Rohdichte und Frischbetontemperatur von höchster Bedeutung sind.

In [183] lassen sich die in Tabelle 2.4 aufgeführten Einflussparameter für Frischbeton (d. h. zu dem damaligen Zeitpunkt Normalbeton) als erstrangig (Rohdichte, Konsistenz und dementsprechend auch Rheologie sowie Frischbetontemperatur), zweitrangig (Erstarrungszeit, Zusatzmittelart sowie Porenwasserdruck und damit wirksamer Wassergehalt) und drittrangig (Größtkorn und Bindemittelart) klassifizieren. Hinsichtlich der erstrangigen Einflussgrößen

führen eine größere Rohdichte, höhere Konsistenz bzw. geringere Fließgrenze sowie eine verminderte Frischbetontemperatur zu einem Frischbetondruckanstieg. Hinsichtlich des Frischbetondrucks von selbstverdichtendem Beton sind in [152] von den in Tabelle 2.4 zusammengefassten Einflussparametern die Rheologie sowie die Rohdichte als maßgebend identifiziert worden. Da die rheologischen Frischbetoneigenschaften bis auf die Erstarrungszeit von den übrigen in Tabelle 2.4 aufgezeigten Parametern beeinflusst werden, sind dementsprechend auch diese in erster Linie (mehr oder weniger, siehe Abschnitt 2.1.3) für den sich einstellenden Frischbetondruck verantwortlich. Infolge der rheologischen Eigenschaften (siehe Abschnitt 2.1.3) von frischem Normalbeton und selbstverdichtendem Beton lassen sich die obigen, für eine Betonart dargestellten Ausführungen entsprechend auf die jeweils andere Betonart übertragen.

**Tabelle 2.5:** Erkenntnisstand (Auswahl) über die aus Versuchsaufbau und -durchführung resultierenden Einflussparameter auf den Frischbetondruck von frischem Normalbeton und selbstverdichtendem Beton mit zugehörigen Literaturangaben

Einflussparameter	Literaturquelle	
	Normalbeton	selbstverdichtender Beton
Einbaugeschwindigkeit	[95], [119], [177]	[28], [32], [41]
Einbautechnik (von oben bzw. unten)	–	[32], [39], [140]
Schalungsdurchbiegung bzw. -steifigkeit	[76], [95], [199]	[29]
Bauteilgeometrie	[76], [95], [167]	[98], [130]
Einbauhöhe	[95], [165], [177]	[32], [39], [141]
Verdichtungstiefe	[76], [151], [182]	–
Verdichtungsart	[95]	–
Verdichtungsdauer	[182]	–
Schalungsmaterial	[182]	[32]
Schalhautrauhigkeit	[182]	[70], [71], [200]
Schalungswandreibung	[37], [113], [182]	[157], [200]
Bewehrungsgrad	[167]	[98]

Wie die Zusammenstellung in Tabelle 2.5 zeigt, konnten ebenso hinsichtlich der zur Gruppe Versuchsaufbau und -durchführung gehörenden Einflussgrößen für Normalbeton sowie selbstverdichtendem Beton vielfältige Erfahrungen gewonnen werden. Diese lassen sich ebenfalls in [183] in erster Linie (Einbaugeschwindigkeit, Verdichtungsart und Verdichtungstiefe),

zweitrangige (Verdichtungsdauer und Schalungsdurchbiegung bzw. -steifigkeit) sowie drittrangige (Einbautechnik, -höhe und Bewehrungsführung bzw. evtl. Bewehrungsgrad) Parameter klassifizieren. Dabei kann eine Frischbetondruckerhöhung infolge der erstrangigen Einflussparameter durch höhere Einbaugeschwindigkeiten, Verwendung eines Außenrüttlers sowie größere Verdichtungstiefen erfolgen. Da es sich ausschließlich um baubetriebliche und schalungskonstruktive Kenngrößen handelt, ist diese Klassifizierung grundsätzlich für Frischbeton gültig.

Die nachfolgenden Abschnitte der Literatursichtung legen den Schwerpunkt auf die Einflussgrößen und die damit verbundenen Erkenntnisse, welche für die Ableitung eines physikalischen Materialgesetzes unter Berücksichtigung schalungs- und einbautechnischer Aspekte von essentieller Bedeutung sind. Des Weiteren sind auch diejenigen Parameter von Interesse, deren qualitativer Einfluss bisher noch nicht genau bestimmt werden konnte.

### 2.4.1 Frischbetonrheologie und Konsistenz

Der „effektive Frischbetondruck“, der sich allein aus den Stoffeigenschaften ergibt, kann sowohl für Normalbeton als auch für selbstverdichtenden Beton grundsätzlich auf eine Kombination physikalischer Größen (z. B. Konsistenz oder Fließgrenze) sowie auf die Mischcharakteristik (Zementart und -gehalt, Gesteinskörnungsart, Wassergehalt, Zusatzmittel etc.) zurückgeführt werden. Hierbei sind in erster Linie die Thixotropie und damit der Strukturwiederaufbau maßgebend [132], siehe Abschnitt 2.1.3.2.

Eine wichtiges Werkzeug zur Beurteilung des Frischbetondrucks ist das Verhältnis von dem tatsächlichen Frischbetondruck zu dem auf seine Wichte bezogenen (theoretischen) hydrostatischen Druck  $\sigma_{\text{hyd}} = \gamma \cdot h$  [kN/m<sup>2</sup>], der sog. „relative hydrostatische Schalungsdruck“  $\sigma_{\text{hyd,rel}} = \sigma_{\text{mess}} / \sigma_{\text{hyd}}$  [132]. Dabei bezeichnet  $h$  [m] die Einbauhöhe des Betons in der Schalung sowie  $\sigma_{\text{mess}}$  [kN/m<sup>2</sup>] den gemessenen Frischbetondruck. Die zugehörigen Druckeinheiten betragen für  $\sigma_{\text{hyd}}$  [kN/m<sup>2</sup>] und für  $\sigma_{\text{hyd,rel}}$  [%] bzw. [-]. Der relative hydrostatische Schalungsdruck ermöglicht es, Schalungsdruckmessungen verschiedener Materialien (z. B. Betonarten) miteinander vergleichen zu können, unabhängig von ihrer unterschiedlichen Rohdichte.

Eine Vielzahl experimenteller Untersuchungen führte zu der Erkenntnis, dass eine zeitliche Abnahme des relativen hydrostatischen Schalungsdrucks mit einer Reduzierung der Betonkonsistenz einhergeht. Dabei wurden das Setzmaß (von frischem Normalbeton) [91], [165], [167] sowie das Setzfließmaß (von frischem selbstverdichtenden Beton) [98], [131], [141] betrachtet. Bei einem höheren Konsistenzgrad bedingt die Verringerung der Scherfestigkeit bzw. des Scherwiderstandes, dass das Material sich mehr dem Stoffverhalten einer Flüssigkeit annähert, was eine Erhöhung seines relativen hydrostatischen Schalungsdrucks hervorruft. Die genauen Gesetzmäßigkeiten bzgl. der Abhängigkeit des relativen hydrostatischen Schalungsdrucks von den einzelnen Konsistenzmaßen konnten bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht eindeutig geklärt werden [132].

Allerdings sind in der gesichteten Literatur auch vereinzelt experimentelle Ergebnisse zu finden, welche im Widerspruch zu den obigen Ausführungen stehen. Sie verneinen den Zusammenhang zwischen dem Frischbetondruck und der Verarbeitbarkeit von Beton. Dabei wurde kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Frischbetondruck (von selbstverdichtendem Beton) und der Verarbeitbarkeit festgestellt [142]. Dies ist vermutlich damit zu begründen, dass die Konsistenz die beiden rheologischen Kenngrößen Fließgrenze und Viskosität nur verschmiert abbilden kann, siehe Abschnitt 2.1.4.2.

Im Hinblick auf die thixotropen Eigenschaften geht man davon aus, dass die Phänomenologie des Strukturwiederaufbaus im Ruhezustand vor allem auf die innere Reibung, die Anziehungskräfte der Festpartikel untereinander sowie auf das Anwachsen des Grades der mit dem Ansteifvorgang (bzw. zu einem späteren Zeitpunkt dem Hydratationsvorgang) einhergehenden physikalischen (und den später einsetzenden chemischen) Verbindungen zurückzuführen ist (siehe Abschnitt 2.1.3.2 bzw. Bild 2.9). Dies resultiert in einer signifikanten Abhängigkeit des zeitlichen Druckabfalls von dem Strukturwiederaufbau. Ein Frischbeton, dessen stoffphysikalische Struktur die Fähigkeit besitzt, einen schnellen Wiederaufbau zu vollziehen, entwickelt unmittelbar nach dem Einbau in die Schalung eine größere Kohäsion, d. h. Scherfestigkeit (siehe [104]). Daher zeichnet er sich durch einen geringeren Frischbetondruck als den auf seine Wichte bezogenen hydrostatischen Druck  $\sigma_{\text{hyd}}$  aus. Eine derartige Druckcharakteristik wurde durch die Beobachtung zahlreicher Autoren bestätigt, u. a. in [32], [40] und [178]. Weitere experimentelle Untersuchungen, z. B. in [28] oder [152], zeigen eine Abhängigkeit des Frischbetondrucks von den rheologischen Eigenschaften, vornehmlich der Fließgrenze. Darüber hinaus führten Untersuchungen in [83] zu der Erkenntnis, dass die Thixotropie bzw. der Strukturaufbau eines Zementleims (siehe Abschnitt 2.1.3.2), aufgrund der Koagulationskräfte und des Zusammenstoßes der einzelnen Stoffpartikel, abhängig von seinen eingepprägten Fließeigenschaften ist [132].

## 2.4.2 Einbaugeschwindigkeit

Der Einfluss der Einbaugeschwindigkeit auf den Frischbetondruck ist in zahlreichen experimentellen Untersuchungen studiert worden. Diese führten sowohl für Normalbeton [91], [165], [166] als auch für selbstverdichtenden Beton [28], [77], [128] in der Regel zu dem Ergebnis, dass die Erhöhung der Einbaugeschwindigkeit mit einer Zunahme des resultierenden Frischbetondrucks verbunden ist. In Bezug auf Normalbeton (und damit auch auf selbstverdichtenden Beton) kam man in [91] zu der Erkenntnis, dass bei einem verhältnismäßig langsamen Betoniervorgang dem bereits eingebauten Beton mehr Zeit zur Verfügung steht, um eine höhere Scherfestigkeit zu entwickeln, welche zu einer Reduzierung des auftretenden Frischbetondrucks führt.

Aus den o. g. Ergebnissen über den Einfluss der Einbaugeschwindigkeit auf den Frischbetondruck (am Beispiel von selbstverdichtendem Beton) folgt, dass ein voller hydrostatischer Druck dann erreicht wird, wenn infolge der Höhe der Einbaugeschwindigkeit ein Ansteifen des in die Schalung eingebauten Betons verhindert wird. Ist jedoch, wie z. B. bei hohen großflächigen Wandbauteilen, die Möglichkeit eines ausreichenden Ansteifvorgangs gewährleis-

tet, so führt dies zu Druckwerten, welche beträchtlich unter dem jeweils relativen hydrostatischen Schalungsdruck liegen können [132]. Derartige Ergebnisse sind in [31], [179] oder [180] dokumentiert. Diesbezüglich ist jedoch zu differenzieren, dass bei der Konstruktion kleinflächiger Bauteile, wie z. B. Stützen, in der Regel höhere Einbaugeschwindigkeiten gewählt werden, wodurch sich der oben beschriebene Effekt nicht ausbilden kann.

In der gesichteten Literatur (siehe auch [29] bzw. [157]) war die Vielzahl der im Hinblick auf den Einfluss des Parameters Einbaugeschwindigkeit durchgeführten experimentellen Versuche bislang dennoch nicht ausreichend, um daraus schlüssige mechanische Gesetzmäßigkeiten abzuleiten. Zur Aufstellung funktionaler Abhängigkeiten bediente man sich dementsprechend meist empirischer Methoden. Eine Ursache dafür ist in [98], dass bei der wissenschaftlichen Analyse der einzelnen Messergebnisse die Betrachtung der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons vernachlässigt worden ist.

### **2.4.3 Durchbiegung vertikaler Schalungen**

Die Frage der Frischbetondruckbeeinflussung durch die sich aus der Schalungsverformung ergebende Durchbiegung resp. durch die Schalungssteifigkeit wurde in der Forschung bisher weitgehend vernachlässigt. Nur vereinzelt wurde über die Auswirkung der Schalungssteifigkeit auf den Frischbetondruck von frischem Normalbeton berichtet, siehe [199]. Darüber hinaus wurde in [97] (siehe auch [157]) ein Bezug zwischen der Schalungsverformung zu der allgemeinen Wirkungsweise des aktiven Erddrucks festgestellt, siehe [203]. Entsprechend führt eine Schalungsverformung zu einer Frischbetondruckreduzierung. Während in [199] bei nachgebenden Schalungen eine Druckverminderung im Hinblick auf die Schalungsbemessung angesetzt werden kann, wird dies für steife Schalungen nicht empfohlen [76], s. u. In [199] führen nachgebende Schalungen zu elastischen Verformungen und damit zu einer Reduzierung des Frischbetondrucks. Gemäß der aktuellen Konsistenzklassifizierung [60] bewegten sich die in [76] bzw. [199] untersuchten Betone in einem Bereich von F1 bis F2, siehe auch [42].

Ein funktionaler Zusammenhang der Schalungsdurchbiegungsproblematik konnte jedoch erstmals in [76] formuliert werden. Dabei wurde erkannt, dass die Schalungsverformungen den auftretenden Frischbetondruck entscheidend beeinflussen. Gleichzeitig wurde ein Ansatz vorgestellt, welcher die Schalung als statisch elastischen Mehrfeldträger betrachtet. Infolge der Statik ergeben sich aus bekannten Tabellenwerken, z. B. in [172], in Abhängigkeit der Anzahl der Felder somit in der Feldmitte des äußeren Feldes die maßgebenden Durchbiegungen. Haben die Felder des jeweiligen statischen Systems erst einmal eine Verformung erfahren, so kann diese nur dann wieder abgemindert werden, wenn der in die Schalung eingebaute Beton (Konsistenz F1 bzw. F2, s. o.) sich noch in einem verformbaren Stadium befindet und damit entweder komprimiert oder auf irgendeine Weise verlagert werden kann. Ist dies aufgrund des einsetzenden Hydratationsvorgangs (Hydratationsstadium II, siehe Bild 2.6) nicht mehr der Fall, so stellt sich ein „passiver Schalungsdruckzustand“ ein. Bei einem bereits erstarrenden Beton (Hydratationsstadium III, siehe Bild 2.6) kann eine Volumenverringerung infolge von Schrumpfen sowie Schwinden erfolgen und damit zu einer Frischbetondruckabnahme führen

[76]. Die im Rahmen des Hydratationsvorgangs (d. h. Hydratationsstadium II und III, siehe Bild 2.6) ablaufenden Prozesse sind jedoch für die Frischbetondruckbemessung eher von untergeordneter Bedeutung, es sei denn bei Verwendung äußerst geringer Einbaugeschwindigkeiten. In diesem Zusammenhang erweist sich die Druckreduzierung bei steiferen Schalungen in [76] als weitaus größer als bei weichen. Diese Aussage steht allerdings in direktem Widerspruch zu den Ausführungen in [199].

Obwohl der Einfluss der Schalungsdurchbiegung auf den Frischbetondruck nach Auswertung der gesichteten Literatur noch nicht zufriedenstellend bewertet werden kann, ist aufgrund ihrer Bedeutung ihre Berücksichtigung in den Bemessungstabellen der Schalungshersteller, wie u. a. in [72] oder [154], unerlässlich (siehe auch [29] bzw. [157]).

#### **2.4.4 Folgerungen für die eigenen experimentellen Untersuchungen**

In Abschnitt 2.4.1 wurde gezeigt, dass der Frischbetondruck durch die rheologischen Eigenschaften beeinflusst wird. Darüber hinaus ist jedoch noch ungeklärt, wie diese Beeinflussung im Zusammenspiel mit einbautechnischen und schalungskonstruktiven Größen ausgeprägt ist.

Der Einfluss der Einbaugeschwindigkeit auf die experimentell erfassten Frischbetondruckwerte ist zwar tendenziell bekannt und in vielfältiger Weise dargestellt worden. Zu einer detaillierteren Quantifizierung einer derartigen Abhängigkeit sind jedoch zusätzliche spezifische Untersuchungen erforderlich. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der Ableitung einer mechanischen Gesetzmäßigkeit für den Betoneinbau in die Schalung, welche in der gesichteten Literatur auch bislang noch nicht ansatzweise diskutiert wurde.

Die Auswirkung der Schalungsdurchbiegung auf den Frischbetondruck ist nicht annähernd so ausführlich untersucht worden wie der oben erwähnte Einfluss der Einbaugeschwindigkeit. Der Wissensstand in der Fachliteratur, über welchen in der vorliegenden Arbeit berichtet wurde, ist in vielfältiger Hinsicht widersprüchlich und erlaubt keine abschließende Bewertung der Probleme. Im Gegensatz zu der o. g. Abhängigkeit des Frischbetondrucks von der Einbaugeschwindigkeit konnten allerdings bislang auch schon vereinzelt mechanische Beziehungen aufgestellt werden (siehe Abschnitt 2.4.3).

Darüber hinaus bestehen für eine messtechnische Bestimmung der in Frischbetondruckversuchen untersuchten Kenngrößen noch keine allgemeingültigen Empfehlungen. Somit entfallen eindeutige Vorschriften. Dies erschwert die Vergleichbarkeit von Experimenten, die auf verschiedene Weise sowie mit unterschiedlicher Versuchs- und Messeinrichtung durchgeführt wurden. Ein unsachgemäßer Versuchsaufbau kann im Rahmen der experimentellen Untersuchung eine zusätzliche Fehlerquelle ergeben. Im Hinblick auf die Fülle von Einflussfaktoren beim Aufbau und der Versuchsdurchführung (siehe Abschnitt 2.4) wären entsprechende Empfehlungen dringend wünschenswert. Um eine Abgrenzung einiger Einflussparameter (z. B. Schalungsart, -steifigkeit, -höhe, -breite oder -dicke) zu ermöglichen, sind in erster Linie die Schalungskonstruktion bzw. ein mögliches Schalungsmodell, die -geometrie sowie die Messeinrichtung zu betrachten.

Die oben dargelegten Gesichtspunkte und die sich daraus ergebenden Fragestellungen bilden den wissenschaftlichen Rahmen für die eigenen Versuche.

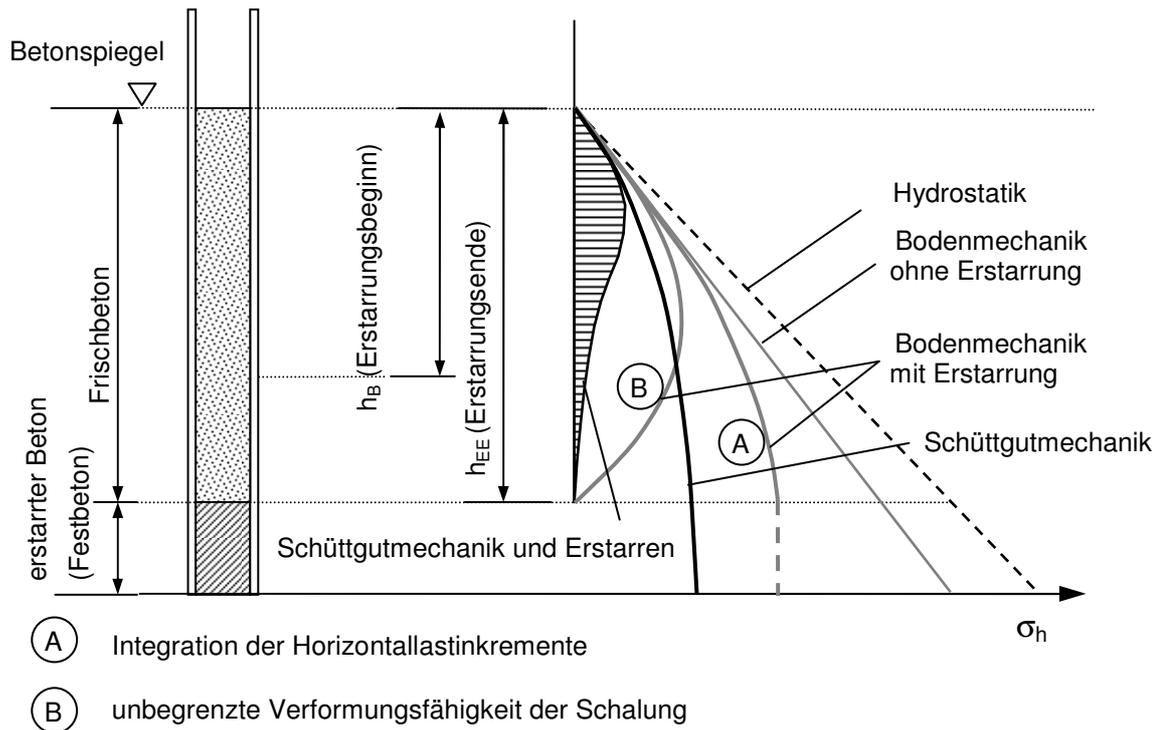
## 2.5 Konzepte zur Beschreibung des Frischbetondrucks

Das Bedürfnis nach einem fundierten Verständnis des Frischbetondrucks führte dazu, dass schon seit vielen Jahrzehnten für diesen Zweck diverse Modelle entwickelt wurden. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts sind bereits Konzepte für Normalbeton auf der Grundlage der Schüttgutmechanik [150] sowie empirische Verfahren [177] entwickelt worden (ca. Konsistenzklasse F1 entsprechend den Vorgaben in [42]). Darauf folgten auf der Bodenmechanik basierende Modellvorstellungen, kombiniert mit z. T. hydrostatischen Ansätzen (z. B. im Verdichtungsbereich) [76], [132], [182] (ca. Konsistenzklassen F2 bis F3 entsprechend den Vorgaben in [42]). Neben schüttgutmechanischen Konzepten konzentrierte sich die Baustoffforschung in jüngerer Vergangenheit vornehmlich im Hinblick auf selbstverdichtenden Beton auf die Erarbeitung ganzheitlich hydrostatischer und verstärkt rheologischer Modelle [98], [132], [157].

In den nachstehenden Abschnitten werden jeweils die bedeutendsten Konzepte der einzelnen Kategorien zur Frischbetondruckbeschreibung vorgestellt. Gleichzeitig werden diese miteinander verglichen und diskutiert. Auf diese Weise können die elementaren Vor- und Nachteile dieser Modellvorstellungen unter Beachtung gemeinsamer Schnittmengen dargestellt und aufgezeigt werden. Im Rahmen der ausführlichen Diskussion erfolgt eine kritische Auseinandersetzung mit den vorgestellten Ansätzen zur Beschreibung des Frischbetondrucks.

Die Schalungsbemessung ist in der Baustellenpraxis mit Hilfe der in diesem Abschnitt 2.5 betrachteten Modelle grundsätzlich möglich. Während und nach dem Einbau in die Schalung können die strukturphysikalischen Vorgänge im Frischbeton sowie die gleichzeitig auftretenden mechanischen Einflüsse damit teilweise analysiert werden. Jedoch weisen diese in Abhängigkeit des zugrunde gelegten Modellansatzes eine z. T. widersprüchliche Frischbetondruckcharakteristik auf. Diese zeigt Bild 2.11 exemplarisch. Dabei handelt es sich alleine um die Modellvorstellungen, welche auf den klassischen Ansätzen zur Beschreibung des Frischbetondrucks beruhen (Hydrostatik, Boden- und Schüttgutmechanik), siehe Abschnitte 2.5.1 bis 2.5.3.

Die Kurvencharakteristiken der in [130] und [152] vorgestellten rheologischen Modellansätze lassen sich aufgrund ihrer Parameter Strukturbruchfläche [130] bzw. Flockungskoeffizient [152] (siehe Abschnitt 2.1.3.2), welche die dargestellten klassischen Ansätze nicht berücksichtigen, nicht qualitativ in Bild 2.11 einordnen. Tendenziell entsprechen sie jedoch der Bodenmechanikkurve mit Erstarrung A [130] bzw. der Schüttgutmechanikkurve [152]. Die Konzepte aus Normen und Richtlinien (siehe Abschnitt 2.5.6) gründen zumeist auf den klassischen bzw. empirischen Konzepten. Daraus ergeben sich die entsprechenden Kurvencharakteristiken und brauchen deshalb nicht explizit in Bild 2.11 gezeigt werden.



**Bild 2.11:** Gegenüberstellung ausgewählter vertikaler Frischbetondruckverläufe ohne Verdichtungseinfluss, in Abhängigkeit von dem zugrunde gelegten Modellansatz; in Anlehnung an [98]

Während der Frischbetondruck von Normalbeton hauptsächlich anhand von auf der Bodenmechanik beruhenden Verfahren beurteilt wird, werden bei selbstverdichtendem Beton vornehmlich hydrostatische, schüttgutmechanische oder neuerdings auch rheologische Ansätze bevorzugt (s. o.). Im Hinblick auf eine Anwendung schüttgutmechanischer Modelle ist anzumerken, dass diese trotz der unterschiedlichen Stoffcharakteristik von Schüttgut auf selbstverdichtenden Beton übertragen wurden. Eine allgemeingültige Frischbetondruckbemessung von sowohl Normalbeton als auch selbstverdichtendem Beton existiert nach dem Stand der Literatursichtung derzeit nicht.

Von den zur Auswahl stehenden Frischbetondruckmodellen ist zu unterscheiden zwischen Konzepten, die in der Baupraxis verwendet werden und (rein) theoretischen Modellen [132]. Als ein Problem im Rahmen experimenteller Frischbetondruckuntersuchungen erweist sich die jeweils individuell gewählte Versuchseinrichtung und der damit verbundene Versuchsaufbau. Dadurch werden die Gewinnung geometrischer sowie schalungstechnischer Erkenntnisse und somit die Ableitung von Folgerungen aus einer ausführlichen Gegenüberstellung einzelner Modellansätze erschwert.

Aber nicht nur die Schalungssteifigkeit, sondern auch die Einbaumechanik wurden noch in keinem der bekannten Modellansätze im Zusammenhang mit den stoffphysikalischen Eigenschaften explizit in Form einer (mathematischen) Gleichung dargestellt.

Hinsichtlich der Beurteilung der vorgestellten Konzepte (mit Ausnahme der rheologischen Ansätze) zur Ermittlung des Frischbetondrucks fällt auf, dass es diesen nicht gelingt, die wesentlichen Einflussparameter zu identifizieren. Nach neuesten Erkenntnissen (z. B. [29], [30] oder [152]) sind die Thixotropie bzw. der Strukturaufbau und damit die (statische) Fließgrenze für den Frischbetondruck maßgebend (siehe Abschnitt 2.4.1). Nur auf diese Weise ist eine allgemeingültige Bestimmung des Frischbetondrucks möglich. Dieser wesentliche Einfluss wird jedoch in den klassischen und sonstigen (insbesondere den empirischen) Modellansätzen vollkommen außer Acht gelassen. Stattdessen werden Einflüsse berücksichtigt (wie z. B. die Schalungsreibung und damit der Siloeffekt in [157]), welche für den Frischbetondruck von untergeordneter Bedeutung sind.

### 2.5.1 Bodenmechanische Ansätze

Das kontinuierliche Bemühen um verbesserte Bemessungsverfahren für den Frischbetondruck hat dazu geführt, dass die einfachen und unmittelbar aus der Bodenmechanik auf die Biontechnologie übertragenen Ansätze, ohne Berücksichtigung des Erstarrungsvorgangs, durch Hinzufügen eines zeitlichen Faktors modifiziert bzw. differenziert werden konnten. In erster Linie finden bodenmechanische Modelle bei dem Einbau von Normalbeton ihre Anwendung [76], [132], [182]. Derartige Konzepte (d. h. unter Berücksichtigung des Erstarrungsvorgangs) erlauben die Ermittlung des Frischbetondrucks für die Konsistenzbereiche F1 bis F5, siehe [51] bzw. [60].

Im Rahmen der einfachen Beschreibung des Frischbetondrucks auf Grundlage der bodenmechanischen Gesetzmäßigkeiten wird das stoffphysikalische Verhalten des Werkstoffs Frischbeton dem des Bodens gleichgesetzt. Der Frischbetondruck  $\sigma_h$  [kN/m<sup>2</sup>] wird dabei aus dem Horizontaldruckverhältnis (siehe [173]) bzw. Seitendruckbeiwert (siehe [98])  $\lambda$  (siehe Gleichung 2.11) mit der eingepprägten Auflast formuliert [65], [98]. Voraussetzung für eine derartige Ermittlung des Frischbetondrucks ist ein ungesättigtes, nicht kohäsives Materialverhalten (d. h. nach dem damaligen Stand der Technik und damit den Vorgaben in [42] in etwa für die Konsistenzen F1 und F2 bzw. exemplarisch in [165] für die damaligen Konsistenzen „gut“ bis „schlecht“ verarbeitbar). Eine solche Annahme ist jedoch bei erhöhten Mörtel- bzw. Leimgehalten nicht mehr zu rechtfertigen. Das einfache Verfahren setzt keine Reibung zwischen Beton und Schalhaut an [98].

Das Horizontaldruckverhältnis bzw. der Seitendruckbeiwert  $\lambda$  werden grundsätzlich in Abhängigkeit von der inneren Reibung  $\varphi$  [°] (des Werkstoffs) anhand von Gleichung 2.11 angegeben, d. h.  $\lambda = f(\varphi)$  [173]:

$$\lambda = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (2.11)$$

mit	$\sigma_v$ :	Vertikallast (= $\gamma \cdot h$ )	[kN/m <sup>2</sup> ]
	$\gamma$ :	Wichte	[kN/m <sup>3</sup> ]
	$h$ :	Einbauhöhe	[m]

$$\lambda = 1 - \sin\varphi \quad \text{Fall „Erdruhedruck“}$$

$$\lambda = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad \text{Fall „aktiver Erddruck“}$$

Ausführliche Untersuchungen zur Größe des inneren Reibungswinkels  $\varphi$  sind z. B. in [144] oder [165] zu finden. Dieser kann sich in einem Bereich von  $12^\circ$  bis  $34^\circ$  [165] und ca.  $30^\circ$  (für ungerüttelten Beton),  $0^\circ$ - $52^\circ$  (während des Rüttelvorgangs) bzw.  $52^\circ$  (für gerüttelten Beton) [144] bewegen. Im Rahmen der in [165] vorgestellten experimentellen Untersuchungen wurde ein Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt bzw. Setzmaß und der inneren Reibung festgestellt. Demnach führt z. B. eine Abnahme des Setzmaßes zu einem Anstieg der inneren Reibung [98]. Die Bestimmung der inneren Reibung kann mittels eines Rahmenscherversuchs (siehe [53]) oder anhand eines Triaxialversuchs (siehe [52]) erfolgen [157].

Eine Modifizierung einfacher bodenmechanischer Modelle wurde durch die Einführung einer funktionalen Abhängigkeit des Horizontaldruckverhältnisses von dem Hydratationsvorgang und damit der Erstarrungszeit vorgenommen [98]. Dazu wird der Werkstoff Frischbeton als ein viskoser Schmierkörper angesehen [184]. Hierbei setzt sich der dickflüssige Schmierkörper aus einem Haufwerk verschiedener Körner zusammen, welche in einem Schmiermittel aus Zement und Wasser gebunden sind [183]. Zur Bestimmung der zeitabhängigen Seitendruckbeiwerte stehen verschiedene Formulierungen zur Verfügung, siehe [89], [119] oder [182]. In [184] wird beispielsweise der  $\lambda(t)$ -Wert in Abhängigkeit von dem Betrachtungszeitpunkt und der Erstarrungszeit ermittelt.

Der erweiterte bodenmechanische Ansatz fundiert auf dem Gerüst des vereinfachten bodenmechanischen Modells. Dabei werden nach Gleichung 2.12 die einzelnen Frischbetondruckzuwächse  $d\sigma_h$  über die Einbauhöhenzunahme  $dh$  [m] integriert, siehe dazu [98], [183], [184]:

$$\sigma_h = \int_0^{h_{EE}} \lambda(t) \cdot \gamma \cdot dh \quad (2.12)$$

mit  $\lambda(t)$ : Horizontaldruckverhältnis als Funktion der Zeit [-]  
 $h_{EE}$ : Einbauhöhe bei Erstarrungsende [m]

In diesem Zusammenhang kann der Frischbetondruck auch anhand der Beziehung  $h = v \cdot t$  (mit Einbauhöhe  $h$  [m], Einbaugeschwindigkeit  $v$  [m/h] und Zeit  $t$  [h]) bzw.  $dh = v \cdot dt$  in Abhängigkeit der Einflussparameter Einbaugeschwindigkeit und Zeit dargestellt werden. Das in Gleichung 2.12 vorgestellte Modell diene als Grundlage verschiedener Verfahren zur Frischbetondruckermittlung von Normalbeton, u. a. [113], [184] oder [198].

Im Rahmen der Einbeziehung des Erstarrungsprozesses kann grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen Vorgehensweisen zur Frischbetondruckbestimmung unterschieden werden. Diese unterscheiden sich im Rahmen der mathematischen Formulierung hinsichtlich der Berücksichtigung des Rüttel einflusses. Im Hinblick auf das sog. „Modell 1“ (dabei wird in Gleichung 2.11  $\lambda$  durch  $\lambda(t)$  ersetzt, siehe [184]) führt die infolge des Rüttlereinsatzes hervorgeru-

fene hydrostatische Druckbelastung zu einer Vorspannung der Schalung und wird direkt bezüglich der mathematischen Formulierung berücksichtigt. Daraus ergibt sich ein kontinuierlich zeitlicher Anstieg des Seitendruckbeiwerts, was somit im direkten Widerspruch zu einer Frischbetondruckabnahme im Rahmen des Hydratationsvorgangs steht [98], [183], [184].

Nach dem sog. „Modell 2“ (siehe Gleichung 2.12 bzw. [184]) wird der Einfluss der Rüttelbelastung nicht direkt berücksichtigt, da der Frischbeton als verdichtet angesehen wird. Der Rüttel einfluss geht in Form einer Konstanten in die mathematische Formulierung ein. Es wird davon ausgegangen, dass im Rahmen der Hydratation nicht der Frischbetondruck selbst auf den Wert Null abfällt, sondern der Seitendruckbeiwert  $\lambda$  (siehe Gleichung 2.11).

Die Schwäche bodenmechanischer Modellvorstellungen besteht zunächst in der stoffphysikalischen Einordnung des Frischbetons als ein Erdstoff. Da sich die stoffphysikalischen Eigenschaften eines Erdstoffes wesentlich von denen eines Betons unterscheiden, ist dies aus rheologischer Sicht nicht korrekt. Beispielsweise verhält sich ein Erdstoff im Vergleich zu einem Frischbeton nicht thixotrop. Ein Bentonit hingegen würde diese Anforderung erfüllen. Alleine deshalb ist eine Anwendung derartiger Modelle in erheblichem Maße beschränkt.

Die Ansätze, welche die Betonerstarrung vernachlässigen (z. B. [165]), eignen sich eher nur zur Ermittlung der maximalen Schalungsbeanspruchung als zur Beschreibung der Druckcharakteristik.

Ein nicht unerhebliches Problem bodenmechanischer Konzepte unter Einbeziehung des Hydratationsvorgangs stellen die widersprüchlichen wissenschaftlichen Interpretationen (Modell 1 bzw. 2) dar. Zwar erweist sich die langjährige baupraktische Anwendung des Modells 2 für die Abbildung der sicherheitsrelevanten Druckverhältnisse von Normalbeton als gut geeignet. Jedoch geben weder dieser noch Modell 1 eine exakte phänomenologische Frischbetondruckbeschreibung wieder [183], [184]. Bodenmechanische Konzepte erlauben somit keine allgemeingültige Beschreibung des stoffphysikalischen Frischbetondrucks. Zur Bestimmung des Frischbetondrucks von Normalbeton (und damit von nur einer Betonart) werden daher (bei Berücksichtigung des Erstarrungsverhaltens) zwei Modellvarianten angegeben statt einer einzigen Modellvorstellung. Darüber hinaus entspricht die zeitliche Abnahme des Seitendruckbeiwerts und damit des resultierenden Frischbetondrucks aufgrund des Einflusses einer evtl. eingepprägten Schalungsdurchbiegung auf den Wert Null sicherlich nicht den tatsächlichen Gegebenheiten (siehe Bild 2.11, Bodenmechanikkurve mit Erstarrung B).

Es ist festzustellen, dass die bodenmechanischen Modellvorstellungen auf einer veralteten Methode zur Bestimmung des Frischbetondrucks beruhen. Diese besteht in der Anpassung von (experimentell bestimmten) Materialparametern an bodenmechanische Kennwerte (Seitendruckbeiwert oder innerer Reibungswinkel). Hierbei bleibt im Rahmen der Frischbetondruckermittlung die Fähigkeit des Frischbetons zum Strukturwiederaufbau (bzw. seine Thixotropie, siehe Abschnitt 2.1.3.2) unberücksichtigt.

### 2.5.2 Schüttgutmechanische Modelle

Die geforderten Merkmale zur Berücksichtigung evtl. Reibungseffekte zwischen Schalhaut und eingebautem Beton erfüllt das für die Siloberechnung (in der Schüttgutmechanik) eingeführte JANSSEN-Modell [98], [123], [160]. Die Scherspannung wirkt der Auflast entgegen und ist damit in der Lage, diese bis zu einem bestimmten Grad abzutragen. Um eine Übertragbarkeit der schüttgutmechanischen Grundlagen auf den Werkstoff Frischbeton zu ermöglichen, wird dieser als eine Halbflüssigkeit definiert [98]. Eine derartige Frischbetondruckermittlung macht jedoch nur für Sonderfälle Sinn, insbesondere bei Berücksichtigung des Einflusses der Schalhaut. So kann dies z. B. für den Fall einer gebrauchten Holzschalhaut von Interesse sein, bei der abstehende Fasern zu evtl. Reibungseffekten führen. Bemerkenswert im Hinblick auf eine betonspezifische Anwendung ist die Tatsache, dass sowohl für Normalbeton als auch für selbstverdichtenden Beton gültige Modellvorstellungen zur Frischbetonermittlung auf einem schüttgutmechanischen Fundament gründen.

Das oben bereits erwähnte charakteristische Unterscheidungsmerkmal in Bezug auf die in Abschnitt 2.5.1 vorgestellten bodenmechanischen Modelle ist die zusätzliche Berücksichtigung der Scherspannung  $\tau_w$  [kN/m<sup>2</sup>] anhand des Reibungsbeiwerts  $\mu$  nach Gleichung 2.13 [98], [173]:

$$\mu = \frac{\tau_w}{\sigma_h} \quad (2.13)$$

Dieser wird zur Ermittlung der Horizontalspannung nach der Scheibenelementmethode in das Kräftegleichgewicht an einem Volumenelement infinitesimaler Höhe eingesetzt. Daraus kann bei einer Übertragung der schüttgutmechanischen Gesetzmäßigkeiten auf einen Beton der Frischbetondruck in Abhängigkeit des Seitendruckbeiwerts  $\lambda$  sowie des Reibungsbeiwerts  $\mu$  angegeben werden [98], [160], [173]. Als Anwendungsbereich sind z. B. für Normalbeton entsprechend den Vorgaben in [42] und damit dem damaligen Stand der Technik in etwa die Konsistenzen F1 und F2 bzw. im speziellen Fall in [37] die damalige Konsistenzklasse „Gussbeton“ (welche in [60] ungefähr der Konsistenz F4 bis F5 entspricht) zu nennen. Darüber hinaus ist das in [200] zu findende einfache schüttgutmechanische Modell zur Bestimmung des Frischbetondrucks für selbstverdichtenden Beton gültig [98].

Das in [157] vorgestellte Modell zur Ermittlung des Frischbetondrucks von selbstverdichtendem Beton gründet ebenfalls auf der Silotheorie von JANSSEN. Dieses bezieht, ähnlich den in Abschnitt 2.5.1 beschriebenen Ansätzen und infolge der Definition der spezifischen, zeitabhängigen Modellparameter Seitendruckbeiwert  $\lambda(t)$  bzw. Reibungsbeiwert  $\mu(t)$  [–], darüber hinaus das Ansteif- und Erstarrungsverhalten in die Modellvorstellung mit ein. Hierbei wird zur Berücksichtigung des Ansteif- und Erstarrungsverhaltens der Parameter Erstarrungszeit verwendet. Grundgedanke dieser Modifikation ist die Berücksichtigung der zeitabhängigen Frischbetondruckabnahme aufgrund der Reduzierung des Seitendruckbeiwerts bei gleichzeitiger Zunahme des Reibungsbeiwerts. Voraussetzung für die Aktivierung der Reibungsvorgänge ist das Auftreten einer infinitesimalen Relativverschiebung, welche in der Regel durch eine

Schalungsverformung erfüllt ist. Da ein derartiges Vorgehen die Verwendung einer LAGRANGE-Funktion [43] bedingt, ist für die Bestimmung der zugehörigen Stammfunktion eine einfache Integrationsrechnung nicht ausreichend. Eine Lösung kann daher nur anhand der numerischen Integration von Gleichung 2.14 erfolgen („Modellvorstellung 1“) [157]:

$$\sigma_v = e^{-\int \lambda(t) \cdot \mu(t) \cdot v \cdot \frac{U}{A} dt} \cdot \left( \int \gamma \cdot v \cdot e^{\int \lambda(t) \cdot \mu(t) \cdot v \cdot \frac{U}{A} dt} \cdot dt + \sigma_{v0} \right) \quad (2.14)$$

mit	$\sigma_{v0}$ :	Randspannung auf Höhe des Betonspiegels	[kN/m <sup>2</sup> ]
	dt:	Zeitzuwachs	[s]
	A:	Querschnittsfläche des eingebauten Betons	[m <sup>2</sup> ]
	U:	Umfang der Schalung	[m]

Aus der auf diese Weise bestimmten Vertikalspannung errechnet sich der Frischbetondruck gemäß Gleichung 2.15 zu [157]:

$$\sigma_h = \lambda(t) \cdot \sigma_v \quad (2.15)$$

Das Konzept basiert auf experimentellen Untersuchungen an schlanken Stützen sowie auf Materialversuchen. Die dabei erfassten Größen für den Seitendruck- und Reibungsbeiwert sind exemplarisch in [98] dargestellt. Es wurde festgestellt, dass sie in einem starken Maße von der Betonzusammensetzung abhängen. Beispielsweise können sich  $\lambda(t)$  in einem Bereich von 0,15 bis 1 sowie  $\mu(t)$  von 0 bis 0,2 bewegen [98].

Des Weiteren ist in [157] noch ein zweiter Modellansatz („Modellvorstellung 2“) zu finden. Dieser unterscheidet sich von dem in Gleichung 2.14 vorgestellten Konzept dadurch, dass der Frischbetondruck sich aus einer direkten Integration der Horizontalspannungen (anstelle der Vertikalspannungen) ergibt. Diese Entwicklung zweier Modellansätze entspricht der in Abschnitt 2.5.1 dargestellten Vorgehensweise (siehe Modell 1 bzw. 2).

Von ihrem strukturphysikalischen Grundgedanken her eignen sich die auf der Schüttgutmechanik basierenden Modelle eher zur Abbildung des phänomenologischen Frischbetondrucks. Für einen Einsatz derartiger Konzepte spricht, dass sie sowohl für die Verwendung von Normalbeton als auch für selbstverdichtenden Beton erprobt sind. Des Weiteren scheint eine stoffphysikalische Einteilung des Werkstoffs Frischbeton als Halbflüssigkeit entsprechend seiner rheologischen Charakterisierung als BINGHAM-Körper nahe liegend (siehe Abschnitt 2.1.3.1). Nach den Gesetzmäßigkeiten der Schüttgutmechanik wird der Frischbetondruck um den Wert der an der Schalhaut auftretenden Betonreibung reduziert (siehe Gleichung 2.14 bzw. 2.15). Bei einer Befüllung „von oben“ wirkt die Betonreibung in vertikaler Richtung entgegen der Einbaurichtung. Dabei wird die Schalhaut als eine gleichmäßige Oberfläche idealisiert, welche mit rechteckigen Einschnitten behaftet ist. Die Schalhautrauhigkeit führt zum Einsetzen eines Gleitreibungsvorgangs. Da der Frischbeton als ein sich aus Körnern, Zement und Wasser zusammensetzender Schmierkörper angesehen wird (siehe Abschnitt 2.1.3.1), können die Einschnitte im Rahmen des Gleitreibungsvorgangs mit Feinstanteilen und

Trennmittel gefüllt werden. Die Körner entsprechenden Durchmessers werden in den Einschnitten eingeklemmt [182]. Während die Fließgrenze eines Schüttguts von dem einwirkenden Spannungszustand abhängig ist [174], ist die eines Frischbetons spannungsunabhängig. Insofern entsprechen die strukturphysikalischen Eigenschaften von Frischbeton nicht denen eines Schüttguts. Daher erscheint diese Annahme – wenn überhaupt – lediglich für geneigte Schalungen (siehe [171]) sinnvoll.

Jüngste Untersuchungsergebnisse haben ergeben, dass der in die Schalung eingebaute Beton nicht fließt und daher (bei einer Befüllung „von oben“ in Einbaurichtung) ein vertikales Gleiten entlang der Kontaktfläche bzw. Grenzschicht sowie damit Schalung unmöglich ist [193]. Dabei wird im Rahmen einer leichten Setzung des Betons innerhalb der Schalung an der Schalhaut lediglich die Fließgrenze aktiviert. Beanspruchungen, welche die Fließgrenze überschreiten sind nicht möglich, da dies bedeuten würde, dass der Frischbeton innerhalb der Schalung fließt, was aufgrund der vorgegebenen Randbedingungen ausgeschlossen werden kann, siehe auch [29] oder [152].

Bei dem in [157] vorgestellten Ansatz berücksichtigt der Reibungsbeiwert sowohl die äußere (und damit die Schalungsreibung) als auch die innere Reibung. Es wird zwischen Schalhaut und Beton von einer Gleitreibung ausgegangen. Diese wurde auch in veralteten Bemessungsmethoden (z. B. [182]) angesetzt. Jedoch wurde damals schon darauf hingewiesen, dass bezüglich der Bestimmung von Reibungseffekten kein allgemeingültiges Verfahren existiert. Die Ergebnisse müssen für den jeweiligen Einzelfall experimentell ermittelt werden. Dies führt zu breiten Schwankungen und damit zu großen Ungenauigkeiten [182]. Gleichzeitig wurde bereits in [182] angemerkt, dass aus statischen Gesichtspunkten vielmehr von einer Haftung (als Widerstandsmaß für den Übergang von einer Ruhelage in einen bewegten Zustand) auszugehen ist. Insofern wurde der Gleitreibungsansatz lediglich aus dem alleinigen Grunde gewählt, dass dieser sich auf der „sicheren Seite“ befindet. Entsprechend sind die Gleitreibungsbeiwerte geringer als die entsprechenden Haftungsbeiwerte.

Aus der Annahme der zeitlichen Abhängigkeit von sowohl Reibungs- als auch Seitendruckbeiwert ergeben sich rechnerische Komplikationen, da die Integration einer Stammfunktion nur auf numerische Weise gelöst werden kann. Der in [157] gewählte Ansatz erfordert zur Bestimmung des Frischbetondrucks selbstverdichtender Betone die Anwendung einer LAGRANGE-Funktion. Deren Lösung führt somit zu einer komplizierten Frischbetondruckbestimmung.

Die in [152] aufgeführten Kritikpunkte hinsichtlich der Berücksichtigung von Reibungseinflüssen bei der Frischbetondruckbestimmung gelten vom Grundsatz her auch für die Modellvorstellung in [157]. Dabei ist besonders hervorzuheben, dass entsprechend dem gewählten Ansatz bei einer Schalungsbefüllung „von unten“ die Reibungskräfte entgegen der Fließrichtung nach unten gerichtet sein müssten. Dies würde bedeuten, dass Frischbetondrücke erreicht werden, welche über die hydrostatischen Werte hinausgehen. Ergebnisse haben jedoch gezeigt, dass auch der Frischbetondruck bei einem Einbau „von unten“ unter den hydrostatischen Werten liegen kann [152]. Des Weiteren ist in [157] der Reibungsbeiwert über die Zeit

ansteigend (s. o.). Entsprechend würde dies außerdem bei einem Befüllvorgang „von unten“ anstelle einer Verminderung mit der Zeit zu erhöhten Frischbetondrücken führen.

Wie auch schon die bodenmechanischen Konzepte (siehe [182], [183] bzw. [184]) ist der in [157] vorgestellte Ansatz nur für eine Betonart (hier selbstverdichtender Beton) gültig und erlaubt damit keine allgemeingültige Beschreibung des stoffphysikalischen Frischbetondrucks. Ebenso wie die bodenmechanischen Konzepte basieren auch die schüttgutmechanischen Modelle auf einer veralteten Methode (Anpassung der Materialparameter an die schüttgutmechanischen Kennwerte – hier Seitendruck- und Reibungsbeiwert). Die Bestimmung schüttgutmechanischer Parameter erfolgt ebenfalls mittels der Erstarrungszeit (siehe [157]), die Thixotropie und damit der effektive Strukturaufbau werden dabei vernachlässigt.

Hinsichtlich des Einflusses der Geometrie auf den Frischbetondruck wurden in [157] die Parameter Querschnittsfläche und Schalungsumfang gewählt. Diese sind jedoch eher für den Frischbetondruck in einer Stütze von Bedeutung. Bei der Herstellung eines Wandbauteils kann in Bezug auf die zu berücksichtigende Schubspannung die Wanddicke infolge ihres Verhältnisses zur Wandbreite vielmehr vernachlässigt werden.

### 2.5.3 Hydrostatische Modellansätze

Der Einsatz von Einbauhilfen, wie z. B. Verdichtungsgeräten, sowie auch die Entwicklung neuer Betone und der damit verbundenen innovativen Einbautechniken (von oben bzw. seitlich gepumpt) erfordert die Anwendung zusätzlicher Konzepte zur Frischbetondruckbestimmung. Eine Möglichkeit bietet der hydrostatische Modellansatz. Dabei wird der Frischbeton als eine Flüssigkeit definiert (siehe Abschnitt 2.1.3.1). Der zugehörige Frischbetondruck ergibt sich nach Gleichung 2.16 [48], [98], [182]:

$$\sigma_h = \gamma \cdot h \tag{2.16}$$

Zwar ist eine derartige Modellvorstellung für den Betoneinbau „von oben“ in der Regel sicher, jedoch könnten die so ermittelten Bemessungswerte bei extremer mechanischer Verdichtungsbelastung sowie bei Bauteilen sehr geringer Dicke überschritten werden [45], [98]. Einerseits dient Gleichung 2.16 als allgemeingültiges Bemessungsmodell für frischen selbstverdichtenden Beton. Andererseits beschränkt sich ihre Anwendung für frischen Normalbeton (unabhängig von der Konsistenz) in der Regel auf den Verdichtungsbereich des in die Schalung eingebauten Betons und Einbaugeschwindigkeiten  $> 7$  m/h.

Während sich für den Verdichtungszeitraum von Normalbeton im Wirkungsbereich des Verdichtungsgeräts ein hydrostatischer Ansatz als angemessen erwies (siehe [182]), kamen für den Einbau von selbstverdichtendem Beton (siehe [48]) zahlreiche experimentelle und baupraktische Untersuchungen zu großen Abweichungen von den hydrostatischen Werten [31], [179], [180]. Neben sicherheitstechnischen Aspekten läuft der bemessende Ingenieur somit Gefahr, eine überdimensionierte und unwirtschaftliche Lösung anzubieten. Die Zeitabhängigkeit der rheologischen Frischbetonparameter lässt aufgrund der zeitlichen Fließgrenzenent-

wicklung eine durchgehend strukturphysikalische Gleichsetzung mit einer Flüssigkeit nicht zu. Der Vorteil für eine Frischbetondruckberechnung nach dem hydrostatischen Ansatz ist, dass dieser sichere Werte liefert (s. o.). Jedoch werden dabei nicht erhöhte Drücke erfasst, welche aufgrund des Einbauvorgangs bei schmalen Bauteilen auftreten können. Gleichzeitig kann auch ein Einbau „von unten“ zu Drücken führen, die die hydrostatischen Werte überschreiten [98].

#### 2.5.4 Rheologische Konzepte

Da für die Entwicklung neuer Betone die Betrachtung ihrer rheologischen Eigenschaften unerlässlich ist, siehe Abschnitt 2.4.1, hat man in neuerer Zeit zunehmend versucht, diese – hauptsächlich für selbstverdichtenden Beton – in die Beschreibung des Frischbetondrucks zu integrieren. Entsprechend wird bei einer derartigen Vorgehensweise die Kenntnis der rheologischen Kenngrößen eines Frischbetons vorausgesetzt.

Das erste rheologische Modell zum Frischbetondruck von selbstverdichtendem Beton wurde in [130] erarbeitet. Aus experimentellen Untersuchungen an einer PVC-Säule ergab sich, dass selbstverdichtende Betone mit einem vergleichsweise höheren Thixotropiegrad einen verhältnismäßig geringeren Frischbetondruck sowie einen schnelleren Druckabfall aufweisen. Diese Erkenntnis wurde in [130] in Bezug zu dem relativen hydrostatischen Schalungsdruck  $\sigma_{\text{hyd,rel}}$  (siehe Abschnitt 2.4.1) gesetzt. Dieser entspricht in dem betrachteten Fall dem zeitabhängigen Seitendruckbeiwert  $\lambda(t)$ , siehe Gleichung 2.15. Der Seitendruckbeiwert ist in [130] variabel und wird als eine lineare Funktion in Abhängigkeit von der Strukturbruchfläche  $A_b$  formuliert, siehe Gleichungen 2.17 bis 2.19:

$$K_0 = -0,047 \cdot A_{b0} + 105,8 \quad (2.17)$$

$$K_{100} = -0,099 \cdot A_{b100} + 112,2 \quad (2.18)$$

$$K_{200} = -0,125 \cdot A_{b200} + 116,8 \quad (2.19)$$

mit  $K_i$ : Seitendruckbeiwert (nach einer Zeit von  $i$  Minuten) [%]  
 $A_{bi}$ : Strukturbruchfläche (nach einer Zeit von  $i$  Minuten) [%]

Im Rahmen der in [130] vorgestellten Experimente wurden 70 verschiedene Mischungszusammensetzungen untersucht. Entsprechend gelten die Gleichungen 2.17 bis 2.19 unter den versuchstechnischen Gegebenheiten für die dabei untersuchten Betone [34], [98]. Die Strukturbruchfläche wird durch den in Bild 2.8 (Abschnitt 2.1.3.2) dargestellten Bereich gebildet, der durch die beiden Kurven der ursprünglichen Belastung sowie der Belastung nach der Ruhephase eingeschlossen wird. Je kleiner die Strukturbruchfläche, umso geringer ist der Thixotropiegrad des Frischbetons ausgebildet [98], [132].

Ein neuer Weg und viel versprechender Ansatz, die Herausforderung der Frischbetondruckproblematik für selbstverdichtenden Beton auf rheologischem Wege zu bewältigen, stellt das in [152] vorgestellte Verfahren dar. Als Annahmen dienten die Fließbedingung nach der Hypothese der maximalen Schubspannung von TRESKA [148] und darauf aufbauend die Be-

dingung, dass sich der selbstverdichtende Beton bei einer Scherbeanspruchung unterhalb der Fließgrenze wie ein elastischer Körper verhält. Dies führte zu einer Gleichgewichtsbedingung für die in der Schalung auftretende Vertikalspannung. Bei einem Ansatz der Fließgrenze als Wandschubspannung erweist sich die aus dem Kräftegleichgewicht bestimmte vertikale Belastung als äquivalent zu der nach der JANSSEN-Methode (siehe Abschnitt 2.5.2) ermittelten Vertikalspannung. Hinsichtlich der Größe der übertragenen Scherspannung wurde in [152] und [193] festgestellt, dass diese sich in einem Bereich von Null bis  $\tau_0$  bewegt. Eine weitere Überlegung war, dass sich das Frischbetondruckprofil mindestens zwischen den Werten nach dem JANSSEN-Modell sowie dem hydrostatischen Ansatz (siehe Abschnitt 2.5.3) befindet. Daher wurde die Fließgrenze aufgrund ihres linearen Verlaufs entlang der Schalungshöhe, abzüglich des oberen Scherbereichs (siehe Abschnitt 2.4.4) integriert und von der Vertikallast subtrahiert. Ohne Berücksichtigung der Schalungsbreite und der Scherzone ergibt sich der vereinfachte Frischbetondruck entsprechend der nachfolgenden Gleichung 2.20 [132], [152]:

$$\sigma_h = K \cdot h \cdot \left( \gamma - \frac{h \cdot C_{\text{thix}}}{d \cdot v} \right) \quad (2.20)$$

mit d: Schalwanddicke [m]  
 K: Seitendruckbeiwert [-]

Die für Gleichung 2.20 benötigte Kenntnis über die Abhängigkeit der Fließgrenze von der Zeit und damit des Thixotropiekoeffizienten  $C_{\text{thix}}$  (bzw. des Flockungskoeffizienten  $A_{\text{thix}}$ , welcher die zeitliche Fließgrenzenzunahme angibt) wurde bereits in Gleichung 2.7 bzw. Bild 2.9 (siehe Abschnitt 2.1.3.2) formuliert. Zur Bestimmung des Seitendruckbeiwerts auf der Grundlage der POISSONSchen Zahl [148] wird das Homogenisierungs-Modell nach MORI-TANKA [87] herangezogen. Dieses ermöglicht eine angemessene Berücksichtigung des Luftporengehalts des selbstverdichtenden Betons.

Rheologische Modelle beziehen die Thixotropie bzw. den Strukturaufbau (und damit insbesondere das Ansteifverhalten) sowie das Erstarrungsverhalten mit ein. Entsprechend ermöglichen sie nicht nur eine Prognose des auf die Schalung wirkenden maximalen Frischbetondrucks, sondern darüber hinaus auch eine Beschreibung seines strukturphysikalisch bedingten Verlaufs. Sie zeichnen sich durch einen hohen Genauigkeitsgrad sowie eine gute Anschaulichkeit aus. Der hohe Genauigkeitsgrad zeigte sich z. B. infolge der Anwendung des in [152] erarbeiteten Modells auf fremde experimentelle Ergebnisse. Dabei ergaben sich keine großen Abweichungen der Rechenwerte von den jeweiligen Messwerten. Aufgrund der in der jüngsten Vergangenheit verstärkten Untersuchung des Frischbetondrucks von selbstverdichtendem Beton, ist die Anwendung rheologischer Modellvorstellungen auf Normalbetone bislang noch nicht weiter überprüft worden. Daher bedarf es zusätzlicher Untersuchungen zur Übertragbarkeit der rheologischen Modelle auf weitere Betonarten. Bisher wurden weder die Wirkung zusätzlicher einbaumechanischer noch schalungskonstruktiver Einflüsse berücksichtigt. Theoretisch können einbaumechanische Impulse zu einer Erhöhung der Vertikalbelastung und damit zu einem Anwachsen des Frischbetondrucks führen. Des Weiteren ist derzeit nicht eindeutig bekannt, inwiefern die Schalungsdurchbiegung den auftretenden Frischbetondruck be-

einflusst. Daher eignen sich derartige Modelle z. Zt. nur bedingt für eine Verwendung in der Baupraxis.

Die Übertragung der in [130] und [152] vorgestellten Modelle in die Baupraxis erfordert neben den o. g. Einschränkungen entweder zusätzliche Vereinfachungen (für [130]) oder Erweiterungen (für [152]). Das Modell in [130] bedarf für die zeitliche Frischbetondruckentwicklung unterschiedlicher Gleichungen des Seitendruckbeiwerts (siehe Gleichungen 2.17 bis 2.19), welche einen Einsatz dieses Verfahrens erschweren. Dies ist für den Ansatz in [152] nicht der Fall, jedoch weist dabei der konstante Seitendruckbeiwert keine zeitliche Abhängigkeit auf und müsste entsprechend seiner Definition mit Abnahme des Luftporengehalts ansteigen. Die Anforderungen einer fortschreitenden Betonforschung lässt voraussichtlich die Bedeutung rheologischer Konzepte zunehmen. Daher ist vor allem eine Anwendung derartiger Ansätze auch auf frischen Normalbeton wünschenswert.

### 2.5.5 Empirische Modelle

Über die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Verfahren zur Vorhersage des Frischbetondrucks hinaus, sind in der einschlägigen Fachliteratur zahlreiche weitere Modelle verschiedener Autoren veröffentlicht worden. Dabei handelt es sich in erster Linie um empirische Konzepte, welche meist den Frischbetondruck in Abhängigkeit von der Einbaugeschwindigkeit betrachten, siehe [98], [132] und [182]. Diese Modelle wurden in der Regel an die im jeweiligen Einzelfall durchgeführten Messungen angepasst [98].

Ein empirisches Konzept, welches Eingang in die Erarbeitung der DIN 18218 [51] gefunden hat, ist die in [76] vorgestellte Formulierung [184]. Dabei ergibt sich der maximale Frischbetondruck  $\sigma_{h,max}$  [10 kN/m<sup>2</sup>] nach den Gleichungen 2.21 bzw. 2.22:

$$\sigma_{h,max} = 3,0 \cdot \sqrt[4]{v} \quad (\text{für } v \leq 4,2 \text{ m/h}) \quad (2.21)$$

$$\sigma_{h,max} = 3,6 \cdot \sqrt[4]{v} \quad (\text{für } v > 4,2 \text{ m/h}) \quad (2.22)$$

Hierbei wurden die experimentellen Untersuchungen mit Frischbetonen der damaligen Konsistenzen „steif“ bis „weich“ durchgeführt. Diese entsprechen in [60] in etwa der Konsistenz F1 bis F2. Jedoch erstreckt sich der Gültigbereich der DIN 18218 [51] (welche u. a. auf dem in den Gleichungen 2.21 bzw. 2.22 vorgestellten empirischen Konzept aufbaut) auf die Konsistenzbereiche F1 bis F5.

Empirische Konzepte ermöglichen zwar die Wiedergabe der phänomenologischen Gegebenheiten, gelten aber nur unter den jeweils versuchsspezifischen Randbedingungen [98]. Ihre baupraktische Anwendung ist demnach nur bei der Einhaltung großer Sicherheitstoleranzen zu empfehlen. Da diese Modelle nur bei spezifischen Randbedingungen und für den Einzelfall gültig sind, sind sie für eine allgemeingültige Beschreibung nicht zu empfehlen und erweisen sich dafür eher als ungeeignet.

### 2.5.6 Konzepte aus Normen und Richtlinien

Bis auf die rheologischen Konzepte zur Vorhersage des Frischbetonschalungsdrucks, diente bisher jede der im Rahmen der Literatursichtung aufgezeigten Modellgruppen als Grundlage für Normen oder Richtlinien von sowohl Normalbeton als auch selbstverdichtendem Beton. Zu diesem Zweck wurden die eigentlichen Konzepte z. T. modifiziert, erweitert oder auch miteinander kombiniert. Exemplarisch sind an dieser Stelle für die Bodenmechanik [51], für die Schüttgutmechanik [45] und [121], für die Hydromechanik [18] und [48] sowie für die empirischen Verfahren [4], [7] und [46] zu nennen, siehe [98]. Dabei ist zu beachten, dass in diesen Vorschriften, neben dem materialspezifischen Frischbetondruck, sicherheitstechnische Gesichtspunkte Berücksichtigung finden.

### 2.5.7 Schlussfolgerungen

Mit der jüngsten Forschungstätigkeit auf dem Gebiet des Frischbetondrucks gingen vielfältige experimentelle oder baupraktische Untersuchungen einher. Die Schwachpunkte der sich daraus ergebenden Ergebnisse waren vielfältiger Natur. Diese ergaben sich meist aus dem eingeschränkten Spektrum der untersuchten Betone sowie aus den reduzierten Möglichkeiten des Versuchsaufbaus. In der Regel konzentrierte sich die analytische Betrachtung auf eine einzelne Betonart. So wurde entweder nur der Frischbetondruck von Normalbeton (z. B. [182]) oder aber nur der von selbstverdichtendem Beton (z. B. [152]) auf experimentellem Wege untersucht. Auch eine Variation der Einbauhöhe war bei einer Versuchsdurchführung an einer Schalung bisher nicht realisierbar (z. B. [152]). In der Vergangenheit wurde verstärkt auf den Einsatz einer praxisgerechten Schalung verzichtet und stattdessen Ersatzmodelle – entweder zur Bestimmung des Frischbetondrucks (z. B. [9]) oder zur Ermittlung von Materialparametern (z. B. [157]) – mit sehr eingeschränktem Praxisbezug verwendet. Auf diese Weise wurde eine wirklichkeitsnahe Betrachtung schalungskonstruktiver Aspekte vernachlässigt.

Da die Ableitung von Modellansätzen aus experimentellen oder baupraktischen Untersuchungen unter kontinuierlicher Einbeziehung der gegebenen Umgebungs- und Randbedingungen durchgeführt wurde, ist eine objektive qualitative Gegenüberstellung nur eingeschränkt möglich. Erschwerend kommt hinzu, dass die einzelnen Modellansätze für eine eingehende Interpretation wichtiger Einflussfaktoren, so z. B. bei bodenmechanischen Ansätzen des Seitendruckbeiwerts und der inneren Reibung, nicht umfassend genug sind, siehe Tabelle 2.6.

Die zugehörigen Annahmen liegen auf der sicheren Seite. Eine wirtschaftliche Schalungsbestimmung lässt sich dadurch nur sehr schwer realisieren. Aus der Gegenüberstellung der bestehenden Frischbetondruckmodelle kristallisieren sich als häufig auftretende Einflussfaktoren die Einbaugeschwindigkeit, die Bauteilgeometrie, der Verdichtungsprozess, die Frischbetonkonsistenz sowie das Ansteif- und Erstarrungsverhalten heraus. Hinsichtlich der Frischbetondruckermittlung fließfähiger Betone existieren nur vereinzelt Modellvorstellungen. Gleichzeitig besteht aufgrund bisher widersprüchlicher Auffassungen eine große Ungewissheit hinsichtlich des Druckverlaufs über die Schalungshöhe. In diesem Zusammenhang konnte das Verformungsverhalten der Schalung als ein bedeutender Einflussfaktor abgeleitet werden [98].

**Tabelle 2.6:** Überblick über bestehende Modellansätze zur Beschreibung des Frischbetondrucks von frischem Normalbeton (NB) und selbstverdichtenden Beton (SVB)

Modellansatz	Modell (Bsp.)	Einflussparameter	Beton	Schwächen
<i>Bodenmechanik</i>				stoffphysikalische Einordnung Anpassung experimentell bestimmter Materialparameter an bodenmechanische Kennwerte
ohne Erstarren	[165]	$\lambda, \gamma, h$	NB	keine zeitliche Druckbeschreibung
mit Erstarren	[184]	$\lambda(t), \gamma, h$		widersprüchliche wissenschaftliche Interpretation Parameter Erstarrungszeit $t$
<i>Schüttgutmechanik</i>			NB, SVB	stoffphysikalische Einordnung Anpassung experimentell bestimmter Materialparameter an bodenmechanische Kennwerte überhöhte Drücke bei Befüllung „von unten“ Parameter Schalungsreibung $\mu$ Bauteilparameter $A$ und $U$ eher für Stützen gültig
ohne Erstarren	[200]	$\lambda, \mu, \gamma, h, A, U$	NB, SVB	keine zeitliche Druckbeschreibung
mit Erstarren	[157]	$\lambda(t), \mu(t), \gamma, h, A, U$	SVB	Reibungsbeiwert $\mu(t)$ berücksichtigt Gleitreibung und ist mit der Zeit anwachsend rechnerische Komplikationen widersprüchliche wissenschaftliche Interpretation Parameter Erstarrungszeit $t$
<i>Hydromechanik</i>	[48]	$\gamma, h$	NB, SVB	stoffphysikalische Einordnung und kein Zeiteinfluss
<i>Rheologie</i>				
Strukturbruchfläche	[130]	$K_i, A_{bi}$	SVB	verschiedene Gleichungen zur zeitlichen Druckbeschreibung
Schubspannungshypothese	[152]	$\lambda, \gamma, C_{thix}, d, h, v$		Seitendruckbeiwert $\lambda$ konstant
<i>Empirisch</i>	[76]	z. B. $v$	NB, SVB	rein empirisch und nur für spezifische Bedingungen gültig

Um den Frischbetondruck beschreiben bzw. bestimmen zu können, ist die Analyse der rheologischen Eigenschaften, der mechanischen Vorgänge und konstruktiven Einflüsse unerlässlich. Daher werden im Rahmen der experimentellen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit die betreffenden Parameter schwerpunktmäßig betrachtet und erfasst. Anhand der Auswertung und Analyse der ermittelten Ergebnisse soll das Fundament für eine Vorhersage für verschiedene Betonarten gebildet werden. Darüber hinaus sind die sich aus der Einbaudynamik ergebenden Prozesse zu beurteilen.

## 3 Experimentelle Frischbetondruckuntersuchungen

### 3.1 Einführung

Zur Herleitung stoffgesetzlicher Zusammenhänge, z. B. zwischen Frischbetondruck und -eigenschaften, wird ein umfassendes Wissen über das physikalische Materialverhalten vorausgesetzt. Anhand eigener Experimente sollten die aus der Literatursichtung bekannten Wissensdefizite (siehe Abschnitt 2.5) hinsichtlich der zugrunde gelegten Modellansätze behoben werden. Hierfür sollten die Einflussparameter auf den Frischbetondruck experimentell identifiziert und analysiert werden (Versuchsreihe „Modellschalungssystem“ bzw. „Rahmenschalung“).

In einem ersten Schritt wurde mit einer Trägerschalung der Einfluss der Parameter Mischungszusammensetzung, Einbaugeschwindigkeit, Schalhautdehnung, Fließgrenze, Konsistenz, Schalungsgeometrie und Werkstofftemperatur untersucht. Im Anschluss daran wurden die dabei gewonnenen Ergebnisse im Zuge von Frischbetondruckversuchen (Einflussparameter Schalungsgeometrie und Konsistenz) mit selbstverdichtendem Beton in einer Rahmenschalung überprüft.

Ein umfassendes physikalisches, für alle Randbedingungen und Frischbetone gültiges Materialmodell zur wirklichkeitsnahen Beschreibung des Frischbetondrucks bedarf der Berücksichtigung stoffgesetzlicher Beziehungen. Diese basieren auf der Grundlage fundierter Erkenntnisse über das rheologische Materialverhalten. Als weitere wesentliche Faktoren sind in diesem Zusammenhang die aus dem Betoneinbau resultierende dynamische Impulswirkung sowie das Verformungsverhalten der Schalung von grundlegendem Interesse.

Im Rahmen dieses Kapitels 3 werden die einzelnen Untersuchungsprogramme der Frischbetondruck-Versuchsreihen Modellschalungssystem und Rahmenschalung vorgestellt. Die ausführliche Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse erfolgt anschließend in Kapitel 4.

### 3.2 Übersicht über das Versuchsprogramm

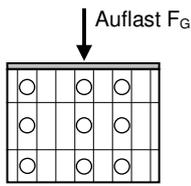
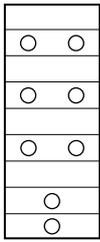
Eine Übersicht über die durchgeführten Versuchsreihen, verwendeten Schalungen, untersuchten frischen zementgebundenen Werkstoffe und erfassten Messgrößen an der Schalung ist in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Hierbei sind die in den jeweiligen Schalungsansichten verwendeten Messpunkte ausschließlich schematisch eingetragen. Eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Versuchsreihen erfolgt in den Abschnitten 3.3 (Modellschalungssystem) und 3.4 (Rahmenschalung).

Die in Tabelle 3.1 dargestellten Versuchsreihen wurden zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt. Dies führte zu einer leichten, aber unwesentlichen Abweichung hinsichtlich der Rezeptur der untersuchten selbstverdichtenden Betone (für die Versuchsreihen Modellschalungssystem und Rahmenschalung). Dabei wiesen die entsprechenden Betone – aufgrund der

zur Verfügung stehenden Ausgangstoffe – geringfügige Abweichungen hinsichtlich des Gesteinskörnungs- und Fließmittelanteils auf (siehe Abschnitt 3.3.3.1 [Beton SVB-I] bzw. 3.4.4.1 [Beton SVB-IV]). Diese waren jedoch derart geringfügig, dass eine allgemeingültige Vergleichbarkeit gewährleistet werden konnte.

Um den Frischbetondruck zementgebundener Werkstoffe zu untersuchen, wurden entsprechend Tabelle 3.1 Mörtel, selbstverdichtender Mörtel, Normalbeton und selbstverdichtender Beton in die Trägerschalung eingebaut (siehe Abschnitt 3.3). Diese bildete den Kern des verwendeten Modellschalungssystems zur Simulation der Schalungsbeanspruchung. Dabei wurde der zeitliche Verlauf des Frischbetondrucks  $\sigma_h(t)$  mittels Druckmessdosen (DMD) und der Schalhautdehnungen  $\epsilon(t)$  anhand von Dehnmessstreifen (DMS) bestimmt.

**Tabelle 3.1:** Übersicht über das Versuchsprogramm zu den experimentellen Frischbetondruckuntersuchungen zementgebundener Werkstoffe

Versuch	Modellschalungssystem	Rahmenschalung
		
Messgrößen	$\sigma_h(t), \epsilon(t)$	$\sigma_h$
Schalung	Trägerschalung	Rahmenschalung
frische zementgebundene Werkstoffe	Mörtel selbstverdichtender Mörtel Normalbeton selbstverdichtender Beton	selbstverdichtender Beton

Die experimentellen Untersuchungen zum Frischbetondruck von selbstverdichtendem Beton wurden mit einer Rahmenschalung durchgeführt (siehe Abschnitt 3.4). Diese dienten der Überprüfung der mit dem Modellschalungssystem gewonnenen Ergebnisse. In diesem Zusammenhang wurde der maximale Frischbetondruck  $\sigma_h$  ebenfalls mittels Druckmessdosen aufgezeichnet.

Um eine externe Beeinflussung durch schwankende Umgebungsbedingungen zu vermeiden, wurden sämtliche Versuche bei Raumtemperatur und -feuchte in der Versuchshalle des INSTITUTS FÜR BAUVERFAHRENS- UND UMWELTTECHNIK (IBU), Trier durchgeführt.

Darüber hinaus wurde die Reproduzierbarkeit der experimentellen Untersuchungen gewährleistet, siehe Abschnitte 3.3.1 bzw. 4.1.1 (Modellschalungssystem) und 3.4.2 bzw. 4.2 (Rahmenschalung).

### 3.3 Frischbetondruck in einem Modellschalungssystem

Der vorliegende Abschnitt 3.3 stellt das experimentelle Untersuchungsprogramm zum Frischbetondruck sowie dessen Durchführung detailliert vor.

#### 3.3.1 Versuchsprogramm

Unter praxisnahen Bedingungen konnten im Rahmen der experimentellen Untersuchungen durch wirkliche und simulierte Materialauflasten Schalungsbeanspruchungen hervorgerufen werden. Tabelle 3.2 zeigt eine Übersicht über die dabei verwendeten frischen Betone bzw. Mörtel und ihren zugehörigen Bezeichnungen.

**Tabelle 3.2:** *Verwendete frische Betone bzw. Mörtel (mit den zugehörigen Zementen) für das experimentelle Versuchsprogramm*

frischer Beton bzw. Mörtel	Zement
<i>Standardbeton</i>	
NB-I	CEM I 32,5 R
NB-II	CEM I 42,5 R
NB-III	CEM III/A 32,5 N
<i>selbstverdichtender Beton</i>	
SVB-I	CEM I 32,5 R
SVB-II	CEM I 42,5 R
SVB-III	CEM III/A 32,5 N
<i>Mörtel</i>	
ZM	CEM I 32,5 R
<i>selbstverdichtender Mörtel</i>	
SVZM	CEM I 32,5 R

Um den Einfluss der rheologischen Eigenschaften auf den Frischbetondruck zu untersuchen, wurden verschiedene Zemente auf der Grundlage der Angaben in [112] ausgewählt, siehe Tabelle 3.2. Zur analytischen Betrachtung einer normalen Festigkeitsentwicklung diente ein CEM I 32,5 R (NB-I, SVB-I, ZM und SVZM). Um eventuelle Veränderungen des Frischbetondrucks durch den Einsatz eines Zements mit einer schnellen Festigkeitsentwicklung überprüfen zu können, wurde ein CEM I 42,5 R (NB-II bzw. SVB-II) mit in das Versuchsprogramm aufgenommen. Zur Überprüfung des Frischbetondrucks bei einer langsamen Festigkeitsentwicklung wurde zusätzlich ein CEM III/A 32,5 N (NB-III bzw. SVB-III) verwendet.

Das aufgestellte Versuchsprogramm ermöglichte das Studium der nachfolgenden Einflüsse auf den Frischbetondruck:

- Mischungszusammensetzung
- Einbaugeschwindigkeit
- Schalhautverformung
- Fließgrenze
- Konsistenz
- Schalungsgeometrie
- Baustofftemperatur

Im Rahmen der Literatursichtung wurde gezeigt, dass der Einfluss der Schalungsreibung hinsichtlich des Frischbetondrucks auf lotrechte Schalungen vernachlässigbar ist, siehe Abschnitt 2.5.2. Insofern konnte auf die explizite Betrachtung eines möglichen Einflusses des Zustands der Schalung bzw. der Schalhautoberfläche verzichtet werden. Es wurde in diesem Zusammenhang jedoch darauf geachtet, dass keine abstehenden Fasern auf der Schalhautoberfläche vorhanden waren (siehe Abschnitt 3.3.2.1).

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen wurden der untersuchte Beton bzw. Mörtel in die verwendete Trägerschalung mit den Abmessungen  $h \times b \times d = 1,50 \text{ m} \times 2,00 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$  eingebracht. Das Anbringen der Belastungsvorrichtung zur Simulation verschiedener Einbauhöhen erfolgte an einen Stahlprofilrahmen mit den Maßen  $h \times b = 3,13 \text{ m} \times 2,24 \text{ m}$  (Außenmaß) bzw.  $h \times b = 2,80 \text{ m} \times 1,90 \text{ m}$  (Innenmaß).

Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über das experimentelle Versuchsprogramm. Darin sind die verwendete Schalung, die resultierende Wandkörperabmessung sowie die ermittelten Messgrößen dargestellt. Die untersuchten frischen zementgebundenen Werkstoffe waren Normalbeton (NB), selbstverdichtender Beton (SVB), Zementmörtel (ZM) sowie selbstverdichtender Zementmörtel (SVZM).

Im Zuge der experimentellen Frischbetondruckuntersuchungen wurden die Betontemperatur  $T$ , die Schalhautdehnung  $\varepsilon$ , das Ausbreitmaß  $a$  (NB) bzw. Setzfließmaß  $sm$  (SVB), die Einbauzeit  $t$  sowie die (statische) Fließgrenze  $\tau_0$  (aufgrund ihrer unterschiedlichen Bezeichnungen [siehe Abschnitt 2.1.3.2] und da nur die statische Fließgrenze im Rahmen der vorliegenden Arbeit maßgebend ist, wird diese im Folgenden vereinfacht  $\tau_0$  benannt) erfasst. Die Frischmörtel ZM und SVZM wurden im Hinblick auf den Einfluss der Mischungszusammensetzung auf den Schalungsdruck untersucht.

**Tabelle 3.3:** Übersicht über das Versuchsprogramm zum Frischbetondruck mittels eines Modellschalungssystems

Versuch	Frischbetondruck durch Konstruktionsbetone bzw. -mörtel							
Schalungsart	Trägerschalung							
Modellabmessungen h x b x d [m]	1,50 x 2,00 x 0,25							
Messgrößen	$\sigma_h(t), \epsilon(t)$						$\sigma_h$	
mögliche Einflussparameter	h, b, T, $\epsilon$ , a bzw. sm, t, $\tau_0$						h, b	
Beton bzw. Mörtel	NB-I	NB-II	NB-III	SVB-I	SVB-II	SVB-III	ZM	SVZM
Einbaugeschwindigkeit v [m/h]	3,5 14	14	14	3,5 7 14 28 56	7	7	14	7
max. Einbauhöhe h <sub>E</sub> [m]	6,50							

Die in Tabelle 3.3 angegebenen Einbaugeschwindigkeiten betragen für alle Normalbetone (NB-I, NB-II und NB-III) und den Zementmörtel (ZM) 14 m/h. Um den Einfluss der Einbaugeschwindigkeit auf den Frischbetondruck von Normalbeton zu bestimmen, wurde darüber hinaus ein NB-I mit einer Geschwindigkeit von 3,5 m/h eingebaut. Für die selbstverdichtenden Betone (SVB-I, SVB-II und SVB-III) und den selbstverdichtenden Mörtel (SVZM) betrug die Einbaugeschwindigkeit 7 m/h. Zur Ermittlung des Einbaugeschwindigkeitseinflusses auf den Frischbetondruck wurden für SVB-I die Geschwindigkeiten 3,5 m/h, 14 m/h, 28 m/h und 56 m/h untersucht.

Darüber hinaus wurde die Reproduzierbarkeit der Modellschalungssystem-Versuche mittels eines zusätzlichen Versuchs (SVB-II, v = 7 m/h) verifiziert, siehe Abschnitt 4.1.1.

Die Literatursichtung hat gezeigt, dass für den Einbau von Normalbeton ab Einbaugeschwindigkeiten > 7 m/h eine hydrostatische Bemessung empfohlen wird (siehe Abschnitt 2.5 bzw. [98]). Entsprechend wurden im Rahmen der bisher veröffentlichten experimentellen Versuchsergebnisse zumeist Einbaugeschwindigkeiten  $\leq 7$  m/h ausführlich untersucht und dokumentiert. Um zu überprüfen, ob diesbezüglich nicht auch bei größeren Einbaugeschwindigkeiten Frischbetondrucke unterhalb der hydrostatischen Werte (siehe Abschnitt 2.4.2) auftreten, wurde als maximale Einbaugeschwindigkeit für die Normalbetone NB-I, NB-II und NB-III bzw. den Zementmörtel ZM ein Wert von 14 m/h gewählt. Eine Gegenüberstellung mit den Frischbetondrücken selbstverdichtender Betone war insofern gewährleistet, als dass der Beton SVB-I u. a. ebenfalls mit einer Einbaugeschwindigkeit von 14 m/h untersucht wurde. Um den

Einfluss der rheologischen Eigenschaften auf den Frischbetondruck über einen angemessenen (d. h. ausreichend langen) Zeitraum beobachten zu können, wurde für die Betone SVB-II bzw. SVB-III (und damit auch für den selbstverdichtenden Mörtel SVZM) eine Einbaugeschwindigkeit von 7 m/h gewählt.

Vorrangiges Ziel des Modellschalungssystems war die Beurteilung des Frischbetondrucks in Abhängigkeit von der Auflastsimulation. Trotzdem wurde im Rahmen des Einbauvorgangs darauf geachtet, die jeweils gültigen Bestimmungen (z. B. [27]) und Vorgaben (siehe Tabelle 3.3) einzuhalten.

### **3.3.2 Versuchsaufbau und Messtechnik**

#### **3.3.2.1 Modellschalungssystem zur Simulation der Schalungsbeanspruchung**

Die Entwicklung eines Versuchsaufbaus mit einer Modellkonstruktion zur Erfassung der auf die Schalung wirkenden Druckbeanspruchung infolge simulierter Einbauhöhen ermöglichte für eine Vielzahl von Versuchen einheitliche Bedingungen sowie die Variation einzelner Einflussparameter. Der resultierende Frischbetondruck wurde in dem mit Beton befüllten Schalungsbereich der Simulations-Modellvorrichtung erfasst. Auf diese Weise war es möglich, einen durchgehenden Praxisbezug zu gewährleisten. 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.

Im Rahmen der Literatursichtung ist bereits in Abschnitt 2.4.4 auf die Problematik einer einheitlichen Erfassung des Frischbetondrucks hingewiesen worden (welche eine allgemeingültige Verwendbarkeit des in der Fachliteratur vorhandenen Ergebnisfundus signifikant erschwert). So erwies es sich in der Vergangenheit als nachteilig, dass vornehmlich Ergebnisse aus Baustellenmessungen oder Großversuchen zur Feststellung des Frischbetondrucks ausgewertet und analysiert wurden. Aufgrund der dabei gültigen Rahmenbedingungen waren vor allem die Steuerbarkeit und Variation der zu betrachtenden Einflussparameter eingeschränkt. Die o. g. Defizite sollten anhand der an den Versuchsaufbau gestellten Anforderungen behoben werden. Somit mussten die Eigenschaften des verwendeten Modellschalungssystems die nachfolgenden Kriterien erfüllen:

- 1) allgemeingültige Vergleichbarkeit der Messergebnisse
- 2) Einhaltung praxisnaher Randbedingungen
- 3) Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf Material- und Personalkosten
- 4) Simulation praxisnaher Einbauhöhen
- 5) frei wähl- und steuerbare Umsetzung sowie einfache Kontrolle des Versuchsprogramms
- 6) differenzierte Erfassung der über die gesamte Schalungsgeometrie auftretenden Frischbetondrücke und Schalhautdehnungen

Die Eigenschaften und Umsetzung des Versuchsaufbaus gewährleisteten die Einhaltung der o. g. Anforderungen 1) bis 6). Hierbei wurde die Konstruktion des eingesetzten Modellschalungssystems aus zwei voneinander unabhängigen Teilsystemen zusammengesetzt. Das versuchstechnische Grundgerüst wurde durch die Verwendung einer Trägerschalung gebildet. 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.

Im Folgenden werden zum allgemeinen Verständnis zunächst die Eigenschaften und Umsetzung des Versuchsaufbaus vorgestellt. Im Anschluss daran erfolgt die eingehende Beschreibung der Grundelemente Schalung und Stahlrahmen sowie des Belastungskonzepts.

### ***Eigenschaften und Umsetzung des Versuchsaufbaus***

Der allgemeingültigen Vergleichbarkeit der Messergebnisse – siehe Anforderung 1) – konnte durch den Aufbau des Modellschalungssystems in einer Versuchshalle sowie der kontinuierlichen Verwendung einer einzigen Schalung Rechnung getragen werden. Die Charakteristik der Belastungsvorrichtung ermöglichte eine uneingeschränkte Simulation des Parameters Einbaugeschwindigkeit bei gleichzeitiger Erfassung der Dehnung und des Drucks an einer in der Baustellenpraxis häufig eingesetzten Schalung. Dies führte zu der Einhaltung praxisnaher Randbedingungen – siehe Anforderung 2). Die Wirtschaftlichkeit – siehe Anforderung 3) – der in diesem Abschnitt 3.3 vorgestellten experimentellen Untersuchungen konnte anhand des durchgehenden Einsatzes einer einzigen Schalung und ihr verhältnismäßig geringes effektives Schalungsvolumen gesichert werden. Dies ergab neben der Einsparung von Personalkosten für den Schalungsaufbau auch eine Minimierung des entstandenen Aufwands für die Herstellung der untersuchten frischen Betone bzw. Mörtel. Der speziell entworfene Versuchsaufbau gewährleistete im Zusammenspiel mit der gewählten Belastungsvorrichtung die in 4) geforderte Simulation praxisnaher Einbauhöhen. Gleichzeitig konnte das Modellschalungssystem mit seiner Belastungsvorrichtung eine frei wähl- und steuerbare Umsetzung sowie Kontrolle des Versuchsprogramms erreichen – siehe Anforderung 5). Schließlich wurden die gewählten Messwertaufnehmer, welche bedingt durch die Vorteile des Modellschalungssystems nur einer einmaligen Anordnung bedurften, frei über die verwendete Schalung platziert. Damit garantierten diese eine ausführliche Erfassung – siehe Anforderung 6) – der auftretenden Frischbetondrucke und Schalhautdehnungen.

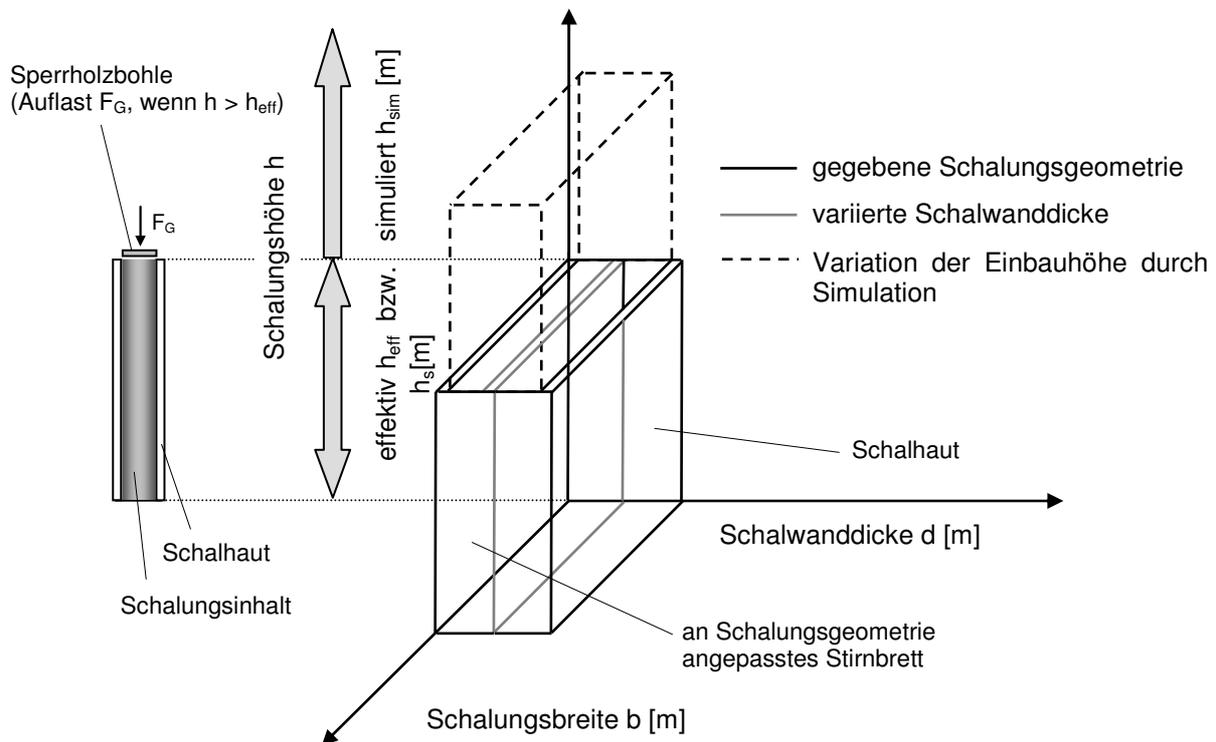
Ohne aufwendige Modifizierungen konnten die nachfolgenden, für den Einbauvorgang relevanten Einflussparameter variiert werden:

- Einbaumaterial
- Einbaugeschwindigkeit
- Einbauhöhe

Eine präzise Umsetzung der vorgegebenen Einbaugeschwindigkeit sicherte die Einbauvorrichtung, bestehend aus Einbaukübel sowie der speziell entwickelten Einbaurutsche (siehe

Abschnitt 3.3.2.2). Um ihren Einfluss auf den Frischbetondruck erfassen zu können, war unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit des Hydraulikpumpen-Zylindersystems, der Stahlrahmenbemessung, der zulässigen Belastung der verwendeten Druckmessdosens (siehe Abschnitt 3.3.2.3) und der Schalungsbemessung eine Simulation beliebiger Einbauhöhen möglich. Die einer bestimmten Einbauhöhe entsprechende Auflast musste zuvor rechnerisch aus der spezifischen Dichte der frischen Betone bzw. Mörtel ermittelt werden.

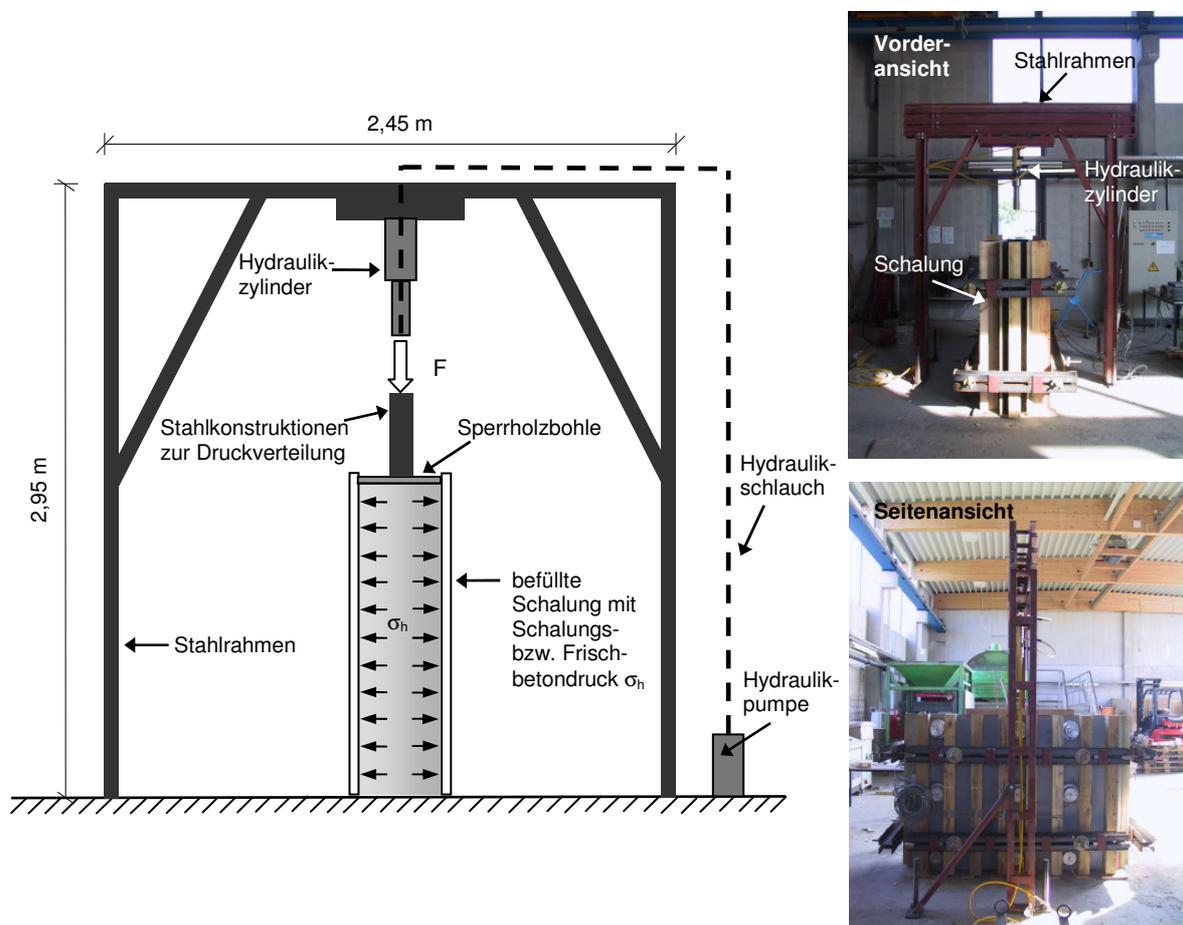
Bild 3.1 zeigt eine Veranschaulichung der möglichen Freiheitsgrade. Dabei ist anzumerken, dass nur eine Simulation der Schalungs- bzw. Einbauhöhe durchgeführt werden konnte (s. u. – Konzept der Belastungsvorrichtung). Für eine evtl. Veränderung der weiteren geometrischen Parameter – Schalungsbreite und Schalwanddicke – müssen die entsprechenden Konstruktionselemente angepasst und ausgetauscht werden. Aus der Literatursichtung des Abschnitts 2.5 hinsichtlich der Mehrzahl der existierenden Konzepte zur Beschreibung des Frischbetondrucks konnte kein expliziter Einfluss der Schalungsbreite  $b$  und Wanddicke  $d$  abgeleitet werden. Bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Bedingung  $b \gg d$  wurde daher im Rahmen der experimentellen Untersuchungen des vorliegenden Kapitels auf eine Variation der Schalungsbreite verzichtet. Ebenfalls wurde von einer Variation der Wanddicke abgesehen.



**Bild 3.1:** *Mögliche Freiheitsgrade des Modellschalungssystems bei konstanter Schalungsbreite; die Simulation der Schalungshöhe erfolgte durch das Hydraulikpumpen-Zylindersystem (s. u. – Konzept der Belastungsvorrichtung); zur Veränderung der Schalwanddicke müssen die seitlichen Stirnbretter (s. u. – Schalung) entsprechend ausgetauscht werden*

Aus den vorangegangenen Ausführungen ist ersichtlich, dass anhand des vorgestellten Modellschalungssystems grundsätzlich sämtliche externen und konstruktiven Einflussparameter auf den Frischbetondruck einfach und präzise simuliert werden können.

In Bild 3.2 ist die Umsetzung des Versuchsaufbaus schematisiert dargestellt. Bild 3.2, links zeigt ausgehend von der Hydraulikpumpe den Kraftverlauf innerhalb des Modellschalungssystems – bestehend aus Hydraulikpumpen-Zylinderkombination, Stahlrahmen und Schalung (s. u.) – bis hin zur Kraftübertragung auf den Schalungsinhalt. Aus der Vorderansicht des Modellschalungssystems in Bild 3.2, oben rechts ist zu erkennen, dass die Breite des Stahlrahmens für beliebige Wanddicken ausreichend dimensioniert ist. In Bild 3.2, unten rechts ist eine Seitenansicht des Modellschalungssystems dargestellt. An der abgebildeten Schalhaut sind die einzelnen Druckmessdosen angebracht.



**Bild 3.2:** Versuchsaufbau für die Untersuchung des Frischbetondrucks (links), Vorderansicht (oben rechts) und Seitenansicht (unten rechts)

In Bild 3.3 ist abschließend eine Detailansicht der Umsetzung der Auflasteinrichtung zur Simulation von Einbauhöhen (s. u. – Konzept der Belastungsvorrichtung), die die Schalungshöhe überschreiten.

Die mittels des in diesem Abschnitt beschriebenen Modellschalungssystems simulierten Auflasten liegen auf der „sicheren Seite“. Eventuelle Auflastabminderungen infolge Wandschubspannungen werden dabei nicht berücksichtigt.

Im Rahmen der Simulation der Einbauhöhe  $h_E > \text{Schalungshöhe } h_s (= 1,50 \text{ m})$  war ein Kontakt der für die schlüssige Krafteinleitung verantwortlichen Sperrholzbohle (siehe Bild 3.2) mit dem oberen Schalhautbereich unumgänglich. Dies konnte unter ungünstigen Umständen zu einer Beeinflussung der auf der Messhöhe  $h = 1,36 \text{ m}$  (siehe Bild 3.5) erfassten Werte führen.



**Bild 3.3:** *Detailansicht der Auflasteinrichtung (bestehend aus Stahlrahmen, Hydraulikpresse, Druckmessdose, Kantholz und Stahlhilfskonstruktion) zur Einbauhöhen-simulation*

### **Schalung**

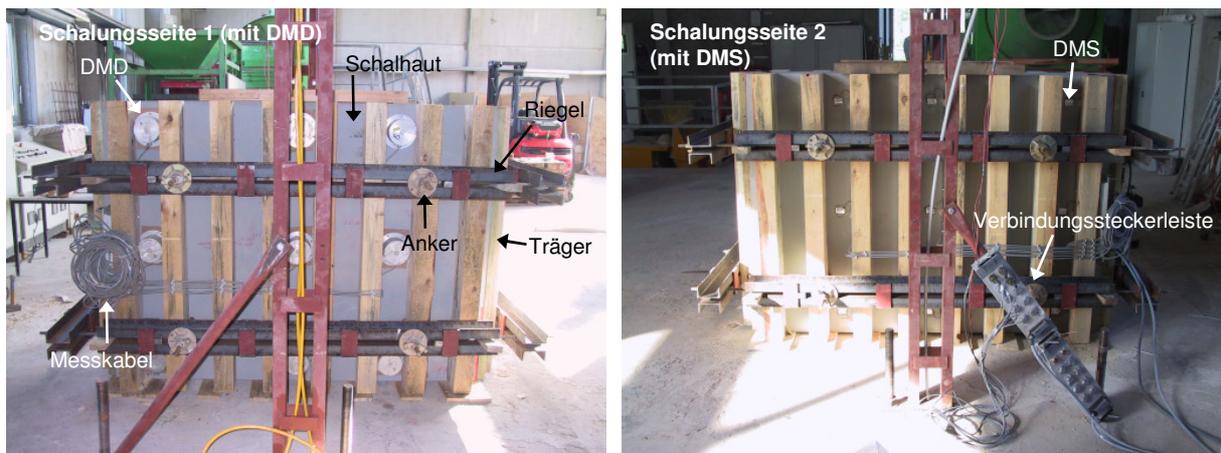
Um die zu erwartenden Frischbetondrücke der im Versuchsprogramm vorgegebenen Auflast-simulation problemlos aufnehmen zu können, erfolgte die Bemessung der Schalung auf der sicheren Seite liegend. Daher ist der Schalungsdimensionierung eine Einbauhöhe von zehn Metern und eine hydrostatische Frischbetondruckcharakteristik zugrunde gelegt worden. Die Schalungsdimensionierung erfolgte nach den allgemeingültigen Vorgaben und Vorschriften, siehe [93].

Die Schalungshöhe wurde derart gewählt, dass auch der vertikale Frischbetondruckverlauf analysiert werden konnte. Durch eine angemessene Größe der Schalungsfläche konnten anhand der Anordnung der einzelnen Messwertaufnehmer verschiedene Höhen- und Breitenabhängigkeiten berücksichtigt werden (siehe auch Abschnitt 3.3.2.3).

Vor allem im Hinblick auf die zu untersuchenden Einflüsse (siehe Abschnitt 3.1) wurde eine herkömmliche Trägerschalung mit einer Holzplatte als Schalhaut gewählt. Diese ist insbesondere aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Steifigkeit der Verwendung von andersartigen

Schalhautwerkstoffen (wie z. B. Aluminium oder Kunststoff) vorzuziehen. Die zu erwartenden Dehnungen sind bei Einsatz der gewählten Schalhaut messtechnisch besser zu erfassen.

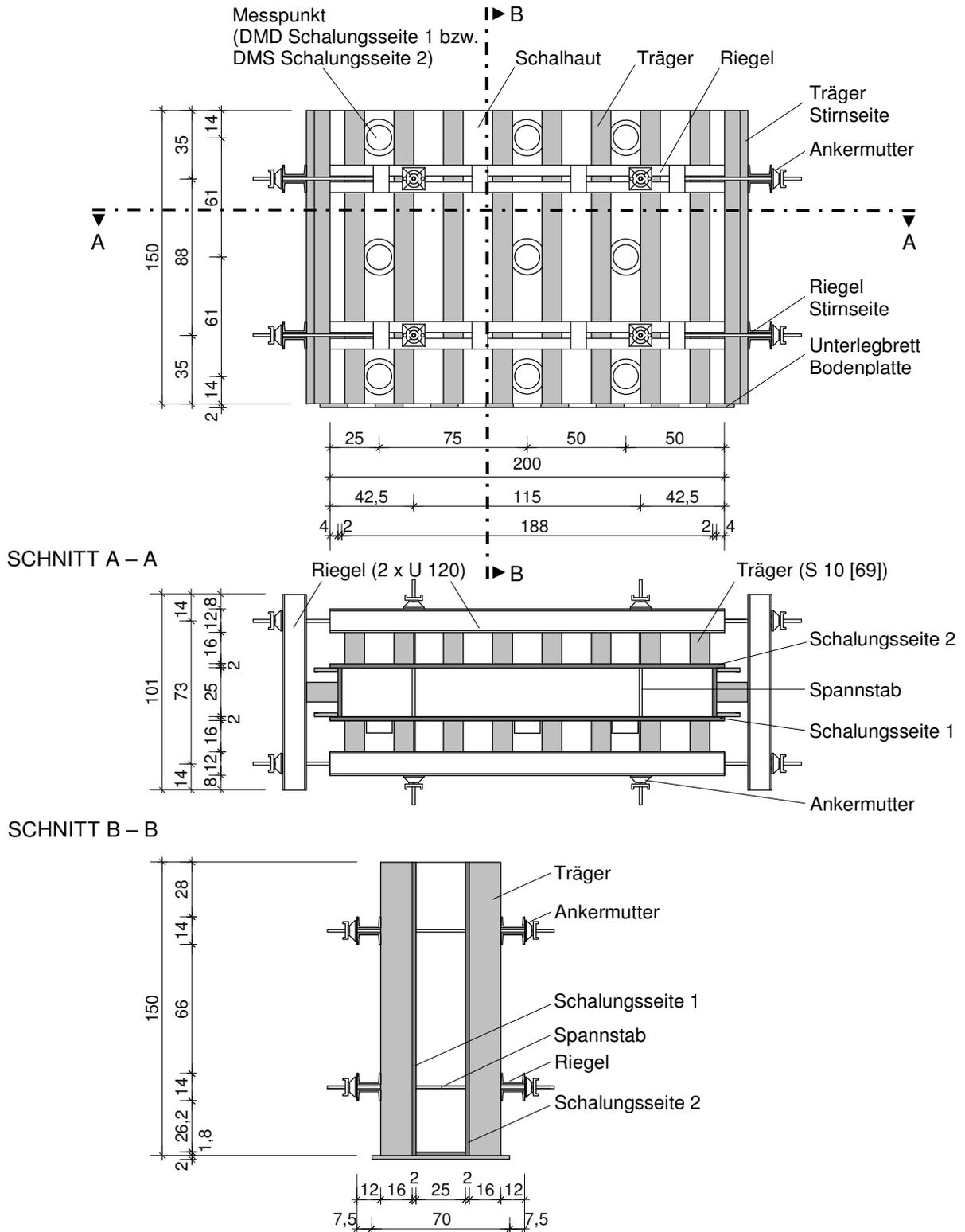
Entsprechend der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit musste die Schalungsgeometrie eine sinnvolle Anordnung der Messvorrichtung (Druckmessdosen und Dehnmessstreifen) ermöglichen. Die Schalung und die sich daraus ergebende Anordnung der Messsensoren sind in Bild 3.4 dargestellt. Während Bild 3.4, links die Schalungsseite mit den zugehörigen Druckmessdosen zeigt („Schalungsseite 1“), ist in Bild 3.4, rechts die Schalungsseite mit den Dehnmessstreifen zu sehen („Schalungsseite 2“).



**Bild 3.4:** Ansicht der Schalungsseite 1 mit DMD (links, 9 DMD, siehe auch Bild 3.5) sowie Schalungsseite 2 mit DMS (rechts, 9 DMS, siehe auch Bild 3.5) der im Rahmen der experimentellen Untersuchungen verwendeten Schalung (Trägerschalung)

Die Abmessungen und Elemente der gewählten Trägerschalung mit den an den Messpunkten angebrachten Vorrichtungen zur Druck- bzw. Verformungsmessung sind aus Bild 3.5 ersichtlich.

Bei der darin dargestellten Schalhaut handelt es sich um die Schalungsseite 1, an welcher die Druckmessdosen befestigt waren. An der ihr gegenüberstehenden Schalhaut (Schalungsseite 2) wurden anstelle der Druckmessdosen die Dehnmessstreifen geometrisch äquivalent platziert (siehe auch Bild 3.4 bzw. s. o.).



**Bild 3.5:** Ansicht (oben), Querschnitt (Mitte, Schnitt A – A) und Längsschnitt (unten, Schnitt B – B) der verwendeten Trägerschalung für eine Schalwanddicke von 25 cm; alle Abmessungen in [cm]

Die in Bild 3.5 angegebenen Abmessungen ergaben sich aus der in [210] aufgezeigten Methode zur Schalungsbemessung. Um eine sichere Bemessung durchführen zu können, wurde die Einbauhöhe  $h_E = 10$  m weit größer gewählt als die tatsächlich im Rahmen des experimentellen Untersuchungsprogramms simulierten Einbauhöhen.

### ***Stahlrahmen***

Grundgedanke der Stahlrahmen-Stützkonstruktion war die Gewährleistung eines gleichmäßigen und kontinuierlichen Lastauftrags. Zur Stabilitätssicherung und um damit ein Versagen der Rahmenkonstruktion zu verhindern, musste diese fest mit der Bodenplatte verankert werden. Die geometrischen Abmessungen mussten derart gewählt sein, dass eine ungestörte Versuchsdurchführung gewährleistet war.

Die Rahmenkonstruktion bestand aus Stahlprofilträgern. Als zweite Komponente des Modellsystems musste die Trägerschalung – mit ihren Stirnseiten parallel zu der Rahmenansicht – zwischen den beiden Rahmenstielen aufzustellen sein (siehe Bild 3.2). Die Lastaufbringung erfolgte mittels einer Hydraulikpumpe, die an dem Riegel des Stahlrahmens befestigt war. Auf diese Weise wurde die Last über ein auf der freien Oberfläche des in der Schalung eingebauten Materials aufgelegtes Stahlprofil mit darunter liegender Bohle aufgebracht.

Eine ausführliche Darstellung der Stahlrahmenkonstruktion ist in den Bildern A 3.1 und A 3.2 dokumentiert.

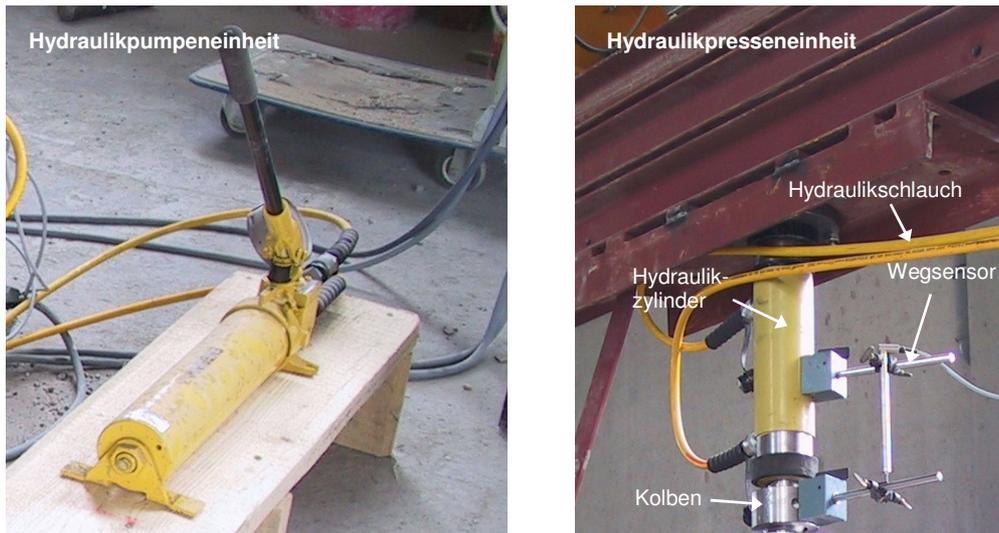
### ***Konzept der Belastungsvorrichtung***

Die Simulation zusätzlicher und damit über die Höhe der Schalung hinausgehender Einbauhöhen sowie der daraus resultierenden Auflastzustände erfolgte anhand einer aus einer Hydraulikpumpen-Zylinderkombination bestehenden Belastungsvorrichtung. Gemäß den obigen Ausführungen (siehe Bild 3.2) war der dem Lastsimulationssystem zugehörige Zylinder als ein zentrischer Lasteinleitungspunkt mittig an dem Stahlrahmenriegel befestigt.

Die ausführliche Beschreibung des Belastungsvorrichtungskonzeptes erfolgt mit den zugehörigen Darstellungen in Anlage A 3.1 bzw. den Bildern A 3.3 bis A 3.5.

In Bild 3.6 sind die beiden wesentlichen Bestandteile des Hydraulikpumpen-Zylindersystems dargestellt: die verwendete hydraulische Pumpvorrichtung (links) sowie die eingesetzte dazugehörige hydraulische Presseneinheit (rechts).

Die Kraft konnte mit Hilfe des Hydraulikzylinders, der Stahlkonstruktion und der Bohle gleichmäßig schlüssig auf den Schalungsinhalt aufgebracht werden, siehe auch Bild 3.2. Der hydraulische Durchfluss wurde anhand der Pumpe gesteuert, welche die Überwachung des wirkenden Auflastzustandes ermöglichte.



**Bild 3.6:** *Hydraulikpumpen-Zylinderkombination zur Auflastsimulation, bestehend aus Hydraulikpumpe (links) und hydraulischer Presseneinheit (rechts)*

### 3.3.2.2 Einbauvorrichtung

Bedingt durch die gegebene Schalungsgeometrie (siehe Abschnitt 3.3.2.1) war die Realisierung eines kontinuierlichen und gleichmäßigen Einbauvorgangs mit einem gängigen Betonierkübel nur schwer möglich. Dies war vor allem für die Steuerung der Einbaugeschwindigkeit von Bedeutung. Daher wurde für den Einbauvorgang eine spezielle Rutsche (siehe Bild 3.7) konstruiert. Ein maßgebendes Kriterium war dabei die Gewährleistung der für den Einbau von Beton maximal zulässigen Fallhöhe von 1,50 m [93].



**Bild 3.7:** *Rutsche für den Einbau der frischen Betone bzw. Mörtel in das verwendete Modellschalungssystem – Anordnung zusammen mit Schalung und Stahlrahmen*

In Bild 3.7 sind eine Ansicht der konstruierten Einbaurutsche sowie ihre Versuchsanordnung zusammen mit dem Schalungs- und Stahlrahmensystem zu sehen.

Bild 3.7 zeigt, dass sich die entwickelte Konstruktion in Verbindung mit dem Stahlrahmen ausgezeichnet für einen Einbau der verwendeten zementgebundenen Werkstoffe in das gewählte Schalungssystem eignete.

### 3.3.2.3 Messeinrichtung

Für eine detaillierte Untersuchung des Frischbetondrucks in Bezug auf die Schalhautverformung und das rheologische Verhalten wurden im Rahmen des Versuchsprogramms die nachfolgenden Messgrößen sowohl bei tatsächlichen als auch bei simulierten Einbauhöhen registriert:

- Frischbetondruck
- Schalhautdehnung
- Werkstofftemperatur
- rheologische Eigenschaften

Die zur Erfassung der o. g. Größen benötigten Messvorrichtungen werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

#### *Messeinheit*

Die Aufzeichnung des Frischbetondrucks, der Schalhautdehnungen sowie der Werkstofftemperatur erfolgte mittels eines Messverstärkers (Vielstellenmessgerät).

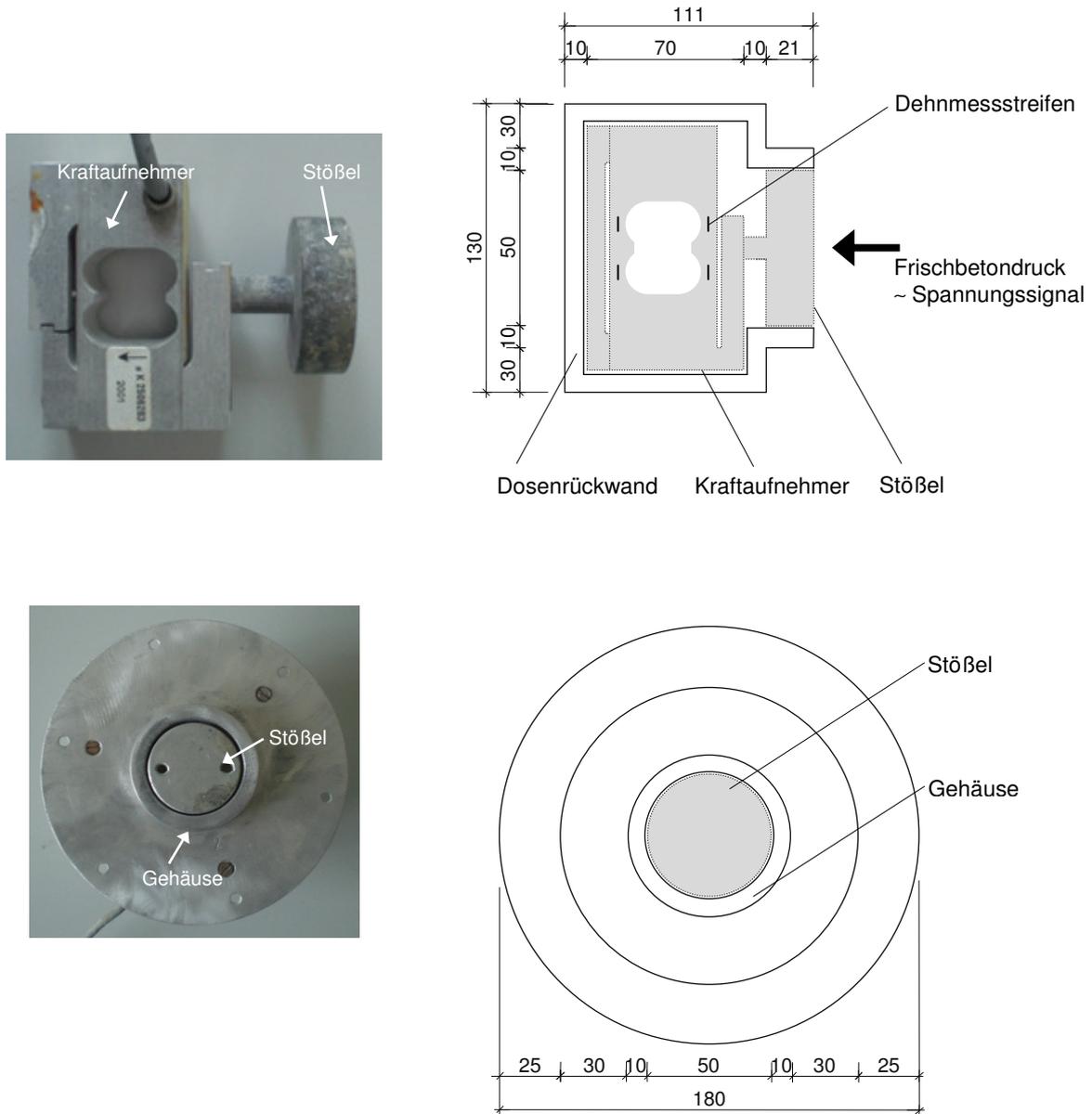
#### *Frischbetondruck*

Der horizontale Frischbetondruck wurde anhand von kalibrierten und temperaturkompensierten Druckmessdosen (Eigenentwicklung des INSTITUTS FÜR BAUVERFAHRENS- UND UMWELTECHNIK [IBU], Trier) erfasst. Diese bestanden aus einer Druckdose und einem Spannungssensor. Über einen Aluminiumstößel konnte der auf die Schalung einwirkende Frischbetondruck aufgenommen und in einen Kraftaufnehmer weitergeleitet werden. Der Kraftaufnehmer ist gemeinsam mit dem Aluminiumstößel in eine Aluminiumdose eingesetzt.

In Bild 3.8 ist eine Druckmessdose – bestehend aus Druckdose und -sensor – mit ihren geometrischen Abmessungen abgebildet. Dabei zeigt Bild 3.8, oben links den in die Druckmessdose eingebauten Drucksensor (Genauigkeitsklasse 0,05), der aus dem Kraftaufnehmer und dem Stößel besteht. Die Geometrie des Längsschnitts der Druckmessdosen ist aus Bild 3.8, oben rechts zu erkennen. Die Ansicht einer Druckmessdose ist Bild 3.8, unten links zu entnehmen, die zugehörigen geometrischen Verhältnisse ergeben sich aus Bild 3.8, unten rechts.

Die Krafteinleitung in die Druckmessdose führte zu einer geringfügigen Verformung des Kraftaufnehmers. Diese Verformung wurde mittels einer DMS-Brückenschaltung registriert

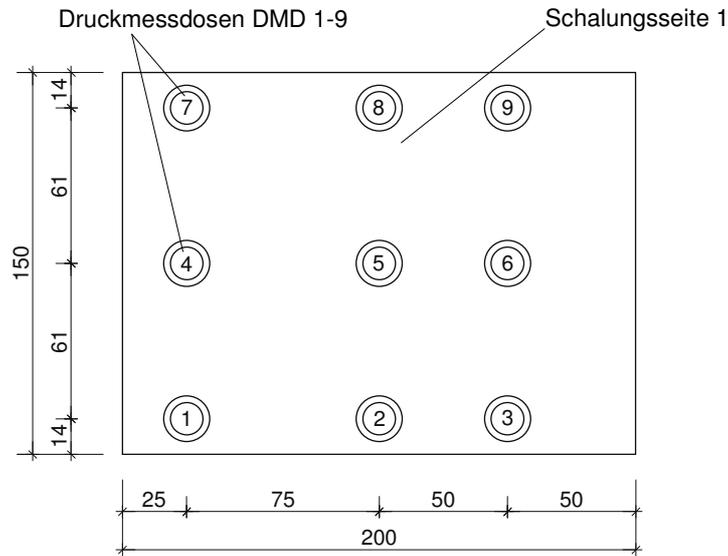
und in ein proportionales Spannungssignal umgewandelt. Durch eine entsprechende Skalierung der Spannungswerte war das Spannungssignal gegenüber dem auftretenden Druck linear ausgeprägt. Die Druckmessdosen wurden plan zur Innenseite der Schalhaut angebracht.



**Bild 3.8:** Druckmessvorrichtung aus Kraftaufnehmer und Stößel (oben links), geometrische Abmessungen des Längsschnitts einer Druckmessdose (oben rechts), Abbildung einer Druckmessdose (unten links) sowie geometrische Abmessungen der Druckmessdosen-Ansicht (unten rechts); alle Abmessungen in [mm]

Zur wirklichkeitsnahen und ausführlichen Aufzeichnung des Frischbetondrucks über die Schalungsbreite und -höhe wurden neun Druckmessdosen an der Schalungshaut platziert (siehe Abschnitt 3.3.2.1, Bild 3.4 bzw. 3.5). Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle in Bild 3.9 explizit die Anordnung der Druckmessdosen an der Schalungshaut angegeben.

Um eine präzise Bezeichnung der Druckmessdosen zu gewährleisten, wurden diese durchnummeriert (siehe Bild 3.9).

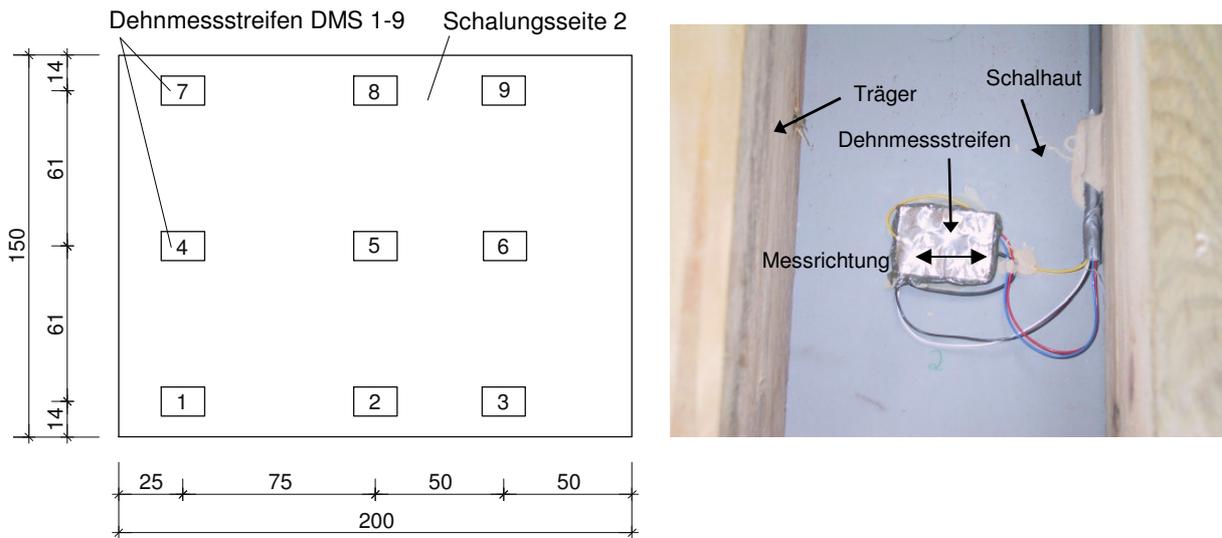


**Bild 3.9:** Platzierung und Bezeichnung der Druckmessdosen an der Schalungsseite 1; alle Abmessungen in [cm]

Beim Einbau in die Schalung wurde darauf geachtet, dass die Stößelseite der Druckmessdose bündig mit der Schalhautinnenseite (zum eingebauten Material hin) abschloss. An der Schalhautinnenseite wurden die Druckmessdosen mit Kunststoffolie abgedeckt.

### **Schalhautdehnung**

Anhand von temperaturkompensierten Dehnmessstreifen (Messgenauigkeit  $\pm 1,5\%$ , siehe auch [170]) wurden die maximalen horizontalen Dehnungen entlang der Schalhautbreite aufgezeichnet. Anhand dieser können grundsätzlich Rückschlüsse auf die senkrecht zur Schalhautoberfläche auftretenden Verformungen gezogen werden, siehe [43]. Die einzelnen Dehnmessstreifen wurden auf der Schalhaut zwischen jeweils zwei, als Auflagervorrichtung dienenden, Schalungsträgern platziert. Hierbei wurde die Schalhautaußenseite – entsprechend der geometrischen Anordnung der Druckmessdosen der gegenüberstehenden Schalhaut, siehe Abschnitt 3.3.2.1 – mit neun Messpunkten versehen. Aus Bild 3.10, links ist die exakte Positionierung der Dehnmessstreifen zu ersehen. Zur Abschirmung gegen äußere Einflüsse während des Versuchs wurden sie mit einer Aluminiumfolie abgedeckt.

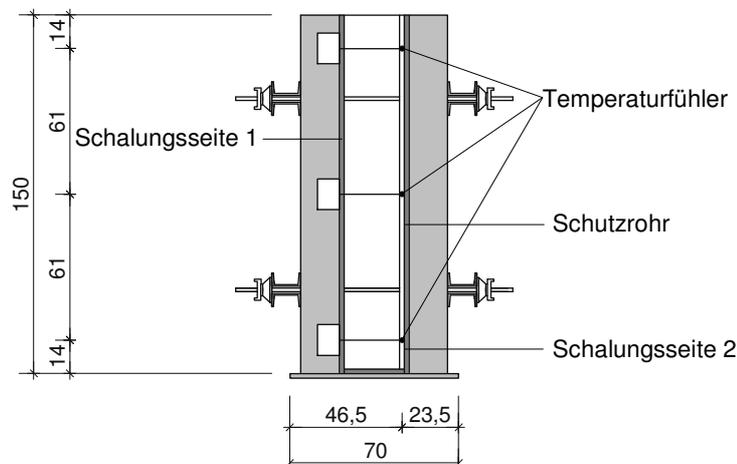


**Bild 3.10:** Lage und Bezeichnung der Dehnmessstreifen an der Schalungsseite 2 (links) sowie Detailabbildung eines auf der Schalhaut angeordneten Dehnmessstreifens (rechts); alle Abmessungen in [cm]

Um eine eindeutige Zuordnung der Messergebnisse zu gewährleisten, wurden die Dehnmessstreifen (Detailansicht, siehe Bild 3.10, rechts) entsprechend der in Bild 3.10, links aufgezeigten Reihenfolge nummeriert.

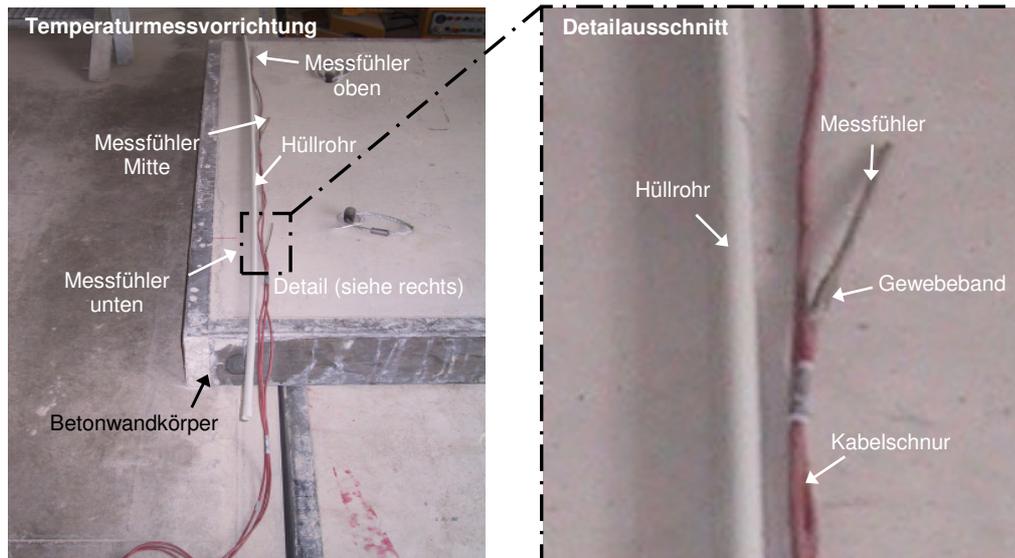
### Temperatur

Die Überwachung der Werkstofftemperatur erfolgte anhand des Einsatzes von Temperaturfühlern. Damit diese während der Versuchsdurchführung nicht beschädigt wurden, waren sie in ein Schutzrohr aus Kunststoff eingelassen. Die Registrierung des Temperaturverlaufs über die Schalungshöhe erfolgte an drei unterschiedlichen Messpunkten (siehe Bild 3.11).



**Bild 3.11:** Anordnung der drei Temperaturmessfühler mit Schutzrohr im Längsschnitt der Schalung; alle Abmessungen in [cm]

Um einen Bezug zu den aufgezeichneten Frischbetondrücken herzustellen, entsprach die vertikale Anordnung der einzelnen Messstellen dem der Druckmessdosen bzw. Dehnmessstreifen (siehe Bilder 3.9 und 3.10). Diese ist in Bild 3.11 dargestellt und zeigt, dass das Schutzrohr unmittelbar an der Schalungsseite 2 (an die Dehnmessstreifen) anschließt. Die Messfühler (Grenzabweichung  $\pm 0,15$  K) wurden jeweils an einer Kabelschnur angelötet. Anschließend wurden die einzelnen Kabelschnüre anhand von Gewebeband miteinander verklebt. Danach konnten sie in das Schutzrohr eingeführt werden, welches an den offenen Querschnitten ebenfalls mit Gewebeband verschlossen wurde (siehe auch Bild 3.12).



**Bild 3.12:** Messvorrichtung zur Bestimmung der Werkstofftemperatur (links) und der zugehörige Detailausschnitt von Messfühler, Kabelschnur und Hüllrohr (rechts)

Bild 3.12, links zeigt die Messvorrichtung zur Erfassung Werkstofftemperatur. In Bild 3.12, rechts ist ein Detailausschnitt des unteren Messpunkts dargestellt, welcher sich aus Messfühler mit Kabelschnur sowie dem Schutzrohr zusammensetzt.

### ***Rheologische Eigenschaften***

Die rheologischen Eigenschaften des eingebauten Betons wurden im Rahmen der Versuche mittels eines Rotationsrheometers registriert.

Aufgrund seiner Funktionsweise wurde das Widerstandsmoment aufgezeichnet, was zu einer relativen Fließgrenze  $\tau_0$  in der Einheit [Nmm] führte. Die relative Fließgrenze entspricht generell dem jeweiligen Spannungswert [94], [135], [202] (siehe auch Abschnitt 2.1.4.3 bzw. [23], [80] oder [217]). Dieser ergibt sich in Anlehnung an [23], [100], bzw. [202]

Generell erweist sich die Bestimmung absoluter rheologischer Spannungswerte als problematisch, siehe auch [110] bzw. [118]. Diese können für einen frischen zementgebundenen Werkstoff bei Verwendung verschiedener Geräte voneinander abweichen, siehe Abschnitt 2.1.4.3. In Abhängigkeit von der Rheometerbauart lässt sich jedoch grundsätzlich ein Verhältnis der

einzelnen Messwerte zueinander feststellen, was besonders bei einer Betrachtung des zeitlichen rheologischen Verhaltens von eminenter Wichtigkeit ist (im Hinblick auf den Frischbetondruck siehe auch [152]). Gemäß den aus der Literatursichtung gewonnenen Erkenntnissen ist derzeit noch kein Rheometer einschränkungslos in der Lage, rheologische Parameter zu bestimmen, siehe [36]. Dies wird durch die Bezeichnung der gerätespezifischen Messkonstanten als „scheinbare Fließgrenze“ verdeutlicht, welche dementsprechend im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erfasst wurde, siehe [36] und [94].

### **3.3.3 Versuchsdurchführung**

Der Frischbetondruck wurde sowohl während des Einbauvorgangs als auch nach dessen Beendigung aufgezeichnet. Vor der Schalungsbefüllung erfolgte die Kalibrierung der Druckmessdosen (siehe Abschnitt 3.3.3.5) sowie das Mischen der Betone bzw. Mörtel in einem Trommelmischer (siehe Abschnitt 3.3.3.3). Um im Zuge der Frischbetondruckuntersuchungen nicht auf eine einzige Höhe bei der verwendeten Schalung beschränkt zu sein, wurden weitere Einbauhöhen nach Beendigung des Einbaus von Mörtel und Beton simuliert (siehe Abschnitt 3.3.3.4).

Die nachfolgenden Abschnitte befassen sich mit der Umsetzung des Versuchsprogramms sowie den daraus abzuleitenden Überlegungen.

#### **3.3.3.1 Zusammensetzung der Mörtel und Betone**

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden zwei Zementmörtel und sechs Betone verwendet (siehe Tabelle 3.2). Nach Möglichkeit sollte die Zusammensetzung auf den gleichen Ausgangsstoffen beruhen.

##### *Ausgangsstoffe*

###### *Zement*

Als hydraulisches Bindemittel wurde u. a. ein Portlandzement CEM I 32,5 R (nach DIN EN 197-1 [61]) verwendet. Um den Einfluss der Erstarrungsgeschwindigkeit (bzw. der rheologischen Eigenschaften) und damit auch der Wärmeentwicklung auf den Frischbetondruck untersuchen zu können, wurde sowohl die Herstellung von Normalbeton als auch von selbstverdichtendem Beton modifiziert (siehe Abschnitt 3.3.1). Während der gewählte Hochofenzement CEM III/A 32,5 N (nach DIN EN 197-4 [66]) eine geringe Anfangsfestigkeit aufweist, führte der Einsatz eines CEM I 42,5 R (nach DIN 197-1 [58]) zu einer schnelleren Festigkeitsentwicklung.

###### *Flugasche*

Je nach der gegebenen Mischungszusammensetzung wurde bei einigen Proben Steinkohlenflugasche eingesetzt. Die verwendete Flugasche erfüllte sowohl die Anforderungen nach DIN 1045 [60] als auch nach DIN EN 450 [67].

### Fließmittel

Um die geforderten Eigenschaften sowie die gewünschte Verarbeitbarkeit zu erzielen, wurde ein Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylatether verwendet. Die Praxistauglichkeit des Fließmittels war durch seine Zulassung nach DIN EN 934-2 [62] gewährleistet.

### Gesteinskörnung

Die Gesteinskörnung setzte sich aus Quarzsand (Korngruppe 0/4 mm) und Quarzkies (Korngruppen 4/8 mm und 8/16 mm) zusammen.

### Mörtelzusammensetzung

In Tabelle 3.4 sind die zugehörigen Mischungszusammensetzungen aufgeführt. Die beiden Mörtel sollten eine unterschiedliche Verarbeit- bzw. Verdichtbarkeit besitzen.

**Tabelle 3.4:** Zusammensetzung der untersuchten Mörtel

Mörtel	Bindemittel [kg/m <sup>3</sup> ]		Gesteins- körnung [kg/m <sup>3</sup> ]	Zusatzmittel [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]
	Zement CEM I 32,5 R	Flugasche		Fließmittel	
ZM	343	–	1649	1,9	192
SVZM	350	245	1499	7,7	200

Infolgedessen entsprach die Verarbeitbarkeit des Mörtels mit einem w/z-Wert von 0,57 dem eines selbstverdichteten Zementmörtels (SVZM), die des anderen Mörtels (w/z = 0,69) der eines konventionellen Zementmörtels (ZM). Weitere Kriterien, wie z. B. der w/z-Wert oder das Gesteinskörnungsvolumen, waren für die Entwicklung der Mischungsrezepturen von untergeordnetem Interesse.

### Betonzusammensetzung

Eine einheitliche Vorgabe für die Rezepturentwicklung war die Beschränkung auf eine Sieblinie. Diese ist für die Normalbetone Bild A 3.6 sowie für die selbstverdichtenden Betone Bild A 3.7 zu entnehmen.

Eine Zusammenstellung der einzelnen Betonrezepturen ist in Tabelle 3.5 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 (NB-I, NB-II und NB-III)
- 2) Betone mit einer Flugaschekomponente als selbstverdichtender Beton (SVB-I, SVB-II und SVB-III)

**Tabelle 3.5:** Zusammensetzung der verwendeten Betone

Beton	Bindemittel [kg/m <sup>3</sup> ]			Gesteinskörnung [kg/m <sup>3</sup> ]			Fließmittel [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]
	Zement		Flug- asche	0/4 mm	4/8 mm	8/16 mm		
	Art	Anteil						
NB-I	CEM I 32,5 R	356	–	866	406	571	2	175
NB-II	CEM I 42,5 R	356	–	860	402	567	2,1	180
NB-III	CEM III/A 32,5 N	350	–	868	406	573	1,2	175
SVB-I	CEM I 32,5 R	350	200	862	338	417	4,2	175
SVB-II	CEM I 42,5 R	350	200	853	343	415	4,2	177
SVB-III	CEM III/A 32,5 R	240	310	830	326	402	4,7	185

### 3.3.3.2 Eigenschaften der Mörtel und Betone

Für den Werkstoff Beton ist hinsichtlich seiner Materialeigenschaften grundsätzlich zwischen den Frischbetoneigenschaften sowie den Festbetoneigenschaften zu unterscheiden. Für die darüber hinaus zu untersuchenden Baustoffe waren dementsprechend die Eigenschaften des Mörtels sowie des Festmörtels zu prüfen. In Bezug auf die Werkstoffeigenschaften waren in erster Linie das rheologische Verhalten und damit auch die Verarbeitbarkeit von Interesse. Besonders im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse wurden daher auch die Eigenschaften der Zementmörtel nach den Regelwerken der ihnen entsprechenden Betone bestimmt.

Die Ermittlung der Eigenschaften des normalen Mörtels (ZM) und der Normalbetone (NB-I, NB-II, NB-III) wurde nach DIN 1048 [63] durchgeführt. Die dabei bestimmten Materialkennwerte waren:

- Konsistenzmaß
- Luftporengehalt
- Rohdichte

Nach den Vorgaben der DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ [48] wurden die Eigenschaften von selbstverdichtendem Mörtel (SVZM) und den selbstverdichtenden Betonen (SVB-I, SVB-II und SVB-III) bestimmt. Dabei wurden ebenfalls die oben bereits aufgeführten Kennwerte ermittelt.

Die Prüfung der Materialkennwerte von den Festmörteln (ZM und SVZM) sowie den Betonen (NB-I, NB-II, NB-III, SVB-I, SVB-II und SVB-III) erfolgte gemäß DIN 1048 [64]. 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.

**Eigenschaften von normalem Mörtel und Beton**

In Tabelle 3.6 sind sowohl die Kennwerte des einfachen Mörtels als auch die der Normalbetone zusammengestellt. Hinsichtlich des Betons NB-I handelt es sich dabei um die aus zwei Einzelwerten gebildeten Mittelwerte. Eine Zusammenstellung der zugehörigen Einzelwerte ist Tabelle A 3.1 zu entnehmen. Aus Tabelle 3.6 ist zu erkennen, dass die Druckfestigkeiten der Betone nicht weit voneinander abwichen und diese als normalfeste Betone (NB-I, NB-II und NB-III) ausgebildet waren. Aufgrund der unterschiedlichen Korngruppenanteile waren die Druckfestigkeiten der Betone gegenüber dem Mörtel (ZM) deutlich erhöht. Der Mörtel zeichnete sich gegenüber den drei Normalbetonen nicht nur durch einen größeren w/z-Wert (0,56), sondern auch durch einen höheren Luftporengehalt (7,5 %) aus. Außerdem waren sowohl die Rohdichte (2274 kg/m<sup>3</sup>) als auch das Ausbreitmaß (44 cm) des Mörtels gegenüber den Werten der Normalbetone leicht reduziert.

**Tabelle 3.6:** Kennwerte des verwendeten Mörtels und Normalbetons (für den Beton NB-I aus jeweils zwei Einzelwerten gebildete Mittelwerte)

Mörtel bzw. Beton	Frischmörtel- bzw. -betonkennwerte				Festmörtel- bzw. -betonkennwerte
	w/z-Wert	Rohdichte ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	Luftporen LP [Vol.-%]	Ausbreitmaß a [cm]	Druckfestigkeit β <sub>w28</sub> an Würfeln [N/mm <sup>2</sup> ]
ZM	0,56	2274	7,5	44	21
NB-I	0,5	2328	1	56	55
NB-II	0,51	2323	1,9	51	58
NB-III	0,44	2308	1,9	52	51

Da aus der Gruppe der Materialkennwerte nur der Einfluss des Ausbreitmaßes auf den Frischbetondruck untersucht worden ist, wirkte sich dies nicht weiter auf die Versuchsdurchführung aus. Die Größen der übrigen Materialkennwerte aller drei Normalbetone befanden sich in etwa in dem gleichen Bereich.

**Eigenschaften von selbstverdichtendem Mörtel und Beton**

Eine Übersicht der Materialkennwerte von selbstverdichtendem Mörtel und Beton ist in Tabelle 3.7 zu finden.

**Tabelle 3.7:** Kennwerte des verwendeten selbstverdichtenden Mörtels und Betons (für den Beton SVB-I aus jeweils fünf Einzelwerten gebildete Mittelwerte)

Mörtel bzw. Beton	Frischmörtel- bzw. -betonkennwerte					Festmörtel- bzw. -betonkennwerte	
	w/z <sub>eq</sub> - Wert	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Luftporen LP [Vol.-%]	Setzfließ- maß mit/ohne Blockier- ring [cm]		Auslaufzeit Trichter $t_{tr}$ [s]	Druckfestigkeit $\beta_{w28}$ an Würfeln [N/mm <sup>2</sup> ]
				ohne sm	mit sm <sub>b</sub>		
SVZM	0,45	2301	5,2	62	56	3,6	53
SVB-I	0,37	2306	2,2	73	73	8,1	65
SVB-II	0,36	2305	3,4	70	68	9,1	69
SVB-III	0,45	2244	3	71	71	7,4	39

In Bezug auf den Beton SVB-I sind in Tabelle 3.7 die aus fünf Einzelwerten gebildeten Mittelwerte dargestellt. Die zugehörigen Einzelwerte sind in Tabelle A 3.2 zusammengefasst.

Bei einem äquivalenten Wasserzementwert  $w/z_{eq}$  von 0,34 betrug die Druckfestigkeit des selbstverdichtenden Mörtels (SVZM) 53,5 N/mm<sup>2</sup>. Dies entsprach in [55] einer Mörtelgruppe MG IIIa. Der Luftporengehalt war gegenüber den Werten der selbstverdichtenden Betone etwas erhöht. Die Werte für die Rohdichte und das Setzfließmaß entsprachen in etwa den Prüfergebnissen der selbstverdichtenden Betone. In [60] ließen sich die selbstverdichtenden Betone mit einem äquivalenten Wasserzementwert von 0,32 (SVB-I und SVB-II) aufgrund ihrer Betondruckfestigkeiten von über 65 N/mm<sup>2</sup> als hochfeste Betone einordnen. Aus den o. g. Gründen waren die unterschiedlichen Materialkennwerte für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen unerheblich.

### 3.3.3.3 Herstellung und Einbau der Mörtel und Betone

Um ein Anhaften des eingebauten Materials an der Schalhaut zu verhindern, wurde auf diese ein Universalschalöl aufgetragen. Anschließend wurden die Schalungsstöße mit Silikon abgedichtet und die Messwertaufnehmer nach der ordnungsgemäßen Verankerung justiert.

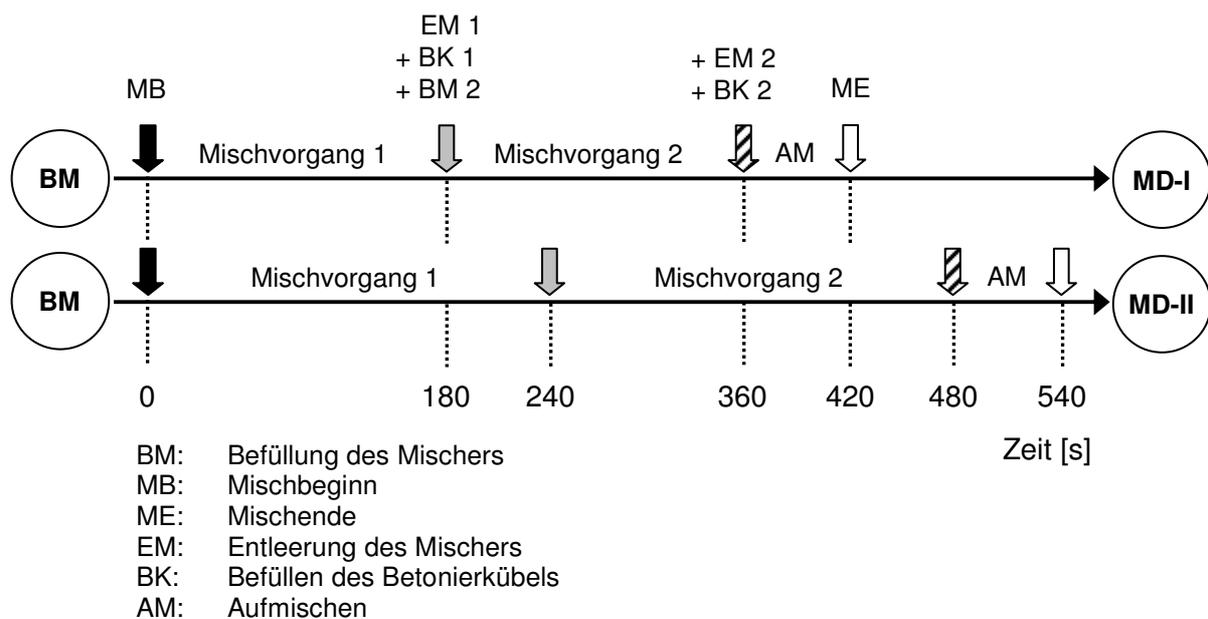
#### *Herstellung*

Die unterschiedlichen Mischungszusammensetzungen erforderten jeweils die Einhaltung spezifischer Mischzeiten.

Wie aus Bild 3.14 zu erkennen ist, konnte die Herstellung der untersuchten Betone bzw. Mörtel in zwei Mischkategorien eingeteilt werden:

- Gesamtmischdauer I (MD-I) von sieben Minuten; erforderlich bei der Herstellung von NB-I, NB-II, SVB-I und SVB-II
- Gesamtmischdauer II (MD-II) von neun Minuten; erforderlich bei der Herstellung von ZM, SVZM, NB-III und SVB-III

Bei beiden Mischkategorien MD-I und MD-II begann die Herstellung mit dem Einfüllen von Bindemittel und Gesteinskörnung in einen Trommelmischer. Im Anschluss an eine 40 Sekunden lange Vormischung dieser Mischkomponenten erfolgte die Zuführung der flüssigen Bestandteile Anmachwasser und Verflüssiger. Die infolge des gegebenen Schalungsvolumens benötigte Einbaumenge konnte durch einmaliges Befüllen des Mixers nicht hergestellt werden. Daher musste der Mischvorgang in zwei getrennte Chargen aufgeteilt werden. Die beiden o. g. Mischkategorien der jeweiligen Chargen unterschieden sich in der Mischdauer.



**Bild 3.14:** Herstellung der untersuchten Zementmörtel und Betone für die Mischkategorien MD-I (oben) und MD-II (unten)

In Bild 3.14 (siehe auch [3]) ist zu sehen, dass die Gesamtmischzeit des Mischvorgangs 1 für die Mischkategorie MD-I (Bild 3.14, oben) ca. drei Minuten, für die Mischkategorie MD-II (Bild 3.14, unten) hingegen ca. vier Minuten andauerte. Danach erfolgte die Entleerung der jeweils ersten Charge in den Kübel. Während des Befüll- und Mischvorgangs für die zweiten Chargen wurden zur Qualitätskontrolle der ersten Mischungen das Ausbreitmaß (für Normalmörtel und -beton), das Setzfließmaß (für selbstverdichtenden Mörtel und Beton) sowie der Luftporengehalt gemessen. Der Mischvorgang 2 der beiden Kategorien MD-I und MD-II verlief jeweils nach der gleichen Vorgehensweise wie der Mischvorgang 1. Demzufolge be-

lief sich die gesamte Mischdauer auf sechs Minuten (MD-I) bzw. acht Minuten (MD-II). Nach Entleeren der Charge 2 in den gleichen Kübel wie Charge 1, wurde der Kübelinhalt zur Homogenisierung noch einmal 60 Sekunden durchmischt.

### ***Einbau***

Um sowohl einen qualitätssicheren Einbau garantieren und die Einbaugeschwindigkeit angemessen kontrollieren zu können, wurde der Beton mittels einer Betonrutsche eingebracht (siehe Abschnitt 3.3.2.2). Diese wurde mit dem Betonkübel befüllt. Während des Einbaus von Normalmörtel und -beton wurde das Material in Lagen von 50 Zentimetern mit einem Innenrüttler verdichtet. Nach der vollständigen Befüllung der Schalung (unter Berücksichtigung des für den Simulationsvorgang notwendigen oberen Freiraums) wurde eine Bohle auf die freie Mörtel- bzw. Betonoberfläche aufgelegt. Darauf wurde die Simulationsvorrichtung aufgebracht und (in Abhängigkeit von der Einbaugeschwindigkeit) mit dem Simulationsvorgang begonnen (siehe Abschnitt 3.3.3.4).

Der eingebaute Beton wurde 24 Stunden in der Schalung belassen. Anschließend wurde mit dem Ausschalprozess begonnen.

#### **3.3.3.4 Simulation von über die Schalungshöhe hinausgehenden Einbauhöhen**

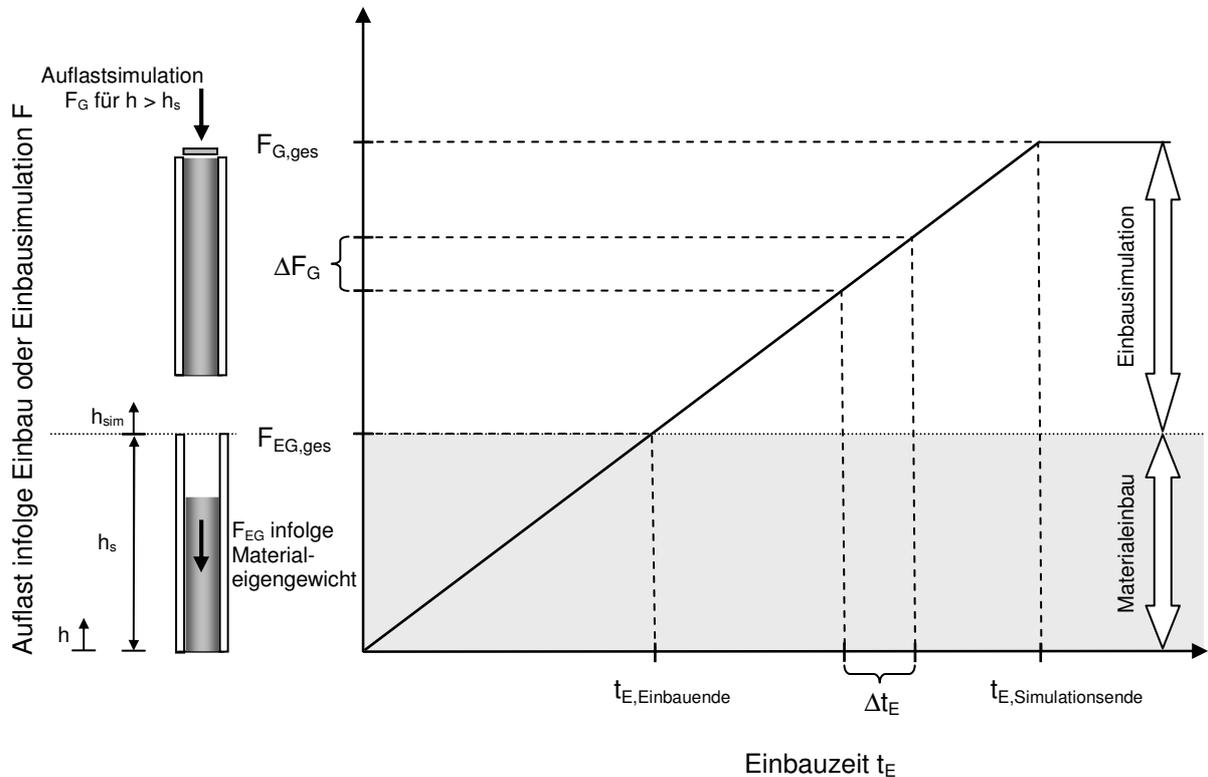
Aus den Angaben zu der Mischungsrezeptur bzw. den Rohdichten sowie der Schalungsgeometrie wurden diejenigen Auflasten rechnerisch ermittelt, welche in Abhängigkeit von der simulierten Einbauhöhe auf das schon vollständig in die Schalung eingebaute Material einwirken. Die den einzelnen Simulationshöhen zugeordneten Belastungen konnten – unter Abzug des Eigengewichts von Bohle und Stahlkonstruktion – daraufhin in Abhängigkeit von der untersuchten Einbaugeschwindigkeit auf den Schalungsinhalt aufgebracht werden. In der folgenden Reihenfolge wurde die Einbauhöhen-simulation von Mörtel und Beton umgesetzt:

- 1) Einbau von Mörtel bzw. Beton in die Schalung
- 2) (nach vollständiger Schalungsbefüllung) Auflegen der Bohle auf die Oberfläche des Schalungsinhalts
- 3) (in Abhängigkeit von der Einbaugeschwindigkeit) Aufstellen der Stahlkonstruktion auf der Bohle
- 4) Aufbringen der Simulationsauflasten mit der Hydraulikpresseneinheit auf die Stahlkonstruktion unter Einhaltung des durch die Einbaugeschwindigkeit vorgegebenen Zeitrahmens

Eine graphische Darstellung der oben vorgestellten Vorgehensweisen ist dem nachfolgenden Bild 3.15 zu entnehmen.

Dabei ist zu sehen, dass während des Einbaus der entsprechenden Mörtel oder Betone das Eigengewicht als vertikale Belastung wirkt. In Abhängigkeit von der Einbaugeschwindigkeit wurde nach der vollständigen Schalungsbefüllung zum Zeitpunkt  $t_{E, Einbauende}$  durch die Hydraulikpresseneinheit eine externe Simulationsbelastung  $F_G$  (entspricht der in Bild 3.2 darge-

stellten Kraft  $F$ ) auf den Schalungsinhalt aufgebracht. Die Vorgaben der Auflasterhöhung  $\Delta F_G$  pro Zeiteinheit  $\Delta t_E$  wurden unter Berücksichtigung der Werkstoffrohdichte für jeweils eine Schalungshöhe  $h_s = 0,5$  m ermittelt. Dieser Vorgang wurde in der Regel nach Erreichen einer simulierten Schalungshöhe von  $h_{sim}$  bzw.  $h_E = 6,5$  m beendet und die bis dahin aufgebrachte Simulationslast von diesem Zeitpunkt an konstant gehalten.



**Bild 3.15:** Darstellung des Einbauprinzips der verwendeten Mörtel und Betone in die Schalung und der anschließenden Simulation zusätzlicher Einbauhöhen

Durch die Anwendung des eigens neu entwickelten Belastungskonzepts (vgl. Abschnitt 3.3.2.1) konnte bei den Versuchen ein konstant stabiler Lasteintrag während des simulierten Einbauvorgangs sowie nach dessen Beendigung gewährleistet werden. Die Auflast, die bei diesem Vorgang dem Betoneigengewicht innerhalb eines betrachteten Volumenelements  $F_{eigen} = \gamma \cdot h \cdot b \cdot d$  entspricht, betrug dabei je 0,5 m Einbauhöhe (in Abhängigkeit von der Rohdichte) ca. 5,3 kN für die Normalbetone bzw. die selbstverdichtenden Betone. Ab dem Erreichen der maximal simulierten Einbauhöhe von 6,5 m ergab dies (bei Abzug der effektiven Schalungshöhe, siehe Abschnitt 3.3.2.1) in der Summe eine Dauerauflast von ca. 53,2 kN für Normalbeton bzw. ca. 53,8 kN für selbstverdichtenden Beton. Entsprechend betragen die Auflasten je 0,5 m Einbauhöhe für den Normalmörtel ca. 51,6 kN (d. h. ca. 5,2 kN je 0,5 m Einbauhöhe) sowie ca. 52,2 kN (d. h. ca. 5,2 kN je 0,5 m Einbauhöhe) für den selbstverdichtenden Mörtel.

### 3.3.3.5 Kalibrierung der Druckmessdosen

Zur Berücksichtigung eventueller Messungenauigkeiten wurden die Druckmessdosen vor der Versuchsdurchführung u. a. anhand der Ermittlung ihrer bezogenen hydrostatischen Druckwerte kalibriert. Dabei betragen die Abweichungen zwischen rechnerisch ermitteltem hydrostatischen und tatsächlichem Druck in der Regel ca.  $\pm 0,1 \%$ . Obwohl die Gegenüberstellung von rechnerischen und tatsächlichen Drücken eine hohe Übereinstimmung ergab, wurden die jeweiligen prozentualen Abweichungen bei der Auswertung der Messergebnisse berücksichtigt. Somit konnte von einer Nachjustierung abgesehen werden.

Zur Überprüfung der Zeitkonstanz der Druckmessdosen wurde ein Wasser-Vorversuch über den Untersuchungszeitraum (24 Stunden) durchgeführt.

## 3.4 Frischbetondruck von selbstverdichtendem Beton in einer Rahmenschalung

### 3.4.1 Allgemeines

In dem vorangegangenen Abschnitt 3.3 wurden die experimentellen Untersuchungen an einem Modellschalungssystem beschrieben. Darüber hinaus wurden weitere Informationen für eine Verifizierung der dabei gewonnenen Erkenntnisse und eine Erarbeitung von Empfehlungen für die baupraktische Anwendung benötigt. Die Aufstellung eines gesonderten Untersuchungsprogramms ermöglichte diese hinsichtlich der einbautechnischen und der stoffphysikalischen Einflüsse. Dies gilt insbesondere für den Frischbetondruckverlauf über die gesamte Schalungs- bzw. Einbauhöhe sowie für eine Gegenüberstellung mit den nach Abschnitt 3.3 ermittelten maximalen relativen hydrostatischen Schalungsdrücken (siehe Abschnitt 2.4.1).

Von aktuellem Interesse ist aufgrund der Entwicklungen in der Betontechnologie derzeit besonders die Untersuchung des Frischbetondrucks selbstverdichtender Betone.

### 3.4.2 Versuchsprogramm

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen wurden acht Versuche mit einer Rahmenschalung mit den Abmessungen  $h \times b \times d = 3,00 \text{ m} \times 1,25 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$  durchgeführt. Das Programm basierte auf der Grundlage der in dem vorigen Abschnitt 3.3 beschriebenen Versuche.

Mit Hilfe des experimentellen Untersuchungsprogramms konnten die nachfolgenden Einflüsse auf den Frischbetondruck analysiert werden:

- Einbaugeschwindigkeit
- Konsistenz
- Schalungsgeometrie

Die Tabelle 3.8 gibt einen zusammenfassenden Überblick über das experimentelle Versuchsprogramm mit dem selbstverdichtendem Beton SVB-IV (CEM I 32,5 R). Darin sind Angaben

über die verwendete Schalung, deren Abmessungen, die ermittelten Messgrößen sowie die untersuchten Einfluss- und Prüfparameter dargestellt.

**Tabelle 3.8:** Übersicht über das Versuchsprogramm zum Frischbetondruck von selbstverdichtendem Beton in einer Rahmenschalung

Versuch	Frischbetondruck von selbstverdichtendem Beton	
Schalungsart	Rahmenschalung	
Schalungsabmessungen h x b x d [m]	3,00 x 1,25 x 0,25	
Messgrößen	$\sigma_h$	
mögliche Einflussparameter	h, b, sm	
Beton	SVB-IV	
Einbaugeschwindigkeit [m/h]	$v_1 = 10$ $v_2 = 15$ $v_3 = 20$ $v_4 = 25$ $v_5 = 30$	$v_6 = 40$ $v_7 = 45$ $v_8 = 55$

Bei den Versuchen wurde aufgrund der vergleichsweise hohen Schalungssteifigkeit auf die Erfassung der Schalungsverformung verzichtet.

Im Rahmen der Umsetzung der experimentellen Untersuchungen der oben aufgeführten Einflüsse wurden neben dem Frischbetondruck das Setzfließmaß sm ermittelt. Die zu den einzelnen Versuchen zugehörigen Einbaugeschwindigkeiten waren 10 m/h, 15 m/h, 20 m/h, 25 m/h, 30 m/h, 40 m/h, 45 m/h und 55 m/h.

Des Weiteren wurde die Reproduzierbarkeit der experimentellen Untersuchungen mittels eines zusätzlichen Versuchs ( $v = 30$  m/h) verifiziert, siehe Abschnitt 4.2.

### 3.4.3 Versuchsaufbau und Messtechnik

#### 3.4.3.1 Rahmenschalung

Die Voraussetzung für eine wirklichkeitsnahe Wiedergabe des Frischbetondrucks war, dass die Ausführung der experimentellen Untersuchungen unter baupraktischen Bedingungen auch ohne eine weitere Simulation verschiedener Einbauhöhen erfolgen konnte. Auf dieser Grundlage waren die nachfolgenden Kriterien für die Auswahl der eingesetzten Schalung von Bedeutung:



Bild 3.17 zeigt die verwendete Rahmenschalung in der Vorder- (links) bzw. Seitenansicht (rechts).



**Bild 3.17:** Vorderansicht (links) und Seitenansicht (rechts) der verwendeten Rahmenschalung

### 3.4.3.2 Messeinrichtung

Für eine Verifizierung der in Kapitel 4 darzustellenden Ergebnisse in Bezug auf ihre baupraktische Verwendbarkeit waren vorwiegend die maximalen Frischbetondruckwerte im Zusammenhang mit der Konsistenz von Interesse. Hierfür wurde der Messparameter Frischbetondruck aufgezeichnet.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen dieses Kapitels wurden keine weiteren als die in Abschnitt 3.3.2.3 beschriebenen Messapparaturen hinzugezogen. Dementsprechend wurde die Messeinheit von einem Messverstärker (Vielstellenmessgerät) gebildet.

Die Registrierung des Frischbetondrucks erfolgte mittels Druckmessdosen (siehe Abschnitt 3.3.2.3 bzw. Bild 3.16).

Um die eingehende Erfassung des vertikalen Frischbetondruckverlaufs zu ermöglichen, wurden – wie Bild 3.16 zeigt – die beiden Druckmessdosen DMD 1 und DMD 2 vertikal übereinander befestigt.

### 3.4.4 Versuchsdurchführung

Der Frischbetondruck von selbstverdichtendem Beton wurde zum Zeitpunkt der vollständigen Befüllung der Rahmenschalung erfasst (siehe Abschnitt 3.3.3). Die Herstellung erfolgte ebenfalls in einem Trommelmischer (siehe Abschnitt 3.4.4.3).

#### 3.4.4.1 Betonzusammensetzung

Auf Basis der Sieblinie des Abschnitts 3.3 (siehe Bild A 3.7) erfolgte die Untersuchung des Frischbetondrucks an einem selbstverdichtenden Beton SVB-IV (siehe Tabelle 3.8). Die Aus-

gangsstoffe der entwickelten Mischungszusammensetzung entsprachen den in Abschnitt 3.3.3.1 angegebenen Komponenten.

**Tabelle 3.9:** Zusammensetzung des verwendeten selbstverdichtenden Betons

Beton	Bindemittel [kg/m <sup>3</sup> ]		Gesteinskörnung [kg/m <sup>3</sup> ]			Fließmittel [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]
	Zement	Flugasche	0/4 mm	4/8 mm	8/16 mm		
SVB-IV	350	200	838	412	367	6	175

Tabelle 3.9 zeigt die Betonrezeptur (siehe Abschnitt 3.2). Sie orientiert sich an den Vorgaben für den in Abschnitt 3.3.3.1 vorgestellten SVB-I. Infolgedessen wurde als Bindemittel bei der Herstellung des selbstverdichtenden Betons SVB-IV ein CEM I 32,5 R verwendet. Somit ergab sich eine normale Festigkeitsentwicklung.

### 3.4.4.2 Betoneigenschaften

Tabelle 3.10 zeigt eine Zusammenstellung der (aus acht Einzelwerten bestimmten) mittleren Frischbeton- und Festbetonparameter (siehe Abschnitt 3.3.3.2). Die entsprechenden Einzelwerte sind in Tabelle A 3.3 zusammengefasst.

**Tabelle 3.10:** Kennwerte des untersuchten selbstverdichtenden Betons (aus neun Einzelwerten gebildete Mittelwerte)

Mörtel/ Beton	Frischkennwerte						Festkennwerte
	w/z <sub>eq</sub> - Wert	Rohdichte ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	Luftporen LP [Vol.-%]	Setzfließ- maß mit/ohne Blockier- ring [cm]		Auslaufzeit Trichter t <sub>tr</sub> [s]	Druckfestigkeit β <sub>w28</sub> an Würfeln [N/mm <sup>2</sup> ]
				ohne s <sub>m</sub>	mit s <sub>m<sub>b</sub></sub>		
SVB-IV	0,32	2285	2,7	74	73	8,2	67

Der Beton erreichte bei einem äquivalenten Wasserzementwert von 0,32 eine mittlere Druckfestigkeit von 67 N/mm<sup>2</sup> und konnte als (normal- bzw.) hochfest klassifiziert werden (siehe Tabelle A 3.2). Die beiden Setzfließmaße (mit und ohne Blockierring) erfüllten nach [48] die Vorgaben für einen selbstverdichtenden Beton. Der Luftporengehalt des Betons betrug 2,7 %, seine Dichte 2285 kg/m<sup>3</sup>.

### **3.4.4.3 Betonherstellung und -einbau**

Der Vorgang der Betonherstellung entsprach dem bereits in Abschnitt 3.3.3.3 vorgestellten Ablauf für die Mischkategorie MD-I. Jedoch wurde der Einbau des selbstverdichtenden Betons nicht mit der Betonierutsche durchgeführt, sondern konnte aufgrund der Platzierung der Schalung (in einer Versuchsrinne) direkt mit dem Kübel ausgeführt werden.

## 4 Ergebnisse und Diskussion der experimentellen Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen zum Frischbetondruck wurden in Abschnitt 3.3 (Modellschalungssystem) bzw. 3.4 (Rahmenschalung) vorgestellt. Sowohl die Versuchsergebnisse als auch die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden in diesem Kapitel 4 dargelegt. Dabei werden die sich aus den jeweiligen Ergebnisanalysen ergebenden Beziehungen zwischen den Untersuchungsparametern und dem Frischbetondruck eingehend erläutert.

### 4.1 Experimentelle Frischbetondruckuntersuchungen in einem Modellschalungssystem

#### 4.1.1 Allgemeines

Im Zuge der nachstehenden Parameterstudie werden diverse Einflüsse auf den Frischbetondruck diskutiert.

Eine ausführliche Ergebnis- bzw. Datendokumentation einzelner Frischbetondruckmesswerte ist ab einer Einbauhöhe von 0,5 m in 0,5-m-Schritten in den Tabellen A 4.1 bis A 4.11 zu finden. Daraus ist ersichtlich, dass die Streuungen des Frischbetondrucks in einer bestimmten Messhöhe in der Regel keine relevante Größenordnung aufweisen (siehe auch Abschnitt 4.1.6).

Um die Reproduzierbarkeit der mit dem Modellschalungssystem durchgeführten Experimente zu überprüfen, wurde unter gleichen Rahmenbedingungen ein zusätzlicher (zweiter) Versuch mit dem selbstverdichtenden Beton SVB-II ( $v = 7$  m/h) durchgeführt. Die Ergebnisse (siehe Tabellen A 4.10 bzw. A 4.12) zeigen, dass die Größenordnungen der ermittelten Frischbetondrücke bei einer bestimmten Einbaugeschwindigkeit einander entsprechen.

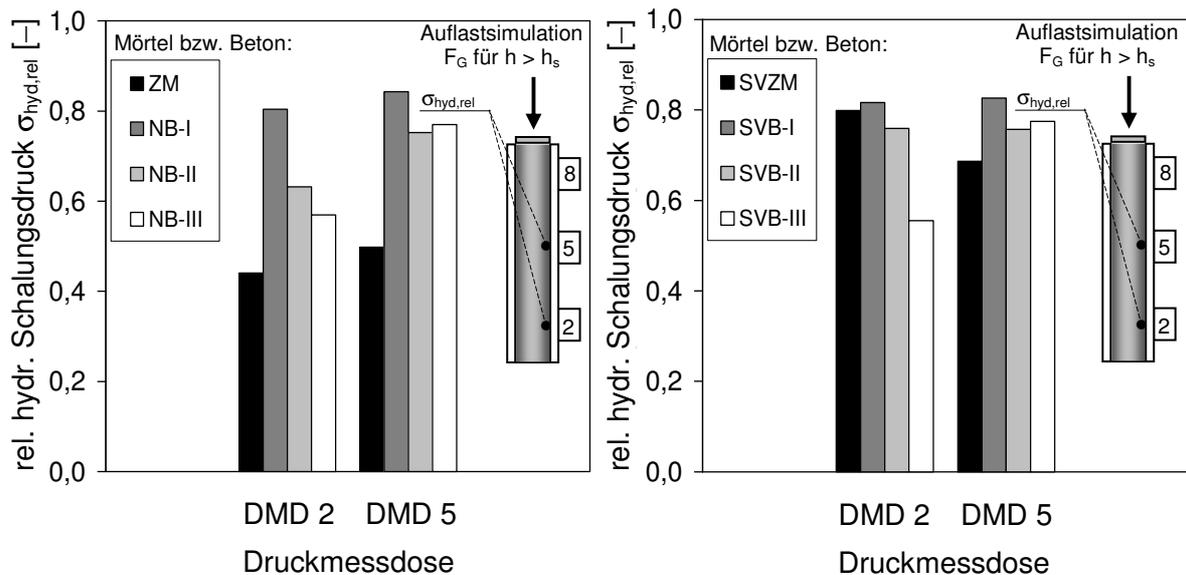
#### 4.1.2 Einfluss der Mischungszusammensetzung

Bei der Durchführung der Versuche zur Überprüfung des Einflusses der Mischungszusammensetzung war zwischen frischen Mörteln (siehe Tabelle A 4.13) bzw. Betonen mit normalen sowie selbstverdichtenden Eigenschaften zu unterscheiden. Die Experimente erfolgten mit einer Einbaugeschwindigkeit von  $v = 14$  m/h (ZM, NB-I, NB-II und NB-III) bzw. 7 m/h (SVZM, SVB-I, SVB-II und SVB-III).

Die dabei erzielten Maximaldrücke traten bei einer (simulierten) Einbauhöhe  $h_E = 6,5$  m (effektive Höhe der Trägerschalung  $h_s = 1,50$  m, siehe Abschnitt 3.3.2.1 bzw. Bild 3.5) an den Messhöhen 0,14 m (DMD 1, 2 und 3) bzw. 0,75 m (DMD 4, 5 und 6) auf. Bild 4.1 zeigt eine Zusammenstellung der zugehörigen Ergebnisse. In der o. g. Abbildung sind die jeweiligen  $\sigma_{\text{hyd,rel}}$ -Werte (siehe Abschnitt 2.4.1) exemplarisch an den Druckmessdosen DMD 2 bzw. DMD 5 dargestellt.

Demnach trat bei der Gruppe der konventionellen Mörtel und Betone (Bild 4.1, links) der höchste relative hydrostatische Schalungsdruck bei Einbau des Betons NB-I an einer Messhöhe von 0,75 m ( $\sigma_{\text{hyd,rel}} = 0,80$ , exemplarisch an DMD 5) auf. Die  $\sigma_{\text{hyd,rel}}$ -Werte der Betone NB-II und NB-III der Messhöhe 0,75 m (am Beispiel von DMD 5) betragen 0,75 bzw. 0,77. Der Mörtel ZM wies mit einem relativen hydrostatischen Schalungsdruck von 0,50 an derselben Messhöhe den vergleichsweise geringsten Wert auf.

In der Kategorie selbstverdichtender Mörtel und Betone zeichnete sich der Beton SVB-I mit dem maximalen  $\sigma_{\text{hyd,rel}}$ -Wert von 0,82 an der Messhöhe 0,75 m (exemplarisch an DMD 5) aus. Im Gegensatz zu konventionellem Mörtel ergab sich für den selbstverdichtenden Mörtel SVZM ein  $\sigma_{\text{hyd,rel}}$ -Wert von 0,80 (Messhöhe 0,14 m, exemplarisch an DMD 2). Dieser war gegenüber dem SVB-I lediglich um 3 % vermindert und folglich geringfügig reduziert. Während an einer Messhöhe von 0,14 m (am Beispiel von DMD 2) der Beton SVB-II noch einen relativen hydrostatischen Schalungsdruck von 0,76 aufwies, verzeichnete dieselbe Messdose für SVB-III den verhältnismäßig geringsten Wert mit  $\sigma_{\text{hyd,rel}} = 0,55$ . Hingegen ergab sich für die beiden Betone auf einer Messhöhe von 0,75 m (am Beispiel von DMD 5) ein  $\sigma_{\text{hyd,rel}}$ -Wert von 0,76 (SVB-II) bzw. 0,78 (SVB-III).



**Bild 4.1:** Einfluss der Mischungszusammensetzung auf den maximalen relativen hydrostatischen Schalungsdruck der frischen Mörtel und Betone ZM, NB-I, NB-II und NB-III ( $v = 14$  m/h, links) bzw. SVZM, SVB-I, SVB-II und SVB III ( $v = 7$  m/h, rechts) bei einer Einbauhöhe von 6,5 m (simuliert) an den Messpunkten DMD 2 und DMD 5

Die relativen hydrostatischen Maximaldrücke waren wider Erwarten nicht auf einer DMD-Höhe, sondern vielmehr auf zwei unterschiedlichen Messhöhen (d. h. entweder an DMD 2 oder DMD 5, siehe Bild 4.1) registriert worden. Dies ist in der charakteristischen vertikalen Frischbetondruckverteilung begründet. Deren genaue Analyse und Diskussion über die Schalungshöhe wird in Abschnitt 4.1.6 vorgenommen.

Nicht nur die Frischbetondruckversuche mit Normalbetonen, sondern auch die mit selbstverdichtenden Betonen ergaben um ca. 20 % (NB-I) bis 25 % (NB-II) bzw. ca. 18 % (SVB-I) bis 24 % (SVB-II) geringere Werte als nach den Bemessungsansätzen der DIN 18218 (für Normalbetone) [51] resp. der DAfStb-Richtlinie (für selbstverdichtende Betone) [48]. Diese fordern für die vorgestellten Fälle jeweils Bemessungswerte von 100 % des relativen hydrostatischen Schalungsdrucks. Insbesondere für selbstverdichtenden Beton sind die Bemessungsvorgaben z. T. weitaus höher als dies den Experimenten dieser Arbeit entspricht. Darüber hinaus müssten entsprechend der beiden o. g. Bemessungsvorschriften die untersuchten Normalbetone sowie die selbstverdichtenden Betone in etwa die gleichen effektiven Frischbetondrücke hervorrufen.

Für die beiden Mörtel ZM und SVZM erübrigen sich entsprechende Vergleiche, da derartige Bemessungsmodelle derzeit nicht existieren.

Die hier dargestellten Erkenntnisse (insbesondere die Diskrepanz zwischen Mess- und Bemessungswerten) bestätigen die bereits in Abschnitt 2.5 aufgezeigte Problematik hinsichtlich der allgemeingültigen Anwendbarkeit der vorhandenen Bemessungsmodelle. Dafür sind vor allem die in der Regel nur für bestimmte Betone unter spezifischen Randbedingungen durchgeführten Versuche verantwortlich (siehe Abschnitt 2.4). Diese führen zu einer Beschränkung der praxisnahen Anwendbarkeit bestehender Bemessungsmodelle (siehe Abschnitt 2.5). Im Hinblick auf die rheologischen Eigenschaften wird für Normalbeton in DIN 18218 [51] die Verarbeitbarkeit (und damit indirekt die Mischungszusammensetzung, siehe Abschnitt 2.1.4.2) in Form der einzelnen Konsistenzklassen zur Frischbetondruckermittlung berücksichtigt. Hingegen erfahren die rheologischen Eigenschaften selbstverdichtender Betone bei der Anwendung der DAfStb-Richtlinie [48] keinerlei Beachtung.

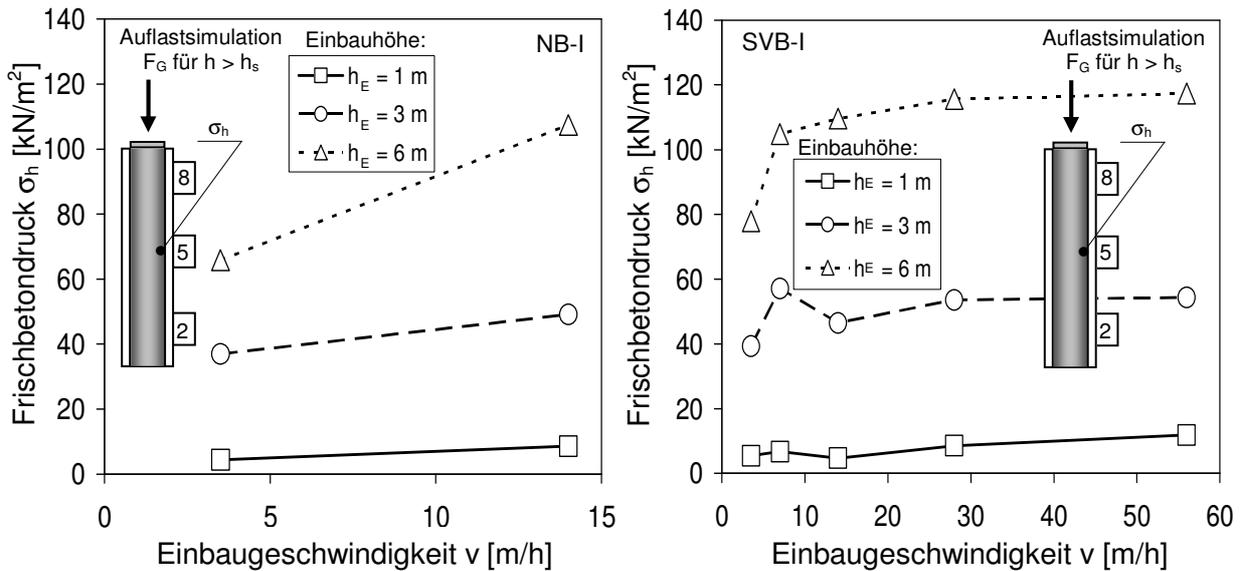
Zwar wiesen aus den gegebenen Gründen die Versuchsergebnisse Diskrepanzen zu den o. g. Bemessungsvorschriften auf, jedoch zeigten sie eine gute Übereinstimmung mit den in [132] zusammengefassten Größenordnungen des relativen hydrostatischen Schalungsdrucks normaler und selbstverdichtender Betone. Dabei wurde von Abweichungen von bis zu 55 % vom hydrostatischen Schalungsdruckwert berichtet. Einzig der Wert des Mörtels ZM erscheint unerwartet gering. Aufgrund seiner hohen Fließfähigkeit wurde bei seinem Einbau auf eine gesonderte Verdichtung verzichtet, was mit Sicherheit zu dem aufgetretenen  $\sigma_{\text{hyd,rel}}$ -Wert beigetragen hatte. Ansonsten sind hauptsächlich die in [132] zusammengestellten Ursachen für die unterschiedlichen relativen hydrostatischen Schalungsdrücke verantwortlich.

Danach führt eine Größtkornerhöhung zu einem Anstieg der inneren Reibung und damit einer Verminderung der Fließfähigkeit [132]. Dies erklärt den reduzierten relativen hydrostatischen Schalungsdruck der untersuchten Mörtel (ZM bzw. SVZM) im Vergleich zu den ihnen entsprechenden Betonen gleicher Zementart (NB-I bzw. SVB-I). Bei einer Gegenüberstellung selbstverdichtender Betone gleicher Zementgehalte tritt bei Einsatz eines konventionellen Zements CEM I 32,5 R in der Regel der vergleichsweise höchste Frischbetondruck auf. Die Frischbetondrücke bei einer Verwendung von Zementen CEM I 42,5 R mit relativ beschleunigten Frühfestigkeiten sowie Zementen CEM III sind meist geringer. Dies liegt an der Erhö-

hung der Kontaktpunkte und intergranulärer Kräfte, die sich bei erhöhter Partikelfinheit (der o. g. Zemente) einstellen, siehe Abschnitt 2.1.3 bzw. [132]. Die genannten Ursachen sind auch auf die Gruppe der Normalbetone übertragbar.

### 4.1.3 Abhängigkeit von der Einbaugeschwindigkeit

Die Untersuchungen zum Einfluss der Einbaugeschwindigkeit wurden mit einem Normalbeton NB-I und einem selbstverdichtenden Beton SVB-I ausgeführt. Die dabei eingehaltenen Einbaugeschwindigkeiten betragen für den Beton NB-I 3,5 m/h und 14 m/h bzw. 3,5 m/h, 7 m/h, 14 m/h, 28 m/h sowie 56 m/h für den Beton SVB-I (siehe Bild 4.2).



**Bild 4.2:** Einfluss der Einbaugeschwindigkeit auf den Frischbetondruck bei unterschiedlichen Einbauhöhen von Normalbeton NB-I (links) und selbstverdichtendem Beton SVB-I (rechts) an der Druckmessdose DMD 5

Bild 4.2 zeigt exemplarisch die typischen Verläufe der an der Druckmessdose DMD 5 registrierten Abhängigkeiten zwischen den horizontalen Frischbetondrücken und den Einbaugeschwindigkeiten ( $\sigma_h$ - $v$ -Beziehungen) bei verschiedenen Einbauhöhen. Dabei muss beachtet werden, dass bei einem Vergleich verschiedener Einbaugeschwindigkeiten eine bestimmte Einbauhöhe immer zu unterschiedlichen Einbauzeiten erreicht werden kann. Entsprechend dem Kurvenvergleich gilt für beide Betone NB-I und SVB-I, dass der Einfluss der Einbaugeschwindigkeit mit wachsender Einbauhöhe zunimmt. Zur Verdeutlichung dieser Erkenntnis sind die experimentellen Ergebnisse zusätzlich in tabellarischer Form in den Tabellen A 4.1 bis 4.11 zusammengestellt. Demnach zeigt sich eine verstärkte Abhängigkeit des Frischbetondrucks von der Einbaugeschwindigkeit innerhalb der Bereiche zwischen 3,5 m/h und 14 m/h (bei NB-I) bzw. 3,5 m/h und 7 m/h (bei SVB-I): wird die Einbaugeschwindigkeit des Betons NB-I z. B. von 3,5 m/h auf 14 m/h erhöht, wächst so bei einer Einbauhöhe  $h_E$  von 1 m der Frischbetondruck um  $\Delta\sigma_h = 4,2 \text{ kN/m}^2$  ( $\hat{=} 95 \%$ ) an. Beträgt in diesem Zusammenhang

jedoch die Einbauhöhe  $h_E = 6$  m, ergibt sich der Druckzuwachs hingegen zu  $\Delta\sigma_h = 41,6 \text{ kN/m}^2$  ( $\triangleq 63 \%$ ), siehe Bild 4.2, links.

Da das Versuchsprogramm mit dem Beton SVB-I auch eine Untersuchung des Frischbetondrucks bei einer Einbaugeschwindigkeit  $v = 7$  m/h vorsah, konnte die oben beschriebene Charakteristik schon bei einer geringeren Veränderung der Einbaugeschwindigkeit (von 3,5 m/h auf 7 m/h) festgestellt werden. Die damit verbundenen Frischbetondruckerhöhungen sind in Bild 4.2, rechts in Abhängigkeit von der Einbauhöhe entweder kaum zu bemerken (bei  $h_E = 1$  m) oder belaufen sich (bei  $h_E = 6$  m) auf  $26,9 \text{ kN/m}^2$  ( $\triangleq 35 \%$ ). Beträgsmäßig fielen die Druckzunahmen höherer Einbauhöhen vergleichsweise größer aus als die kleinerer Einbauhöhen. Zudem ist aus den Experimenten mit selbstverdichtendem Beton SVB-I ( $h_E = 6$  m) zu erkennen, dass an DMD 5 die Einbaugeschwindigkeit bis zu einem Wert von 7 m/h einen signifikanten sowie bei Werten  $7 \text{ m/h} > v > 28 \text{ m/h}$  einen leichten sowie ab einem Wert von 28 m/h keinen Einfluss auf den Frischbetondruck ausübt.

Eine allgemeingültige Aussage über den Einfluss der Einbaugeschwindigkeit auf den Frischbetondruck von sowohl Normalbeton als auch selbstverdichtendem Beton kann nach der Literatursichtung (vgl. Abschnitt 2.4.2) bisher nicht getroffen werden. Gleichwohl sind die vorgestellten Ergebnisse übereinstimmend mit den in [132] beschriebenen Feststellungen. Während des Einbaus führen auch geringe Geschwindigkeiten zu längeren Zeitabschnitten, innerhalb derer der Beton einen höheren Scherwiderstand ausbilden kann und damit den Frischbetondruck verringert. Dieser Effekt wird umso ausgeprägter, je mehr das Ansteifen des Betons durch hohe Geschwindigkeiten innerhalb des Einbauzeitraums verhindert wird [132].

Eine detaillierte Gegenüberstellung der zum Erreichen einer Einbauhöhe  $h_E = 6$  m nach Tabelle A 4.14 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 Frischbetoneigenschaften als bei den übrigen Zeitdifferenzen (siehe auch Abschnitt 4.1.5).

Unter Einbeziehung der Schalungsgeometrie bzw. des Schalungsvolumens ist im Rahmen der Bewertung der experimentellen Ergebnisse zu beobachten, dass bei einer Einbaugeschwindigkeit von 3,5 m/h kein kontinuierlicher Einbauprozess ermöglicht werden konnte. Erst ab  $v = 7$  m/h war dies gewährleistet. Dies kann als eine weitere Ursache für die oben dargestellten Ergebnisse gewertet werden. Hierbei steht dem mit  $v = 3,5$  m/h bereits in die Schalung eingebauten Beton ein längerer Zeitraum zum Strukturaufbau zur Verfügung, welcher es ermöglicht, die noch einzubauende Auflast anteilmäßig abzutragen.

Der Verlauf der  $\sigma_h$ - $v$ -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 bereits in die Schalung eingebauten Beton alleine das noch einzubauende Betoneigengewicht angesetzt. Darüber hinaus wirkt im Rahmen des

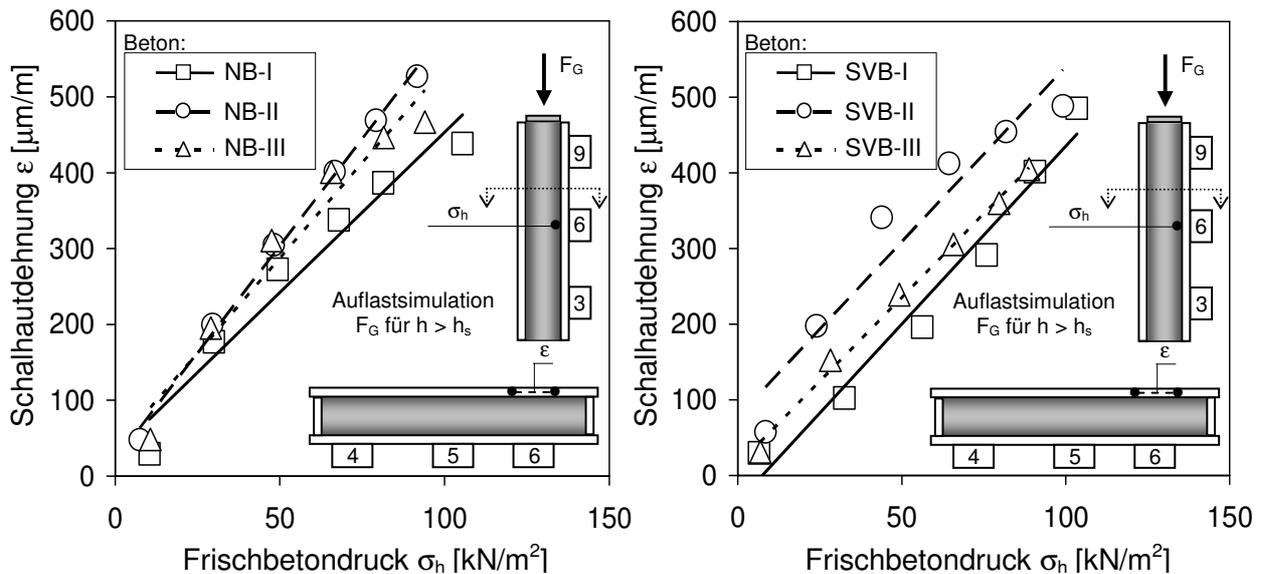
Einbauvorgangs ein Impuls auf den bereits in die Schalung eingebauten Beton. Dieser lässt sich mittels der in [29] bzw. [125] dargestellten Impulsleichung spezifizieren.

Zur Abschätzung des Einflusses des Einbauimpulses ist zudem in Tabelle A 4.14 die Spannung der Impulsauflast  $\sigma_{\text{imp}} = \rho \cdot v^2$  [N/m<sup>2</sup>] bestimmt worden. Diese nimmt bei gleich bleibender Dichte mit steigender Einbaugeschwindigkeit zwar zu, ist aber im Verhältnis zu dem Betoneigengewicht nur sehr gering ausgeprägt.

#### 4.1.4 Einfluss der Schalhautdehnung

Der Zusammenhang zwischen der Schalhautdehnung und dem Frischbetondruck wurde sowohl an den Normalbetonen NB-I, NB-II und NB-III als auch an den selbstverdichtenden Betonen SVB-I, SVB-II und SVB-III bei einer Einbaugeschwindigkeit von  $v = 14$  m/h überprüft (siehe Bild 4.3).

Wie später in Abschnitt 4.1.6 gezeigt wird, ist – für die gewählte Schalungsgeometrie – der Frischbetondruckverlauf weitgehend unverändert über die Schalungsbreite. Demnach ist die Belastung über die Schalungsbreite nahezu konstant. Somit wurde die Schalungsverformung im Weiteren mittels des Dehnmessstreifens DMS 6 untersucht (siehe Abschnitt 3.3.2.3).



**Bild 4.3:** Experimentell ermittelte  $\sigma_h$ - $\epsilon$ -Beziehungen für Normalbeton ( $v = 14$  m/h, links) und selbstverdichtenden Beton ( $v = 7$  m/h, rechts) auf einer Messhöhe von 0,75 m (DMS 6 bzw. DMD 6)

Eine charakteristische Verteilung der auf einer Schalungshöhe von 0,75 m aufgetretenen  $\sigma_h$ - $\epsilon$ -Beziehungen ist bei einer Einbaugeschwindigkeit  $v = 14$  m/h (NB-I, NB-II und NB-III) bzw. 7 m/h (SVB-I, SVB-II und SVB-III) für die untersuchten Betone in Bild 4.3 an den Messpunkten 6 (DMS 6 bzw. DMD 6) gegeben. Dabei werden sowohl die Messwerte der

Normalbetone (Bild 4.3, links) als auch die der untersuchten selbstverdichtenden Betone (Bild 4.3, rechts) gezeigt.

Die Schalungsbeanspruchung befindet sich im linear-elastischen Bereich. Aus dem Vergleich der abgebildeten Ergebnisse ist dementsprechend erwartungsgemäß für alle untersuchten Betone mit anwachsendem Frischbetondruck eine deutliche, annähernd lineare Zunahme der Schalhautdehnung zu verzeichnen. So können z. B. bei einem Frischbetondruck von  $91,7 \text{ kN/m}^2$  bei Normalbeton (NB-II) Schalhautdehnungen bis zu  $527 \text{ }\mu\text{m/m}$  erreicht werden.

Bei der Betrachtung der  $\sigma_h$ - $\epsilon$ -Beziehungen in Bild 4.3 der Betone NB-I (links) und SVB-II (rechts) ist festzustellen, dass diese von den übrigen Betonen leicht abweichen. Im Verhältnis zu den weiteren Versuchsergebnissen (vgl. Tabelle 4.1) ist diesem Ergebnis jedoch nur eine geringe Bedeutung beizumessen.

Die gemessenen Werte erweisen sich als konform zu den Beobachtungen in [76], wonach die Schalungsverformungs-Druckbeziehungen denen eines Ersatzsystems „elastisch verformbarer Balken“ entsprechen. Eine weitere Erklärung für die oben vorgestellten Ergebnisse lässt sich aus dem Bettungsmodulverfahren der Bodenmechanik ableiten, siehe [29], [30] bzw. [185]. Dabei entspricht die Schalungsdurchbiegung bzw. -verformung einer Bodensetzung, welche sich kontinuierlich proportional zu dem auftretenden Frischbetondruck (analog den Sohlpressungen) verhält. Demzufolge ist der Bettungsmodul einer Schalung von den Parametern Geometrie und Steifigkeit abhängig. Besonders im Hinblick auf die verhältnismäßig geringen Schalhautdehnungen kann diese Ableitung als geeignet angesehen werden.

Entsprechend der linear-elastischen Charakteristik des Bettungsmoduls nimmt die Dehnung in Abhängigkeit von der aufgetragenen Spannung bzw. dem aufgetragenen Druck sowie des Elastizitätsmoduls der Schalhaut resp. Schalung zu. Da für die beschriebenen experimentellen Untersuchungen eine Schalhaut zum Einsatz kam, ergaben sich für die einzelnen Versuche übereinstimmende Frischbetondruck-Schalhautdehnungsbeziehungen.

Im Rahmen der Diskussion der Frischbetondruckverteilung ist in [76] der Begriff des passiven Schalungsdrucks (d. h. „passiven Frischbetondrucks“) eingeführt worden, siehe Abschnitt 2.4.3. Dieser wird auf den in die Schalung eingebauten Beton ausgeübt und entsteht bei Verhinderung der Rückfederung oder Durchbiegungsreduzierung der Schalung aufgrund der Betonerhärtung. Anhand dieser Definition kann die Schalung als ein dem Frischbetondruck ausgesetztes Federsystem angesehen werden.

Vor Erreichen der Schalungsdurchbiegung muss zunächst die Rückstellkraft ( $F_{\text{rück}} = -D \cdot s$ ; mit:  $D$  = Federkonstante [N/m],  $s$  = Elongation [m]) bzw. die sich daraus ergebende Rückstellspannung [38] überwunden werden. Dabei verhält sich die Schalung entsprechend einem Federpendel. In diesem Zusammenhang bezeichnet die Rückstellspannung  $\sigma_{\text{rück}}$  diejenige Spannung, die infolge der Verformung der Schalung ein seitliches Fließen des in der Schalung belassenen Betons ermöglicht.

Zur funktionalen Ableitung der oben beschriebenen Abhängigkeit, wurden die Messdaten mit Hilfe einer Regressionsanalyse bearbeitet. Diese bestätigte für alle verwendeten Betone die Existenz nahezu linearer Beziehungen zwischen der Schalhautdehnung und dem Frischbetondruck. Wie in den vorangegangenen Ausführungen bereits dargestellt, ist für die konstante Zunahme der horizontalen Schalhautdehnung die kontinuierliche Erhöhung der Auflast aus dem Betoneigengewicht verantwortlich. Die entsprechenden Regressionsgeraden können ebenfalls (exemplarisch) Bild 4.3 entnommen werden. Dabei ist zu erkennen, dass die einzelnen Messpunkte beinahe exakt auf den jeweiligen Regressionsgeraden liegen.

In Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse der Regressionsanalyse aufgeführt. Demnach ist eine Abhängigkeit der Steigung  $a$  der Regressionsgeraden  $y = a \cdot x + b$  (mit  $x = \sigma_h$  und  $y = \epsilon$ ) von der Einbaugeschwindigkeit und der Betonart nahezu auszuschließen. Die mittlere Steigung der Regressionsgeraden der untersuchten Normalbetone (siehe Bild 4.3, links) beläuft sich auf  $a = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{N}$ , die der selbstverdichtenden Betone (siehe Bild 4.3, rechts) auf  $a = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{N}$ . Das stärker ausgeprägte Anwachsen der Schalhautdehnung mit zunehmendem Frischbetondruck liegt offenbar darin begründet, dass die Belastung durch die Innenrüttelverdichtung zu einer zusätzlichen Belastung der Schalung führt. Dass das mittlere Bestimmtheitsmaß  $R^2$  deutlich den Wert 0,9 überschreitet, zeugt von einer exakten Funktionsangleichung an die zugehörigen Messergebnisse. Im Rahmen der Regressionsanalyse zur Bestimmung des Bettungsmoduls erwiesen sich die Beiwerte  $b$  als derart gering, dass auf diese verzichtet werden kann. Ihre Angabe ist daher an dieser Stelle nicht explizit erforderlich.

**Tabelle 4.1:** *Regressionsergebnisse zur Beziehung von Frischbetondruck  $\sigma_h$  und Schalhautdehnung  $\epsilon$  an dem Messpunkt 6 (DMD 6 bzw. DMS 6,  $h = 0,75 \text{ m}$ )*

Beton	Einbaugeschwindigkeit $v$ [m/h]	Regressionsbeiwert $a$ $10^{-3} \text{ [m}^2/\text{N]}$	Bestimmtheitsmaß $R^2$ [-]
NB-I	3,5	5,9	0,99
	14	4,2	0,95
NB-II	14	5,6	0,99
NB-III	14	5,0	0,95
SVB-I	3,5	2,7	0,95
	7	4,7	0,97
	14	3,6	0,97
	28	7,0	0,99
	56	3,5	0,97
SVB-II	7	4,6	0,92
SVB-III	7	4,4	0,99

Aus den in Tabelle 4.1 zusammengestellten Ergebnissen der Regressionsanalyse kann unter der Voraussetzung eines linear-elastischen Verhaltens mittels der Formel  $k_s = \sigma_h/f$  (bei bekannter Durchbiegung, s. o.) nun der Bettungsmodul  $k_s$  für die Schalhaut bzw. Schalung ermittelt werden. Für die Bestimmung des Bettungsmoduls der gesamten Schalung ist die Kenntnis aller auftretenden Verformungen bzw. Durchbiegungen notwendig. Diese setzen sich in [155] aus den jeweiligen Größen der Schalungskomponenten Schalhaut, Schalhautträger, Riegel und Anker zusammen. Aus diesen ergeben sich die in DIN 18202 [68] zulässigen Ebenheitstoleranzen.

Aus der Ergebnisauswertung ergibt sich, dass der Zusammenhang zwischen Schalhautdehnung und Frischbetondruck innerhalb des Bereichs der auftretenden Frischbetondrücke gut durch die Verwendung linearer Funktionen erfasst werden kann. Die Durchführung einer Regressionsanalyse liefert die dafür zugehörigen Koeffizienten. Zur Formulierung der Funktionen bietet es sich im Hinblick auf die Bezugswertwahl der Schalhautdehnung an, die Mittelwerte der Versuchsdaten einzusetzen. Für die Baupraxis muss hinsichtlich der Verwendung von Normalbeton der Rütteleinfluss berücksichtigt werden, der zu einer Frischbetondruckerhöhung führt.

#### **4.1.5 Einfluss von Fließgrenze und Konsistenz**

Die Abhängigkeit des Frischbetondrucks von der Fließgrenze und der Konsistenz wurde an Normalbetonen (NB-I, NB-II und NB-III) sowie an selbstverdichtenden Betonen (SVB-I, SVB-II und SVB-III) innerhalb eines Zeitraums von bis zu zwei Stunden nach Einbaubeginn untersucht. Die Zeitabstände zwischen den einzelnen Konsistenzmessungen betragen vorzugsweise 7,5 Minuten bzw. 15 Minuten. Hinsichtlich des zeitlichen Fließgrenzenverlaufs sind in [34] aufgrund seiner Linearität lediglich zwei Messungen ausreichend, welche innerhalb des genannten Zeitraums mindestens ausgeführt wurden. Die Erfassung der rheologischen Eigenschaften erfolgte mit einem Rotationsrheometer, siehe Abschnitt 3.3.2.3.

Für ein umfassendes Verständnis des Einflusses der rheologischen Eigenschaften auf den Frischbetondruck sind die in diesem Zusammenhang ablaufenden stoffphysikalischen Vorgänge von eminenter Wichtigkeit. Hierfür wird zunächst in den Abschnitten 4.1.5.2 und 4.1.5.3 das rheologische Verhalten der Betone im Rahmen der experimentellen Untersuchungen eingehend diskutiert. Anschließend wird in Abschnitt 4.1.5.4 ihr Zusammenhang mit dem Frischbetondruck aufgezeigt.

##### **4.1.5.1 Parameterwahl**

Bereits in der Literatursichtung (vgl. Abschnitt 2.1.3.2) wurde die lineare zeitliche Abhängigkeit der Fließgrenze selbstverdichtender Betone beschrieben. In einem ersten Schritt wurde anhand des gewählten Versuchsprogramms (siehe Abschnitt 3.3.1) diese Charakteristik für weitere Normalbetone und selbstverdichtende Betone überprüft.

Besonders im Hinblick auf die zeitliche Entwicklung der Fließgrenze und deren evtl. Korrelation mit den standardisierten Konsistenzmaßen sind für die experimentellen Untersuchungen

das Ausbreitmaß (für Normalbeton) sowie das Setzfließmaß (bei selbstverdichtendem Beton) von Interesse. Da die untersuchten Normalbetone weichen (F4) bzw. flüssigen (F5) Konsistenzklassen entsprachen, war zu Einbaubeginn die Ermittlung eines Setzmaßes fast nicht möglich. Daher erwies sich eine Untersuchung des Einflusses des Setzmaßes auf den Frischbetondruck bzw. dessen Zusammenhang mit der Fließgrenze für die durchgeführten Versuche als nicht geeignet.

Aufgrund des stetigen Anstiegs der Betonaufplast (u. a. wegen ihres Eigengewichts) wird die Analyse der im Laufe des Einbauvorgangs tatsächlich auftretenden Frischbetondrücke erschwert. Um die ermittelten Ergebnisse besser miteinander vergleichen zu können, werden daher in der nachfolgenden Diskussion die relativen hydrostatischen Schalungsdrücke den Fließgrenzen bzw. den genannten Konsistenzmaßen gegenübergestellt. Dies ermöglicht eine umfassende Auswertung der Versuchsdaten sowohl während der Phase des Betoneinbaus als auch nach dessen Beendigung.

#### 4.1.5.2 Fließgrenzenverlauf in Abhängigkeit von der Zeit

Im Zuge der Literatursichtung (vgl. Abschnitt 2.1.3.2) wurde bereits beschrieben, dass die thixotropen Eigenschaften bzw. der Strukturaufbau von Frischbeton zu einer rheologischen Einteilung in statische und dynamische Fließgrenze führen. Welche der beiden Kenngrößen schlussendlich bestimmt werden kann, ist jedoch von der Rheometerbauart und den damit verbundenen Messoptionen abhängig.

Für den im Rheometerprobenbehälter befindlichen Beton konnten die Bedingungen des in die Schalung eingebauten Betons wirklichkeitsnah abgebildet werden. Nach Beendigung eines jeden Mischvorgangs wurde ein Teil der hergestellten Charge zur Durchführung der rheologischen Untersuchungen verwendet. Die Simulation des Verdichtungs Vorgangs für die Normalbetone erfolgte durch die Bearbeitung des Probenbehälters mit einem Rütteltisch. Entsprechend ist dieser Vorgang bzw. Einfluss im Rahmen der Fließgrenzenbestimmung der frischen Normalbetone mit eingeflossen.

Bei den rheometrisch erfassten Werten handelt es sich somit um statische Fließgrenzen. Wie bereits in Abschnitt 2.1.3.2 gezeigt, wird in diversen Literaturquellen die statische (Ruhe-)Fließgrenze z. B. mit  $\tau_0$  [152] oder  $\tau_{0,r}$  (siehe Bild 2.9) bezeichnet. Im Folgenden soll die Bezeichnung  $\tau_0$  verwendet werden, siehe Abschnitt 3.3.1. In diesem Zusammenhang entspricht die Ruhezeit  $t_r$  (siehe Bild 2.9) der Zeit  $t$ , die der Beton bereits in die Schalung eingebaut ist.

Da weder der Fließvorgang während des Einbaus selbstverdichtender Betone noch der Verdichtungsprozess der Normalbetone auf ein Rheometer übertragbar sind, ist nach dem bisherigen Stand der Erkenntnis davon auszugehen, dass die dabei auftretenden Fließgrenzen (d. h.  $\tau_{0,i}$ ) vernachlässigt werden können, siehe [34], [120] bzw. [152] sowie Abschnitt 2.1.3.2.

Die Ableitung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Fließgrenze und Ansteif- bzw. Hydratationszeit erfolgte nach Gleichung 2.7 [34], [120] bzw. [152], siehe Abschnitt 2.1.3.2 bzw. Bild 2.9. Die zugehörigen (mittleren)  $C_{thix}$ -Werte sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst, siehe auch Tabelle A 4.15

**Tabelle 4.2:** *Mittlere (aus einem [NB-II, NB-III, SVB-II und SVB-III], zwei [NB-I] bzw. fünf [SVB-I] Einzelwerten bestimmten) Thixotropiekoeffizienten  $C_{thix}$  ( $\tau_0(t) = C_{thix} \cdot t$ , siehe Gleichung 2.7 bzw. Abschnitt 2.1.3.2) zur Ermittlung der Fließgrenze in Abhängigkeit von der Zeit (Messzeitpunkte vorzugsweise in 15-Minutenabständen nach Versuchsbeginn bzw. s. o.)*

	Beton					
	NB-I	NB-II	NB-III	SVB-I	SVB-II	SVB-III
Thixotropiekoeffizient $C_{thix}$ [kN/m <sup>2</sup> ·h]	1,5	1,6	2,0	0,8	1,3	1,0

Für die Gruppe der Normalbetone weist der Beton NB-III mit  $C_{thix} = 2,0$  kN/(m<sup>2</sup>·h) den höchsten Regressionsbeiwert auf, hingegen können bei den untersuchten selbstverdichtenden Betonen  $C_{thix}$ -Werte von bis zu 1,3 kN/(m<sup>2</sup>·h) (für SVB-II) auftreten. Dies bedeutet, dass trotz eines größeren Feinstanteils infolge des erhöhten Fließmittelbedarfs die Thixotropie bzw. der Strukturaufbau und damit die  $\tau_0$ -Werte der selbstverdichtenden Betone gegenüber den Normalbetonen leicht geringer ausgebildet sind. In diesem Zusammenhang ist auch zu beachten, dass die Normalbetone einer Verdichtung ausgesetzt wurden, welche ebenfalls einen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften ausüben kann, siehe [34].

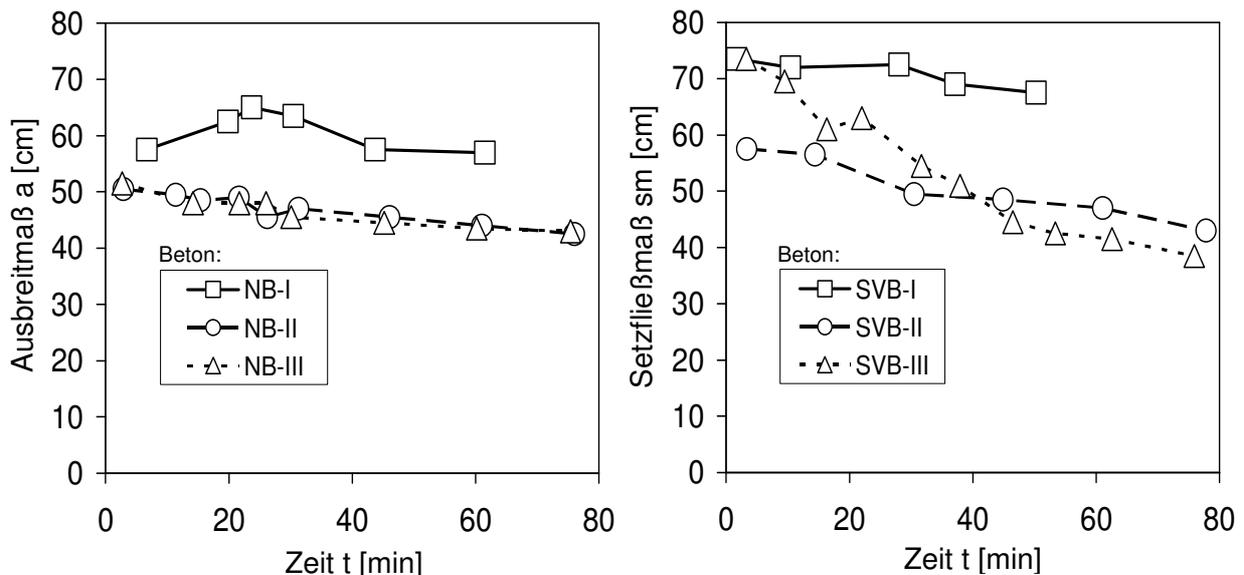
Die Erkenntnis über die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen festgestellte zeitliche Abhängigkeit der Fließgrenze steht im Einklang mit den Untersuchungsergebnissen in [34] und [152], siehe Abschnitt 2.1.3.2. Das zeitabhängige Verhalten der (statischen) Fließgrenze lässt sich in [152] auf den Strukturaufbau während des Ruhezustands sowie die damit verbundene Flockenbildung bzw. Flockulierung zurückführen. Dafür ist vor allem die Mischungszusammensetzung (und die damit verbundene Packungsdichte) verantwortlich [132].

#### 4.1.5.3 Zeitliche Konsistenzentwicklung

Aus der Auswertung der Konsistenzmessungen der untersuchten Betone lässt sich mit fortschreitender Ansteif- bzw. Hydratationszeit eine tendenzielle Abnahme des Ausbreitmaßes (der Normalbetone) bzw. des Setzfließmaßes (der selbstverdichtenden Betone) ableiten. Bild 4.4 zeigt die bei den durchgeführten Frischbetondruckversuchen (Einbaugeswindigkeit  $v = 7$  m/h bzw. 14 m/h, siehe Abschnitt 4.1.5.2) aufgetretenen a-t- resp. sm-t-Beziehungen für die Normalbetone NB-I, NB-II und NB-III bzw. die selbstverdichtenden Betone SVB-I, SVB-II und SVB-III.

Dabei wurden bezüglich des Ausbreitmaßes der Normalbetone NB-II und NB-III identische Anfangs- ( $a = 51,5$  cm) und Endwerte ( $a = 43$  cm) festgestellt, und damit ein übereinstimmender Konsistenzabnahmegrad. Die kontinuierlich höchsten Ausbreitmaße (durchschnittliches  $a = 57,5$  cm, mit einem maximalen  $a = 65$  cm) erzielte der Normalbeton NB-I bei einer nahezu konstanten Konsistenzverteilung über den betrachteten Versuchszeitraum, siehe Bild 4.4, links. Hinsichtlich des Verlaufs der  $a$ - $t$ -Beziehung des NB-I (siehe Bild 4.4, links) ist anzumerken, dass Konsistenzschwankungen innerhalb der ersten Minuten nach Betonherstellung u. a. durch die frühe Zementreaktivität sowie das Wasserabsorptionsvermögen der Gesteinskörnung hervorgerufen werden können [96].

Bezüglich der selbstverdichtenden Betone wiesen sowohl der SVB-I als auch der SVB-III mit einem Setzfließmaß  $sm = 73,5$  cm das Maximum auf. Jedoch ergab sich für den Beton SVB-III die höchste Konsistenzabnahme, was zu einem Minimum von  $sm = 38,5$  cm führte. Die Charakteristik des Konsistenzverlaufs des selbstverdichtenden Betons SVB-I (minimales  $sm = 67,5$  cm) entsprach ungefähr der des SVB-II (maximales  $sm = 57,5$  cm, minimales  $sm = 43$  cm). Indessen war die Größenordnung des Setzfließmaßes des SVB-II gegenüber dem des SVB-I durchgehend um ca. 16 cm vermindert.



**Bild 4.4:** Ausbreitmaß  $a$  der Normalbetone ( $v = 14$  m/h, links) und Setzfließmaß  $sm$  der selbstverdichtenden Betone ( $v = 7$  m/h, rechts) in Abhängigkeit von der Ansteif- bzw. Hydratationszeit

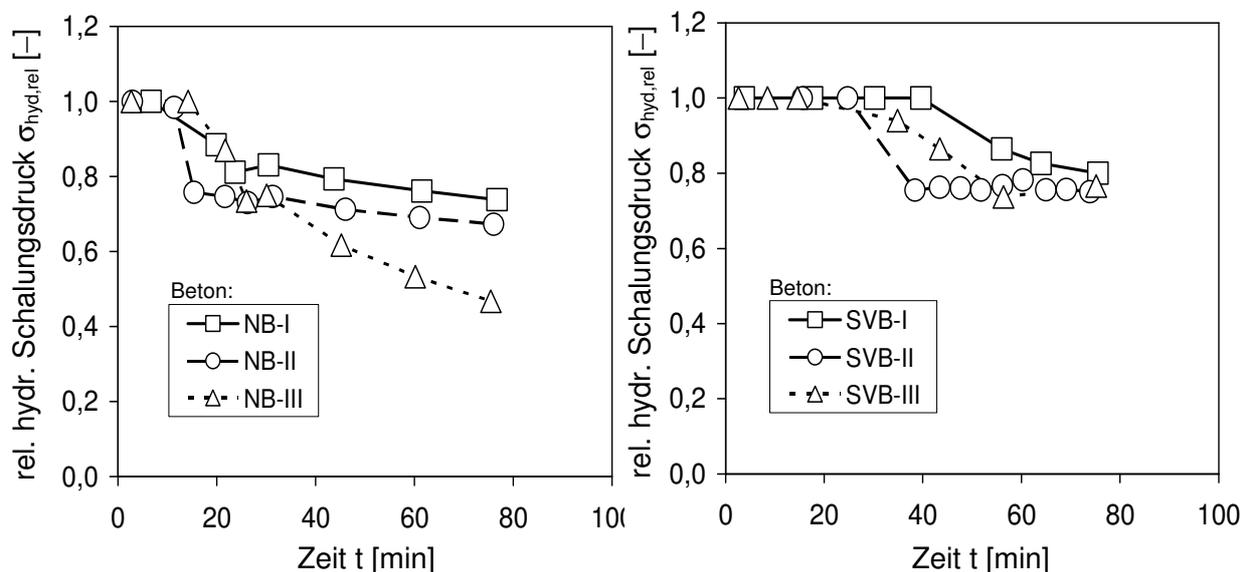
Diese Beobachtungen stehen in Übereinstimmung mit den in [34] bestimmten Konsistenzverläufen. Sie zeigen, dass das Setzfließmaß selbstverdichtender Betone in erster Linie von den Einflussfaktoren Partikelfinheit, Fließmittel sowie der Gesteinskörnungsfeuchte im Zusammenhang mit dem verwendeten Mischertyp abhängig ist. Im vorliegenden Fall ist die Ursache für die verhältnismäßig geringen Ausbreitmaße bzw. Setzfließmaße der Betone NB-II und NB-III bzw. SVB-II und SVB-III eher in ihrer erhöhten Partikelfinheit sowie ihrem geringen Wasser-Bindemittelwerten zu finden.

Gleichzeitig zeigen diese Beobachtungen im Zusammenhang mit den Ergebnissen des Abschnitts 4.1.5.2, dass nicht nur das Setzfließmaß selbstverdichtender Betone, sondern auch das Ausbreitmaß von Normalbeton einen signifikanten Einfluss auf den Strukturaufbau hat. Dies bestätigt [34], indem festgestellt wird, dass der Strukturaufbau selbstverdichtender Betone bei einem annähernd konstanten Konsistenzverhalten deutlich geringer ausgeprägt ist als bei einer signifikanten Abnahme. Jedoch erschweren weitere Parameter – wie z. B. die einzelnen Mischkomponenten – eine eindeutige Aussage, indem sie diesbezüglich bedeutenden Einfluss ausüben. Die Herleitung funktionaler Beziehungen zwischen Konsistenzmaß und Fließgrenze ist somit mit großen Unwägbarkeiten behaftet. Die Konsistenzverläufe der übrigen untersuchten Betone sind in den Bildern A 4.1 bis A 4.3 zu finden.

#### 4.1.5.4 Frischbetondruck-Zeitbeziehung

Der Aufbau des in Abschnitt 3.3.2.1 beschriebenen Modellschalungssystems ermöglichte während der Simulation von Einbauhöhen bis zu 6,5 m die kontinuierliche Aufzeichnung der Frischbetondrücke. Diese sind zum Zeitpunkt der Rheometer- bzw. Konsistenzmessungen in Bild 4.5 dargestellt.

Da infolge der stetigen Zunahme des Betongewichts während des Einbauvorgangs unterschiedliche Auflastzustände an den einzelnen Druckmessdosen vorherrschten und somit eine einheitliche Gegenüberstellung mit den Frischbetondrücken der vollständig befüllten Schalung erschwerten, erfolgte die Auswertung mit Hilfe der relativ hydrostatischen Schalungsdrücke (siehe Abschnitt 2.4.1).



**Bild 4.5:** Relativer hydrostatischer Schalungsdruck  $\sigma_{hyd,rel}$  an der Druckmessdose DMD 5 der Normalbetone NB-I, NB-II und NB-III ( $v = 14$  m/h, links) sowie der selbstverdichtenden Betone SVB-I, SVB-II und SVB-III ( $v = 7$  m/h, rechts) in Abhängigkeit von der Ansteif- bzw. Hydratationszeit

Die Analyse der Ergebnisse ergab für beide Betonarten eine Abnahme des Frischbetondrucks mit fortschreitender Ansteif- bzw. Hydratationszeit. Die zugehörigen  $\sigma_{\text{hyd,rel-t}}$ -Verläufe sind am Beispiel der Druckmessdose DMD 5 für die Normalbetone NB-I, NB-II und NB-III sowie die selbstverdichtenden Betone SVB-I, SVB-II und SVB-III dargestellt. Die Einbaugeschwindigkeit bei Durchführung der abgebildeten Versuche betrug 7 m/h bzw. 14 m/h.

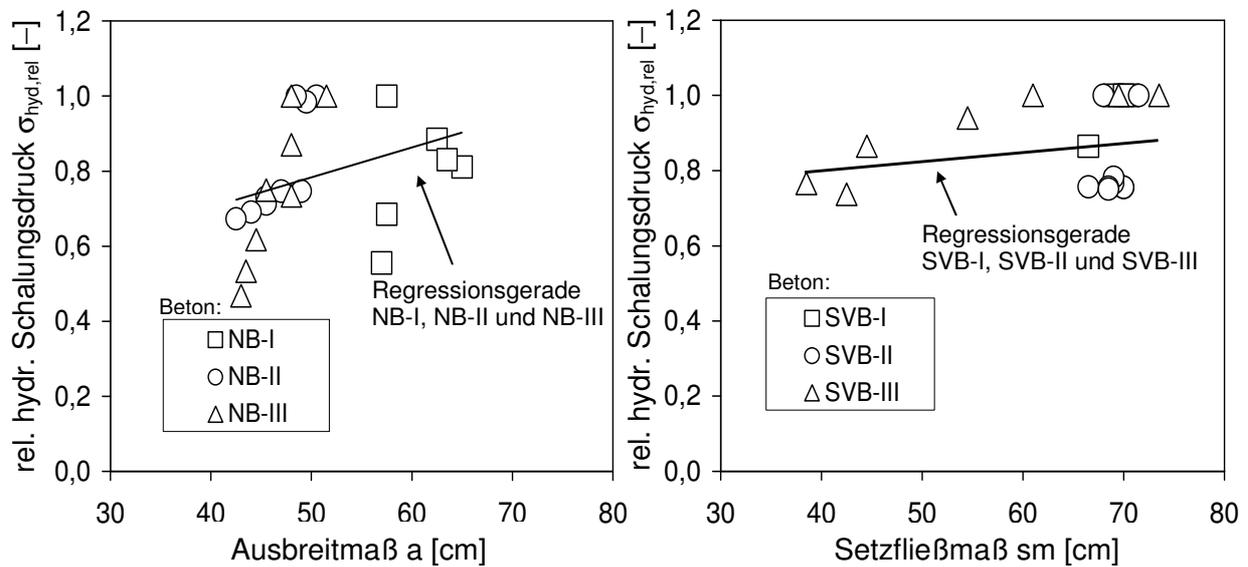
Sowohl für die Normalbetone (Bild 4.5, links) als auch für die selbstverdichtenden Betone (Bild 4.5, rechts) ergab sich mit fortschreitender Ansteif- bzw. Hydratationszeit eine Abnahme des relativen hydrostatischen Schalungsdrucks. Der maximale relative hydrostatische Schalungsdruck beträgt in den ersten Minuten nach Einbaubeginn für alle dargestellten Betone 1. Dies bestätigt die in Abschnitt 4.1.5.2 erläuterte Erkenntnis, dass nicht nur die Normalbetone (aufgrund des Verdichtungs Vorgangs), sondern auch die selbstverdichtenden Betone zu Beginn des Einbaus in die Schalung ein hydromechanisches Stoffverhalten aufweisen und damit die ursprüngliche Fließgrenze vernachlässigt werden kann (siehe Gleichung 2.7). Mit zunehmender Ansteif- bzw. Hydratationszeit unterscheidet sich der Grad des Frischbetondruckabbaus der betrachteten Betone insofern, als die Betone NB-I (min.  $\sigma_{\text{hyd,rel}} = 0,74$ ) und SVB-I (min.  $\sigma_{\text{hyd,rel}} = 0,80$ ) jeweils die geringste Reduzierung aufweisen. Hingegen ist hinsichtlich der  $\sigma_{\text{hyd,rel-t}}$ -Beziehungen der Normalbetone NB-II (min.  $\sigma_{\text{hyd,rel}} = 0,67$ ) und NB-III (min.  $\sigma_{\text{hyd,rel}} = 0,47$ ) sowie der selbstverdichtenden Betone SVB-II (min.  $\sigma_{\text{hyd,rel}} = 0,75$ ) und SVB-III (min.  $\sigma_{\text{hyd,rel}} = 0,77$ ) eine ähnliche Charakteristik festzustellen. Die Darstellungen für die weiteren Versuche sind den Bildern A 4.4 bis A 4.6 zu entnehmen.

Diese Ergebnisse stimmen mit den Beobachtungen in [98] und [132] überein. Als die Rheologie sowie die Konsistenz bestimmender Parameter übt – vgl. auch Abschnitt 4.1.5.2 bzw. [132] – die Mischungszusammensetzung einen deutlichen Einfluss auf das  $\sigma_{\text{hyd,rel-t}}$ -Verhalten aus. Darüber hinaus bestätigen die obigen Erkenntnisse (siehe Bild 4.5) die Darlegungen in [132], dass die gleichen physikalischen Parameter in Kombination mit der Mischungszusammensetzung den Frischbetondruck von Normalbeton und selbstverdichtenden Beton maßgeblich beeinflussen. Im Hinblick auf die rheologischen Einflüsse zeichnen sich in [98] und [132] besonders die Thixotropie sowie der Strukturaufbau als wesentliche Einflussfaktoren aus. Entsprechend hat die Geschwindigkeit des Strukturaufbaus einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Frischbetondruckabfall, siehe Abschnitt 4.1.5.2. Hierfür sind im Ruhezustand, d. h. unbelasteten Zustand (beispielsweise nach dem Einbau in die Schalung), vor allem die innere Reibung, die Anziehungskräfte entlang der festen Partikel sowie die im Rahmen des Ansteif- bzw. Hydratationsprozesses ablaufenden physikalischen und chemischen Vorgänge verantwortlich. Der in die Schalung eingebaute Beton kann seine Scherfestigkeit entwickeln, ohne durch eine zusätzliche Scherbeanspruchung gestört zu werden [132].

Dies wird durch die Einbeziehung der in Abschnitt 4.1.5.2 gewonnenen Ergebnisse bestätigt. Demnach haben von den Normalbetonen sowohl der NB-II ( $C_{\text{thix}} = 1,6 \text{ kN}/[\text{m}^2 \cdot \text{h}]$ ) als auch der NB-III ( $C_{\text{thix}} = 2,0 \text{ kN}/[\text{m}^2 \cdot \text{h}]$ ) nicht nur die größten zeitlichen Fließgrenzenzuwächse, sondern weisen auch den größten zeitlichen Frischbetondruckabfall auf. Im Hinblick auf die selbstverdichtenden Betone ist für die Betone SVB-II ( $C_{\text{thix}} = 1,3 \text{ kN}/[\text{m}^2 \cdot \text{h}]$ ) und SVB-III ( $C_{\text{thix}} = 1,0 \text{ kN}/[\text{m}^2 \cdot \text{h}]$ ) ein analoges Verhalten zu erkennen, siehe Bild 4.5 bzw. Tabelle 4.2.

Bei Betonen flüssiger Konsistenzen tritt in [132] ein verminderter Scherwiderstand auf (siehe Abschnitt 4.1.5.3). Dieser führt dazu, dass das stoffphysikalische Verhalten dem einer Flüssigkeit entspricht und demzufolge zu höheren Frischbetondrücken. Entsprechend dem Zusammenhang zwischen zeitlicher Fließgrenzenentwicklung und Frischbetoncharakteristik weisen die Betone mit den größten Konsistenzabfällen (NB-II, NB-III, SVB-II und SVB-III, siehe Abschnitt 4.1.5.3) die bedeutendste Frischbetondruckverringering auf, siehe Bild 4.5.

Um in Anbetracht der experimentellen Beobachtungen einen möglichen funktionalen Zusammenhang zwischen dem relativen hydrostatischen Schalungsdruck (exemplarisch an der Druckmessdose DMD 5) und der Konsistenz überprüfen zu können, wurden die entsprechenden Versuchsdaten (siehe Bild 4.6) analysiert. Diese Auswertung zeigt, dass für die dargestellten Betone grundsätzlich ein funktionaler Zusammenhang existiert (s. u.). In Bild 4.6, links sind die Messwerte des relativen hydrostatischen Schalungsdrucks der Normalbetone NB-I, NB-II und NB-III für unterschiedliche Ausbreitmaße dargestellt. Bild 4.6, rechts hingegen zeigt ihre Gegenüberstellung mit den Setzfließmaßen der selbstverdichtenden Betone SVB-I, SVB-II und SVB-III. Dabei fällt auf, dass der Streubereich für die Normalbetone (Bild 4.6, links) gegenüber dem der selbstverdichtenden Betone (Bild 4.6, rechts) leicht stärker ausgebildet ist. Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass die zur Bestimmung des Ausbreitmaßes erforderlichen Hubschläge das Fließverhalten der Normalbetone beeinflussen, vgl. Abschnitt 2.1.4.2 bzw. 4.1.5.3.



**Bild 4.6:** Messwerte des relativen hydrostatischen Schalungsdrucks  $\sigma_{hyd,rel}$  der Normalbetone NB-I, NB-II und NB-III (links) sowie der selbstverdichtenden Betone SVB-I, SVB-II und SVB-III (rechts) in Abhängigkeit von dem Ausbreitmaß (Normalbetone) bzw. Setzfließmaß (selbstverdichtende Betone) an der Druckmessdose DMD 5

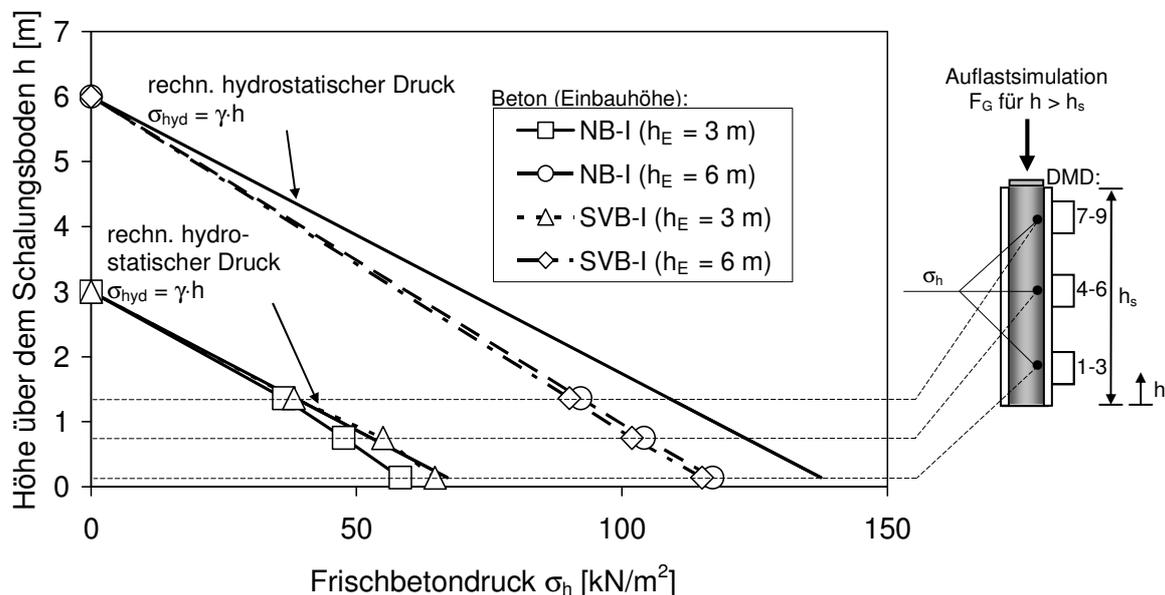
Außerdem ist noch nicht eindeutig geklärt, inwieweit die Viskosität die Konsistenzwerte beeinflusst und somit eine Ableitung funktionaler Beziehungen erschwert. Dies kann auch eine

Ursache dafür sein, dass die verhältnismäßige Größe des Frischbetondruckabfalls (siehe Bild 4.5) nicht der der Konsistenzreduzierung (siehe Bild 4.4) entspricht, siehe auch [34], [78] oder [211].

Die Analyse der experimentellen Daten mittels einer Regressionsanalyse  $y = a \cdot x + b$  (mit  $x = a$  [für Normalbeton] bzw.  $x = sm$  [für selbstverdichtenden Beton]) und  $x = \sigma_{hyd,rel}$  ergab, dass zwar tendenziell eine betonartübergreifende funktionale Abhängigkeit zwischen dem relativen hydrostatischen Schalungsdruck und den Konsistenzmaßen der untersuchten Betone festzustellen ist (für Normalbeton [NB-I, NB-II und NB-III]  $a = 0$  und  $b = 0,39$  bzw. für selbstverdichtenden Beton [SVB-I, SVB-II und SVB-III]  $a = 0$  und  $b = 0,70$ ). Diese kann jedoch aufgrund eines Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  von 0,11 (NB) bzw. 0,05 (SVB) aus den o. g. Gründen nicht zufriedenstellend formuliert werden.

#### 4.1.6 Verteilung des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe und -breite

Der Frischbetondruckverlauf über die Schalungshöhe und -breite wurde durch die Einbauhöhen-Frischbetondruckbeziehungen analysiert. In Bild 4.7 sind exemplarisch für die Einbauhöhen  $h_E = 3$  m bzw. 6 m die mittleren (aus jeweils drei Messwerten je DMD-Höhe) erfassten  $h$ - $\sigma_h$ -Werte (für einen Normalbeton NB-I [ $v = 14$  m/h] sowie einen selbstverdichtenden Beton SVB-I [ $v = 7$  m/h]) dargestellt. Erwartungsgemäß liegen für beide betrachteten Betone die  $h$ - $\sigma_h$ -Kurven mit ihren zugehörigen Streubereichen (siehe Tabellen A 4.2 bzw. A 4.6) bei geringen Einbauhöhen unter denen größerer Einbauhöhen.



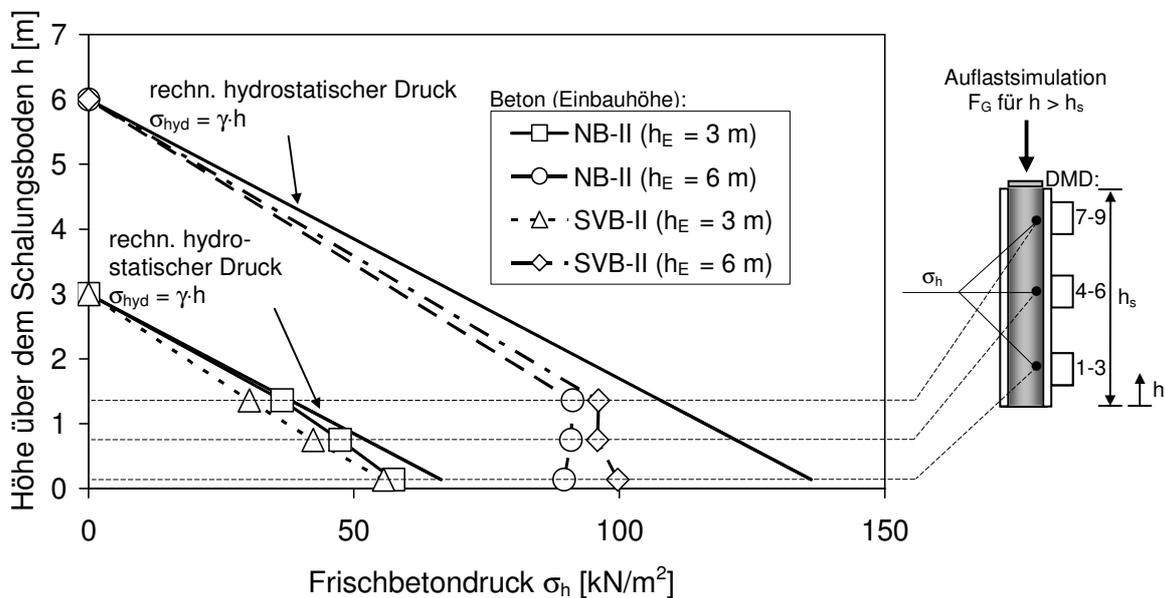
**Bild 4.7:** Einfluss der Einbauhöhe auf den Verlauf der mittleren Schalungshöhen-Frischbetondruckbeziehung der Betone NB-I ( $v = 14$  m/h) und SVB-I ( $v = 7$  m/h)

Die Unterschiede – vornehmlich im unteren Bereich bei einer Messhöhe von 0,14 m – zwischen den (bei den betrachteten Einbauhöhen) gemessenen Maximaldrücken einer Messhöhe

fielen aufgrund der jeweils in Abhängigkeit von der Mischungszusammensetzung (siehe Abschnitt 4.1.2) aufgetretenen Fließgrenzen-Zeitbeziehungen (siehe Abschnitt 4.1.5.2) und den verwendeten Einbaugeschwindigkeiten (siehe Abschnitt 4.1.3) verstärkt oder vermindert auf, siehe auch Tabellen A 4.1 bis A 4.11.

Für die sich aus Bild 4.7 ergebenden Frischbetondruckdifferenzen des Normalbetons NB-I gegenüber den Werten des selbstverdichtenden Betons SVB-I sind in erster Linie die rheologischen Eigenschaften, insbesondere der zeitliche Strukturaufbau, der Betone verantwortlich (s. o. bzw. Abschnitt 4.1.5).

In Abhängigkeit von der Einbaugeschwindigkeit und -höhe wies der vertikale Frischbetondruckverlauf der meisten der untersuchten Betone die in Bild 4.7 dargestellte Charakteristik auf. Jedoch ist bei einigen Versuchen bei einer Einbauhöhe von 6 m auf der Messhöhe von 1,36 m ein Knick zu verzeichnen, was dazu führt, dass die Frischbetondrucke der Höhe 0,14 m tendentiell unter denen der Höhe 0,75 m bzw. 1,36 m liegen. Bild 4.8 zeigt dies exemplarisch für die o. g. Einbauhöhen an einem Normalbeton NB-II ( $v = 14$  m/h) und einem selbstverdichtenden SVB-II ( $v = 7$  m/h). Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen kann neben den o. g. Ursachen (siehe Abschnitte 4.1.2, 4.1.3 und 4.1.5.2) auch das Ansteif- bzw. Hydratationsverhalten der Betone liefern. Der im unteren Schalungsbereich eingebaute Beton verweilt verglichen mit den übrigen Messstellen am längsten in der Schalung und hat daher einen größeren Zeitraum zur Verfügung, um seine innere Struktur aufzubauen, siehe auch [132].



**Bild 4.8:** Einfluss der Einbauhöhe auf den Verlauf der mittleren Schalungshöhen-Frischbetondruckbeziehung der Betone NB-II ( $v = 14$  m/h) und SVB-II ( $v = 7$  m/h)

Die beiden unterschiedlichen Arten der Frischbetondruckverteilung über die Schalungshöhe (siehe Bild 4.7 bzw. 4.8) entsprechen den in [98] bzw. [132] dargestellten Verläufen und zei-

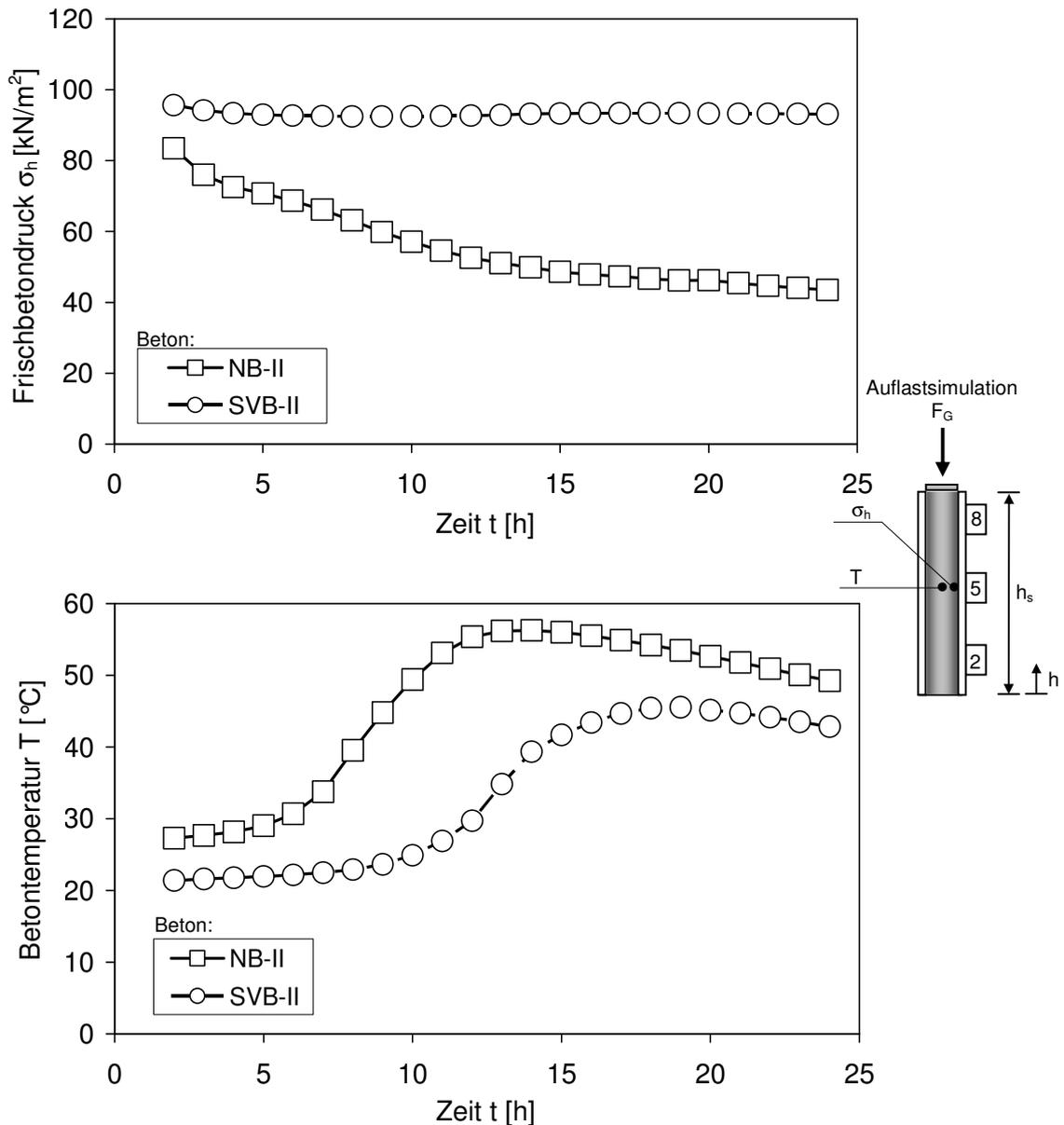
gen, dass die jeweiligen Kurven sich entweder einer hydromechanischen oder einer schüttgutmechanischen Charakteristik annähern, siehe Abschnitt 2.5. In [193] wurde belegt, dass alleine die Fließgrenze an der Schalhaut infolge einer Setzung des Frischbetons aktiviert wird. Entsprechend kann sie anstelle der Wandreibung hinsichtlich des Kräftegleichgewichts eines Scheibenelements berücksichtigt werden, siehe [123]. Maßgebend für einen linearen oder gekrümmten Verlauf ist die Größe des  $C_{thix}$ -Wertes im Zusammenspiel mit der Zeit und der gewählten Einbaugeschwindigkeit (siehe Abschnitt 4.1.5.2).

Die Größe der im Rahmen der experimentellen Untersuchungen aufgetretenen Streumaße war derart ausgeprägt, dass sie nicht explizit in Bild 4.7 bzw. 4.8 dargestellt wurden. Entsprechend übt die Schalungsbreite – die bezogen auf die aus der Schalungsgeometrie vorgegebene Wanddicke verhältnismäßig groß ist – erwartungsgemäß keinen signifikanten Einfluss auf den Frischbetondruck aus. Die Streumaße der übrigen Versuche ergeben sich aus den Tabellen A 4.1 bis A 4.11. Im Hinblick auf deren Analyse ist anzumerken, dass geringfügige Schiefstellungen des Stahlprofils der Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1) einen Einfluss auf die Größe des Frischbetondrucks ausüben können.

#### **4.1.7 Einfluss der Betontemperatur**

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde an den drei gewählten Messpunkthöhen (0,14 m, 0,75 m und 1,36 m) die Betontemperatur aufgezeichnet. Dies ermöglichte den Erhalt weiterer Informationen bezüglich ihres Einflusses auf den Frischbetondruck. Die verwendeten Druckmessdosen waren für die auftretenden Temperaturbereiche temperaturkompensiert (siehe Abschnitt 3.3.2.3).

Bild 4.9 zeigt exemplarisch sowohl die typischen Verläufe der Betontemperatur-Zeitbeziehungen als auch die gleichzeitig auftretenden Frischbetondrucke. Dabei handelt es sich um die auf einer Messhöhe  $h = 0,75$  m gemessene Temperatur der Betone NB-II und SVB-II sowie die an der Druckmessdose DMD 5 aufgetretenen Frischbetondrucke. Aufgrund der Platzierung der Temperaturfühler (siehe Abschnitt 3.3.2.3) wurden die Betontemperaturen im Bereich der Schalhaut bzw. Druckmessdosen aufgezeichnet. Hierbei muss beachtet werden, dass die Hydratationserwärmung nicht zu einer gleichmäßigen Temperaturverteilung innerhalb eines Betons führt, sondern vielmehr zu einem Gefälle mit einem Höchstwert im Bauteilkern und abnehmenden Werten hin zum Bauteilrand. Die Intensität des Temperaturgefälles nimmt dabei mit zunehmender Bauteildicke zu [201]. Da erst in einem fortgeschrittenen Hydratationsstadium signifikante Veränderungen der Betontemperatur auftreten, ist der abgebildete Versuchszeitraum von zwei bis 24 Stunden nach Einbaubeginn gewählt worden. Von einem Einfluss der Schalungsbreite auf den Frischbetondruck wurde nicht ausgegangen (siehe Abschnitt 4.1.6). Daher und im Hinblick auf eine eventuelle Beeinflussung der oberen Druckmessdosen ( $h = 1,36$  m) durch die Belastungsvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.3) erfolgten in dem o. g. Zeitraum die Messungen an den Druckmessdosen DMD 2 und DMD 5. Die exemplarisch dargestellten Ergebnisse wurden bei Versuchen mit einer Einbaugeschwindigkeit von 14 m/h (NB-II) bzw. 7 m/h (SVB-II) an der Druckmessdose DMD 5 aufgezeichnet.



**Bild 4.9:** Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks (oben) und der Temperatur (unten) der Betone NB-II ( $v = 14$  m/h) und SVB-II ( $v = 7$  m/h)

Während des betrachteten Zeitraums ergab sich (für NB-II zunächst) eine Frischbetondruckabnahme beider Betone bei einer gleichzeitig deutlichen Betontemperaturzunahme. Während der Frischbetondruck beider Betone durchgehend auf einen Grenzwert hin abnimmt, klingt die Temperatur des NB-II nach Erreichen des Maximums wieder leicht ab.

Die Temperatur beider betrachteten Betone (Bild 4.9, unten) steigt zunächst nur leicht auf die Werte 29,0 °C (NB-II,  $t = 5$  h) bzw. 24,9 °C (SVB-II,  $t = 10$  h) an. Darauf folgend kommt es zu einem signifikanten Anstieg der Betontemperatur bis zu ihrem Maximalwert von 56,3 °C (NB-II,  $t = 14$  h) bzw. 45,6 °C (SVB-II,  $t = 19$  h). Ab diesem Zeitpunkt erfolgt für den Beton NB-II eine kontinuierliche Temperaturabnahme auf den Wert 49,2 °C bzw. 42,8 °C für

SVB-II ( $t = 24$  h). Der Verlauf der Betontemperatur ist eng mit den physikalischen und chemischen Prozessen während des Ansteif-, Erstarrungs- sowie Erhärtungsvorgangs verknüpft. Die gemessenen Zeit-Betontemperaturbeziehungen entsprechen von ihrer Charakteristik her der allgemeinen Betontemperaturentwicklung (siehe [148]).

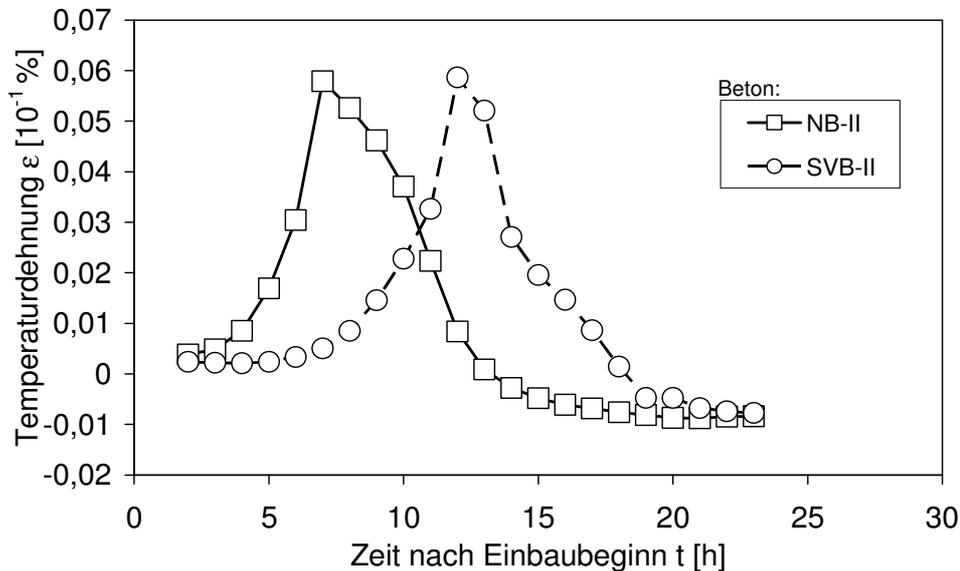
Im Gegensatz dazu nimmt der Frischbetondruck (Bild 4.9, oben) beider Betone über den betrachteten Zeitraum mehr (NB-II) oder weniger (SVB-II) kontinuierlich ab. Nach 24 Stunden können immer noch relativ hohe Frischbetondrucke beobachtet werden. Diese betragen für den Normalbeton NB-II  $43,5 \text{ kN/m}^2$  sowie  $93,1 \text{ kN/m}^2$  für den selbstverdichtenden Beton SVB-II. Das beobachtete Phänomen steht im auffälligen Widerspruch zu einem Großteil der bisher existierenden Theorien zur Beschreibung des Frischbetondrucks, siehe [98] oder [132]. Dabei wird zumeist davon ausgegangen, dass der Seitendruckbeiwert  $\lambda$  (siehe Abschnitt 2.5.1) und damit zwangsläufig der Frischbetondruck zum Erstarrungsende hin den Wert Null annehmen. Dies resultiert daraus, dass die den entsprechenden Modellen zugrunde liegenden Untersuchungen nicht über einen ausreichend langen Zeitraum bzw. nicht unter wirklichkeitsnahen Bedingungen ausgeführt wurden. Daher wurde fälschlicherweise von einer vollkommenen Aufhebung des Frischbetondrucks ausgegangen. Eine vollständige Abnahme des Frischbetondrucks wird lediglich bei Verwendung einer absolut steifen (d. h. unverformbaren) Schalung oder einer ausreichenden Schalungsentlastung durch die Schrumpfdehnung zu erwarten sein.

In der aktuellen Fachliteratur liegen jedoch derzeit auch einige wenige Vergleichsmessungen – wie z. B. in [15] – über einen ähnlich ausgedehnten Betrachtungszeitraum vor. Bezüglich des Grades der Frischbetondruckabnahme ist in Bild 4.9, oben eine merkbare Differenz zwischen den Betonen NB-II und SVB-II zu erkennen, siehe auch Bilder A 4.7 bis A 4.16. Dies bestätigten die in [15] zusammengestellten Erkenntnisse. Diese besagen, dass im Rahmen des Ansteif- bzw. Hydratationsvorganges sowohl physikalische als auch chemische Prozesse wirken. Aus physikalischer Sicht führt (innerhalb der Ruhephase, siehe Bild 2.6) die zunehmende Restrukturierung der Festpartikel zu einem Anstieg des inneren Reibungswinkels und damit zu einer Umkehrung der thixotropen Eigenschaften der Betone. Nach Beendigung der Ruhephase werden die chemischen Phänomene durch die sich bildenden Hydratationsprodukte und die damit verbundene Wasserabsorption hervorgerufen. Infolgedessen werden die sog. physikalischen (bzw. chemischen) Phänomene während der Ruhephase durch den Fließmittelanteil des jeweiligen Betons beeinflusst. Hierbei kann die Erhöhung des Fließmittelanteils zu einer Verlängerung der Ruhephase und damit zu einer Reduzierung des Frischbetondruckabfalls führen, siehe auch [13] und [151]. Entsprechend führt ein verhältnismäßig größerer Temperaturanstieg (siehe Bild 4.9, unten) zu einer Erhöhung der Hydratationsgeschwindigkeit und somit zu einem stärkeren Frischbetondruckabfall (Bild 4.9, unten), siehe auch [132].

Neben den oben erläuterten Übereinstimmungen mit den in [15] dargelegten Erkenntnissen, weisen diese im Hinblick auf den absoluten Druckabfall eine wesentliche Unterscheidung zu den Ergebnissen dieser Arbeit auf. Zwar ergab sich bei den in [15] ermittelten Ergebnissen eine vollkommene Druckentlastung, dies bedeutet jedoch nicht zwangsläufig einen Widerspruch zu den eigenen Messergebnissen. Es ist vielmehr anzunehmen, dass der absolute

Druckrückgang durch die dabei verwendete Versuchseinrichtung ermöglicht wurde. Im Rahmen der o. g. Versuche wurde ein PVC-Rohr als Schalungersatz verwendet. Vermutlich stellten sich dabei kaum Verformungen des formgebenden Rohres ein, was eine ausgeprägte Rohrdurchbiegung verhinderte (s. o.) und damit die Wirkungsweise der in Abschnitt 4.1.4 beschriebenen Effekte ausschloss.

Aufgrund der engen Beziehung zwischen Schalungsdurchbiegung und Frischbetondruck ist die während des Hydratationsvorgangs auftretende Temperaturdehnung des in der Schalung eingebauten Betons von speziellem Interesse. Diese führt zu einer zusätzlichen Beanspruchung der Schalung. Die theoretisch zu erwartenden Temperaturdehnungen der in Bild 4.9 dargestellten Betone NB-II und SVB-II wurden daher exemplarisch auf rechnerischem Wege (siehe [201]) bestimmt, siehe Bild 4.10.



**Bild 4.10:** Rechnerisch bestimmte Temperaturdehnung eines Normalbetons NB-II und eines selbstverdichtenden Betons SVB-II

Hinsichtlich der in Bild 4.10 aufgezeigten rechnerischen, auf Änderungen der Betontemperatur basierenden Temperaturdehnung kann festgestellt werden, dass beide Betone mit ca. 0,06 [10<sup>-1</sup> %] (NB-II nach sieben Stunden, SVB-II nach 12 Stunden) die gleiche maximale Dehnung erfahren. Ab dem Erreichen der jeweiligen Maximalwerte ist für die beiden Betone ein Abfall der Temperaturdehnung zu erkennen. Bei einer Summierung der Temperaturdehnungen über den gesamten Untersuchungszeitraum von 24 Stunden bleibt eine auf die Schalung wirkende (eingeprägte) Dehnung bestehen.

Die durch die Hydratationswärme hervorgerufene Betondehnung kann somit im Zusammenhang mit der Schalungsdurchbiegung als eine weitere Ursache für die Größe des Frischbetondruckabbaus angesehen werden. Gleichzeitig muss bedacht werden, dass zusätzliche chemische Vorgänge wie z. B. das Schrumpfen oder Schwinden des Betons von Bedeutung sein

können. Eine eindeutige Quantifizierung der einzelnen Parameter ist aufgrund ihrer Komplexität nicht durchgeführt worden.

## **4.2 Experimentelle Frischbetondruckuntersuchungen von selbstverdichtendem Beton in einer Rahmenschalung**

Im Abschnitt 4.1 wurde die Durchführung der Experimente zum Frischbetondruck – sowohl von konventionellem als auch von selbstverdichtendem Beton – anhand eines Modellschalungssystems beschrieben. Die dabei gewonnenen Ergebnisse wurden eingehend dargestellt und ausführlich diskutiert. In dem folgenden Abschnitt wird überprüft, ob die für die Baupraxis gewonnenen Ergebnisse – wie Konsistenz und Frischbetondruckverteilung – auch bei Verwendung einer Rahmenschalung gültig sind. Wie bereits im Zuge der Literatursichtung in den Abschnitten 2.4 bis 2.5 gezeigt worden ist, wurde die überwiegende Anzahl von Frischbetondruckuntersuchungen bis dato für Normalbeton durchgeführt. Dementsprechend konzentriert sich das aktuelle Interesse besonders auf selbstverdichtende Betone, auf die sich auch die nachfolgenden Abschnitte beschränken.

Die ausführliche Ergebnis- bzw. Datendokumentation einzelner Frischbetondruckmesswerte ist Tabelle A 4.16 zu entnehmen. Hinsichtlich der dabei festgestellten Streuungen auf einer Messhöhe sowie der Messgenauigkeit der verwendeten Druckmessdosen gelten die Ausführungen des Abschnitts 4.1.1.

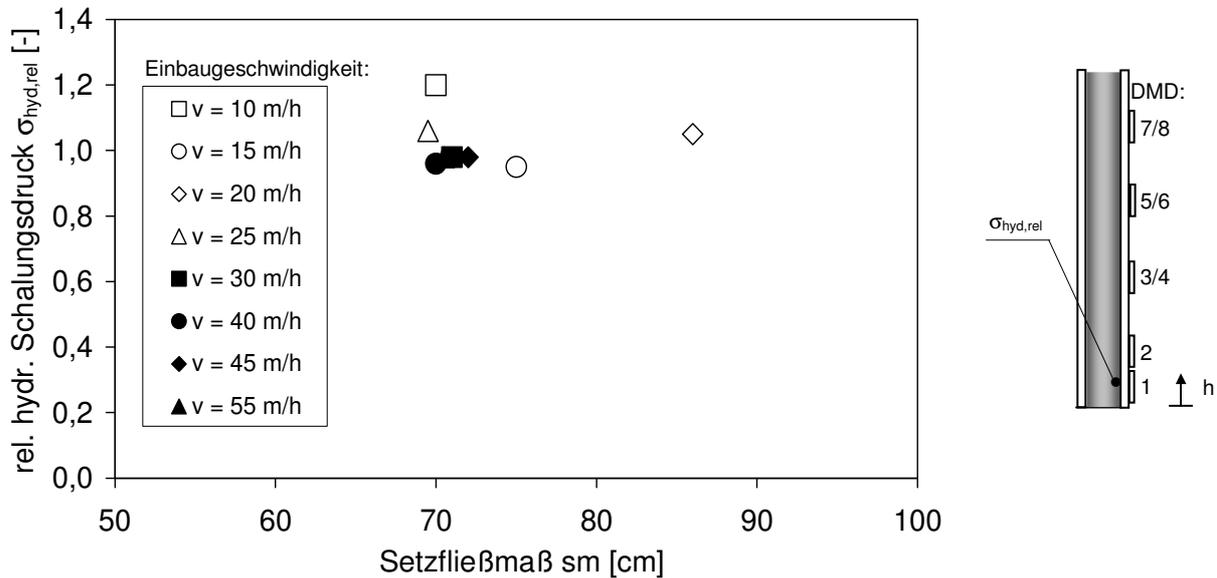
Im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Rahmenschalungsversuche wurde unter gleichen Randbedingungen ein zusätzlicher (und damit zweiter) Versuch bei einer Einbaugeschwindigkeit von  $v = 30$  m/h durchgeführt (siehe Abschnitt 3.4.2 bzw. Tabelle A 4.16). Die Ergebnisse zeigen, dass unter gleichen Rahmenbedingungen die Größenordnungen der ermittelten Frischbetondrücke eines Betons bei einer bestimmten Einbaugeschwindigkeit einander entsprechen.

### **4.2.1 Einfluss der Konsistenz**

In Abschnitt 4.1 wurden bereits die möglichen Einflüsse auf den Frischbetondruck analysiert und diskutiert. Dabei war im Hinblick auf eine baupraktische Bestimmung des Frischbetondrucks vor allem der Parameter Konsistenz von Interesse (siehe Abschnitt 4.1.5.3).

Die Auswertung der durchgeführten experimentellen Untersuchungen hat diesbezüglich gezeigt, dass ein zunehmender Konsistenzgrad sowohl für Normalbeton als auch für selbstverdichtenden Beton zu erhöhten Schalungsbeanspruchungen führen kann. Die Konsistenzentwicklung ist ein zeitabhängiger Vorgang, bei dem sich in der Regel das maximale Ausbreit- bzw. Setzfließmaß unmittelbar nach Beendigung des Mischvorgangs ergibt. Entsprechend werden zu diesem Zeitpunkt auch die maximalen relativen hydrostatischen Schalungsdrücke erreicht.

Aus den in Abschnitt 3.2 erläuterten Gründen wurde anstelle eines SVB-I ein SVB-IV verwendet. Die Unterschiede der beiden Betonrezepturen sind jedoch marginal (siehe Abschnitte 3.2, 3.3.3.1 bzw. 3.4.4.1).



**Bild 4.11:** Einfluss des Setzfließmaßes auf den relativen hydrostatischen Schalungsdruck von SVB-IV an der Druckmessdose DMD 1 bei Verwendung einer Rahmenschalung für verschiedene Einbaugeschwindigkeiten

Zur Überprüfung der allgemeinen Gültigkeit der in Abschnitt 4.1.5.4 festgestellten Beziehung zwischen Setzfließmaß und relativem hydrostatischen Schalungsdruck wurden die maximalen relativen Schalungsdrücke der Betone exemplarisch an der DMD 1 nach vollständiger Schalungsbefüllung den dabei auftretenden Setzfließmaßen in Bild 4.11 gegenübergestellt. Bei den einzelnen Versuchen wurde lediglich der Parameter Einbaugeschwindigkeit ( $v = 10$  m/h, 15 m/h, 20 m/h, 25 m/h, 30 m/h, 40 m/h, 45 m/h und 55 m/h) variiert. Die sonstigen Umgebungs- und Versuchsbedingungen blieben konstant.

Die Messergebnisse der  $\sigma_{hyd,rel}$ - $sm$ -Beziehungen zeigen, dass für Einbaugeschwindigkeiten  $> 10$  m/h ab einem Setzfließmaß von 65 cm annähernd ein voller hydrostatischer Schalungsdruck erreicht wird. So ist z. B. sowohl bei einem Setzfließmaß von 69,5 cm ( $v = 25$  m/h) als auch von 86 cm ( $v = 20$  m/h) ein voller hydrostatischer Frischbetondruck festzustellen. Der geringste relative hydrostatische Schalungsdruck von 0,95 wurde bei einem Setzfließmaß von 75 cm ( $v = 15$  m/h) ermittelt.

Diese Erkenntnis stimmt mit den Aussagen des Abschnitts 4.1.5.4 überein und liegt in den dort genannten Ursachen begründet. So ergaben im Rahmen der experimentellen Untersuchungen mit dem Modellschalungssystem für die Betone SVB-I, SVB-II und SVB-III bei einer Einbaugeschwindigkeit von 14 m/h und Setzfließmaßen  $sm \geq 60$  cm ebenfalls die relativen hydrostatischen Drücke annähernd den Wert 1 (siehe Abschnitt 4.1.5.3 bzw. 4.1.5.4).

Dies bestätigt die Tauglichkeit des Modellschalungssystems für praxisnahe Frischbeton-druckuntersuchungen.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass trotz der vernachlässigbaren Änderungen in der Mischungszusammensetzung (siehe Abschnitte 3.2, 3.3.3.1 bzw. 3.4.4.1) die Konsistenzmaße der selbstverdichtenden Betone beider Versuchsreihen (Modellschalungssystem bzw. Rahmenschalung) sich erwartungsgemäß weitestgehend einander entsprachen. Dies war eine weitere Bestätigung für den Einsatz des SVB-IV hinsichtlich der Verifizierung der Modellschalungssystemversuche (Abschnitt 4.1) mittels einer Rahmenschalung. Im Hinblick auf die dabei verwendeten unterschiedlichen Schalungsarten (Träger- bzw. Rahmenschalung) wurde erwartungsgemäß ebenfalls keine signifikante Beeinflussung festgestellt. Wie bereits in Abschnitt 2.3.2 gezeigt wurde, entsprechen sich die beiden Schalungsarten von ihrer prinzipiellen Konstruktionsweise her. Im Vergleich zur Trägerschalung sind bei einer Rahmenschalung jedoch die Schalungsträger und -riegel als Systemelement bzw. Trägerlage in einer Ebene angeordnet. Darüber hinaus unterscheiden sich die beiden Schalungsarten hinsichtlich der Materialien der einzelnen Schalungselemente.

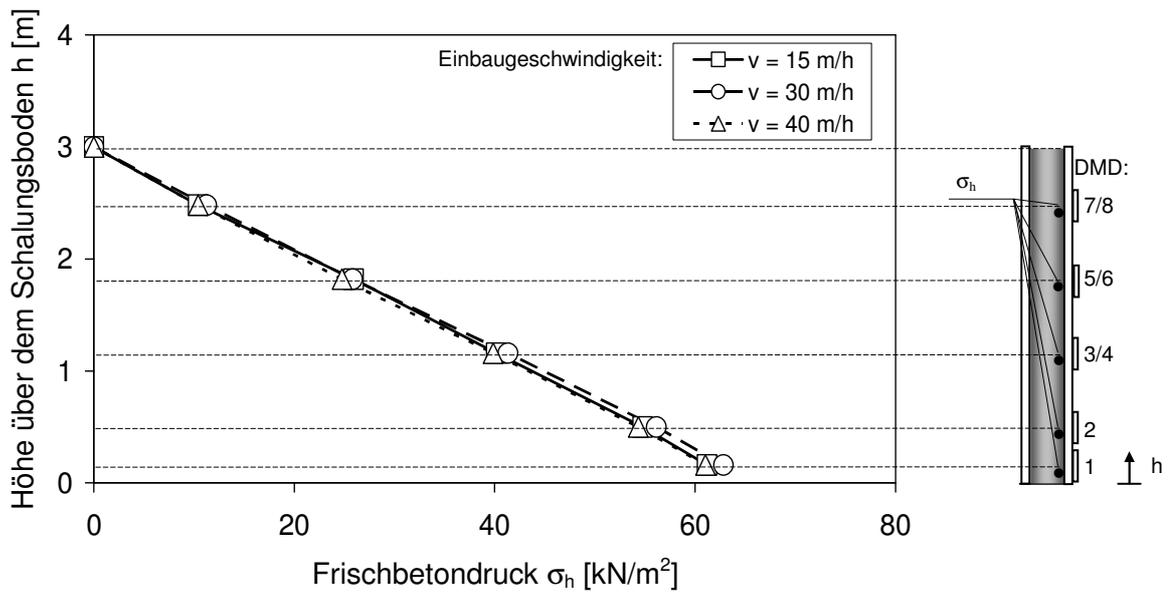
Des Weiteren fällt bei einer Betrachtung von Bild 4.11 auf, dass im Zuge der Auswertung der Messergebnisse auch relative hydrostatische Schalungsdrücke  $> 1$  beobachtet werden konnten. Zum einen sind die bei den Einbaugeschwindigkeiten  $v = 20$  m/h und 25 m/h gemessenen  $\sigma_{\text{hyd,rel}}$ -Werte von 1,05 bzw. 1,06 teilweise auf den Einfluss der Einbaugeschwindigkeit und die damit verbundene Impulsbelastung zurückzuführen (siehe Abschnitt 4.1.3). Zum anderen erscheint der bei der Einbaugeschwindigkeit von 10 m/h an der DMD 1 gemessene relative hydrostatische Schalungsdruck von 1,2 zu hoch und ist aus stoffphysikalischer sowie einbautechnologischer Sicht nicht eindeutig erklärbar. Einerseits kann es sich dabei als mögliche Ursache um kurzzeitig auftretende Druckspitzen handeln, welche durch noch nicht geklärte einbaumechanische Effekte hervorgerufen werden. Andererseits könnte die Schalung un bemerkt (durch evtl. Stoßbelastungen) während des Betoneinbaus in Schwingung versetzt worden sein.

Im Rahmen zukünftiger Experimente empfiehlt sich die Überprüfung des beschriebenen Phänomens, welches die Verwendung von Sicherheitsbeiwerten für eine baupraktische Schalungsbemessung nahe legt.

#### **4.2.2 Druckverlauf über die Schalungshöhe und -breite**

Die Versuche, die an dem neu entwickelten Modellschalungssystem ausgeführt wurden, zeigen u. a. einen annähernd linearen Verlauf der Schalungsbeanspruchung über die Höhe. Dabei war in der Regel bei zunehmender Messhöhe ein Absinken des Frischbetondrucks zu beobachten. An der Kontaktfläche zwischen Schalhaut und eingebautem Beton wirkt der Auflast lediglich die (statische) Fließgrenze entgegen. Darüber hinaus konnte keine signifikante Beeinflussung der Schalungsbreite auf den Frischbetondruck beobachtet werden, welche aus dem durch die Schalungsgeometrie gegebenen Kräftegleichgewicht resultiert (siehe Abschnitt 4.1.6).

Zur wirklichkeitsnahen Bestätigung des in den eigenen Experimenten gemessenen charakteristischen vertikalen und horizontalen Frischbetondruckverlaufs, wurden Versuche mit dem selbstverdichtenden Beton SVB-IV und den bereits in dem vorangegangenen Abschnitt 4.2.1 angegebenen Einbaugeschwindigkeiten durchgeführt. Bild 4.12 zeigt den mittleren (aus jeweils zwei Messwerten je DMD-Höhe bestimmten [mit Ausnahme von DMD 1 und DMD 2]) vertikalen Frischbetondruckverlauf am Beispiel der mit den Einbaugeschwindigkeiten 15 m/h, 30 m/h und 40 m/h durchgeführten Versuche. Die entsprechenden Darstellungen für die übrigen Einbaugeschwindigkeiten ergeben sich aus der Zusammenstellung der einzelnen Messwerte in Tabelle A 4.16.



**Bild 4.12:** Mittlerer Verlauf des Frischbetondrucks eines selbstverdichtenden Betons SVB-IV an den Druckmessdosen DMD 1, DMD 2, DMD 3-4, DMD 5-6 sowie DMD 7-8 und damit über die Schalungshöhe bei Einbaugeschwindigkeiten von 15 m/h, 30 m/h und 40 m/h

Diese führten zu dem Ergebnis einer grundsätzlich identischen und damit linearen Frischbetondruckcharakteristik (siehe Abschnitt 4.1.6). Auch im Hinblick auf die Frischbetondruckverteilung über die Höhe und Breite eignet sich somit der versuchstechnische Einsatz des Modellschalungssystems.

Bild 4.12 bestätigt die in dem vorangegangenen Abschnitt aufgestellten Thesen, welche die Ursachen der an der Druckmessdose DMD 1 aufgetretenen Frischbetondruckdifferenzen erklärten.

Entsprechend den in Tabelle A 4.16 zusammengefassten Messergebnissen ist – wie bereits in den Ausführungen des Abschnitts 4.2.1 gezeigt – der Frischbetondruck nicht nur weitestgehend unabhängig von den betrachteten Einbaugeschwindigkeiten, sondern auch von der Verteilung über die Schalungsbreite (siehe auch Abschnitte 4.1.3 bzw. 4.1.6). Die maximalen Frischbetondrücke betragen an der Messhöhe 0,16 m (DMD 1) 61,2 kN/m<sup>2</sup>

( $v = 15$  m/h),  $62,8$  kN/m<sup>2</sup> ( $v = 30$  m/h) sowie  $61,0$  kN/m<sup>2</sup> ( $v = 40$  m/h). Eine Gegenüberstellung mit den in Abschnitt 4.1 gewonnenen maximalen mittleren (aus drei Einzelwerten bestimmten) Frischbetondrücken des Betons SVB-I zeigt, dass diese keine signifikanten Abweichungen aufweisen. Bei einer Einbaugeschwindigkeit von  $14$  m/h bzw.  $28$  m/h und einer Einbauhöhe von  $3$  m ergab sich für den Beton SVB-I ein mittlerer (aus drei Einzelwerten bestimmter) maximaler Frischbetondruck (Messhöhe  $0,14$  m) von  $57,3$  kN/m<sup>2</sup> bzw.  $67,0$  kN/m<sup>2</sup>. Entsprechend betragen die Abweichungen von den in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnissen  $3,9$  kN/m<sup>2</sup> ( $v = 14$  m/h [SVB-I] bzw.  $v = 15$  m/h [SVB-IV]) und  $4,2$  kN/m<sup>2</sup> ( $v = 28$  m/h [SVB-I] bzw.  $v = 30$  m/h [SVB-IV]).

Hinsichtlich der im Vergleich zu Abschnitt 4.1 leicht abgeänderten Mischungszusammensetzung des untersuchten selbstverdichtenden Betons sowie der unterschiedlichen Schalungsarten gelten die Ausführungen des Abschnitts 4.2.1.

### 4.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Es wurde ein umfassendes Versuchsprogramm zur Ermittlung des Frischbetondrucks ausgeführt. Hierbei war das Hauptziel, die bestehenden Wissensdefizite, insbesondere bezüglich der rheologischen, einbaumechanischen und schalungskonstruktiven Einflüsse, zu beheben. Das wissenschaftliche Fundament zur Herleitung stoffgesetzlicher Zusammenhänge für den Frischbetondruck sollten die experimentell gewonnenen Untersuchungsergebnisse bilden.

Im Rahmen der experimentellen Frischbetondruckuntersuchungen wurde ein neuartiges Modellschalungssystem zur Simulation verschiedener Einbauhöhen konzipiert. Hierbei konnten sowohl tatsächliche als auch simulierte Auflastzustände studiert werden.

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen belegen bisherige Vermutungen [132], nach denen sich der Frischbetondruck von sowohl Normalbeton als auch selbstverdichtendem Beton aus der gleichen Kombination physikalischer Prozesse und der Mischungseigenschaften ergibt. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass zur Beschreibung des Frischbetondrucks auch einbaudynamische und schalungskonstruktive Einflüsse berücksichtigt werden müssen. Daher sind die folgenden Einflussparameter für eine erweiterte stoffphysikalische Formulierung des Frischbetondrucks unabdingbar: Einbaugeschwindigkeit (für  $v < 7$  m/h bzw.  $28$  m/h, siehe Abschnitt 4.1.3), Einbauhöhe, Rohdichte, Fließgrenze sowie die Schalhautdehnung. Die Ergebnisse der durchgeführten Parameterstudie werden nachfolgend im Einzelnen vorgestellt.

Eine Verringerung des Frischbetondrucks kann im Zusammenhang mit der Mischungszusammensetzung durch einen vergleichsweise größeren Korndurchmesser hervorgerufen werden. Hierfür ist die einhergehende Erhöhung des inneren Reibungswinkels verantwortlich. Auch rufen Zemente mit einem vergleichsweise höheren Partikelfeinheitsgrad aufgrund der Kontaktpunktzunahme und der auftretenden interpartikulären Kräfte eine Frischbetondruckreduzierung hervor, siehe auch [132].

Im Bezug auf die Einbaugeschwindigkeit war sowohl für Normalbeton (NB-I,  $a = 56$  cm) als auch selbstverdichtenden Beton (SVB-I,  $s_m = 73$  cm) in einem Bereich von 3,5 m/h bis 7 m/h eine signifikante Frischbetondruckdifferenz festzustellen. Im Rahmen des Betoneinbaus geringerer Einbaugeschwindigkeiten kann der Beton infolge des vergleichsweise längeren Zeitabschnitts einen hohen Scherwiderstand ausbilden, welcher zu einer Frischbetondruckreduzierung führt. Dafür sind die rheologischen Frischbetoneigenschaften verantwortlich [132]. Außerdem ist für diese Erkenntnis unter Einbeziehung der Schalungsgeometrie die Kontinuität des Betoneinbaus eine weitere Ursache, welche z. B. bei einer Geschwindigkeit von 3,5 m/h nicht gewährleistet war. Darüber hinaus führt die im Rahmen des Einbauvorgangs auftretende Impulslast zu einer Zusatzbelastung des bereits in die Schalung eingebauten Betons und damit zu einer Frischbetondruckerhöhung.

Die sich im linear-elastischen Bereich befindliche Frischbetondruckbeanspruchung führt sowohl bei der Verwendung von Normalbeton als auch selbstverdichtendem Beton zu einer linearen Proportionalität mit der Schalhautdehnung. Hierbei wirkt die Schalung infolge ihrer Elastizität wie ein (aus der Bodenmechanik bekannter) Bettungsmodul. Die Schalungsdurchbiegung erfolgt nach dem Prinzip eines Federpendels, wodurch die Schalung lediglich durch die Überwindung der Rückstellspannung in ihre Ausgangslage zurück versetzt werden kann.

Der Frischbetondruck ist aufgrund des signifikanten Einflusses der rheologischen Eigenschaften (wie diese) ein zeitabhängiger Prozess. Mit zunehmenden Thixotropiegrad bzw. Strukturaufbau ergeben sich verminderte Frischbetondrucke. Ein wesentliches Kriterium für die Thixotropie bzw. den Strukturaufbau des bereits in die Schalung eingebauten Betons ist die (statische) Fließgrenze. Bei einer vergleichsweise geringeren (statischen) Fließgrenze ist aufgrund der verminderten inneren Reibung (bzw. des inneren Reibungswinkels) und den geringeren interpartikulären Anziehungskräften ein vermindertes Strukturaufbaupotential vorhanden [132].

Sowohl für Normalbeton als auch für selbstverdichtenden Beton ist eine Frischbetondruckzunahme mit einer Erhöhung der Konsistenz (Ausbreitmaß für Normalbeton, Setzfließmaß für selbstverdichtenden Beton) zu verzeichnen. Verantwortlich ist dafür die vergleichsweise verminderte Scherfestigkeit des Betons, wodurch dieser sich näher an die rheologischen Eigenschaften einer Flüssigkeit annähert, siehe auch [132]. Aufgrund des großen Streubereichs der Frischbetondruck-Konsistenzbeziehung bzw. dem Einfluss verschiedener Faktoren auf die (verschmierte) Konsistenz, wie z. B. der Viskosität, ließ sich ein funktionaler Zusammenhang diesbezüglich nicht eindeutig ableiten.

Hinsichtlich der Frischbetondruckverteilung über die Schalungshöhe waren zwei charakteristische Verläufe zu beobachten. Unter Berücksichtigung der Einbaugeschwindigkeit verändert sich mit zunehmendem Strukturaufbau die vertikale Frischbetondruckcharakteristik von einer linearen (hydromechanische Charakteristik) hin zu einer gekrümmten Verteilung über die Schalungshöhe (schüttgutmechanische Charakteristik). Verantwortlich dafür ist die Aktivierung der (statischen) Fließgrenze an der Schalhaut, welche dementsprechend die vertikale Betonauflast teilweise abtragen kann [193]. Ein Einfluss der Schalungsbreite auf den Frisch-

betondruck war nicht erkennbar. Dies resultiert aus der Schalungsgeometrie, nach der die Schalungsbreite gegenüber der Schalwanddicke verhältnismäßig groß ausgebildet ist.

Ein Einfluss der Betontemperatur auf den Frischbetondruck war insofern zu verzeichnen, dass eine Temperaturerhöhung zu einem Druckabbau führt. In diesem Zusammenhang ruft der fortschreitende Hydratationsvorgang Temperaturdehnungen hervor, welche einer Schalungsentlastung entgegenstehen. Hierbei wurde bei einer Betrachtung über einen Zeitraum von 24 Stunden kein vollkommener Frischbetondruckabbau festgestellt. Dies kann lediglich bei einer absolut steifen bzw. unverformbaren Schalung sowie einer Schalungsentlastung infolge einer ausreichenden Schrumpfdehnung erfolgen.

Die experimentellen Untersuchungen eines selbstverdichtenden Betons SVB-IV in einer Rahmenschalung haben gezeigt, dass der Frischbetondruck mittels des Modellschalungssystems wirklichkeitsnah simuliert werden kann. Dabei entsprachen sowohl die Größenordnung als auch die Charakteristik des Frischbetondrucks bei einem vergleichbaren Setzfließmaß denen der Modellschalungssystem-Untersuchungen. Insbesondere wurden die Ergebnisse der Modellschalungssystem-Versuche hinsichtlich der vertikalen und horizontalen Frischbetondruckverteilung sowie der Frischbetondruck-Konsistenzbeziehung bestätigt.

## 5 Materialmodelle für den Frischbetondruck

### 5.1 Einleitung

Um eine wirklichkeitsnahe Anwendung neuer Erkenntnisse über das Stoffverhalten von Beton gewährleisten zu können, werden zumeist (adäquate) Materialmodelle oder Stoffgesetze herangezogen, siehe z. B. [146]. In Bezug auf den Frischbetondruck bedeutet dies, dass die wesentlichen Prozesse idealisiert dargestellt und veranschaulicht werden. Aus den stoffgesetzlichen Zusammenhängen lässt sich eine mathematische Darstellung des Materialverhaltens ableiten.

Die dafür zu erfüllenden Arbeitsschritte (Kapitel 2 bis 4) leiteten sich aus der vorgegebenen Aufgabenstellung ab (Kapitel 1). Diese führten zu der Erkenntnis, dass ein rheologisches Konzept sehr gut zur Wiedergabe des Frischbetondrucks geeignet ist und sich für eine baupraktische Umsetzung empfiehlt. Darüber hinaus bedarf eine wirklichkeitsnahe Abbildung des Frischbetondrucks einbaumechanischer und schalungskonstruktiver Parameter, so dass in der vorliegenden Arbeit auch deren Formulierung in Betracht gezogen wird.

Die Herleitung des Materialgesetzes wurde zunächst mittels einer Parameterstudie eigener Experimente zum Frischbetondruck vorbereitet (Kapitel 3 und 4). Dies führte zu einer Identifizierung derjenigen Parameter, welche sich als Modellkenngrößen des physikalischen Stoffgesetzes eignen und dementsprechend darin berücksichtigt werden sollen.

Aufbauend auf den aus den vorangegangenen Abschnitten gewonnenen Erkenntnissen widmet sich dieses Kapitel der Entwicklung und Formulierung der physikalischen Zusammenhänge hinsichtlich des Frischbetondrucks. Für das komplexe Materialgesetz wird als Fundament ein rheologisches Modell gewählt, das eine problemlose praktische Anwendung ermöglicht. Unter dem primären Gesichtspunkt einer Erfüllung praktischer Anforderungen, kann dies in einfacher Form entwickelt werden.

### 5.2 Physikalisches Materialmodell

#### 5.2.1 Anforderungen an ein ausführliches Materialmodell

Die essentielle Anforderung an das neue Materialgesetz ist der Aufbau auf eindeutigen rheologischen Stoffbeziehungen. Zumeist gelten die bekannten Modellvorstellungen entweder nur für die Gattung der Normalbetone oder die der selbstverdichtenden Betone. Sie beruhen weder auf wirklichkeitsnahen Annahmen noch berücksichtigen sie signifikante praxisrelevante Parameter, siehe Abschnitt 2.5. Bei ihrer Herleitung handelt es sich in der Regel um eine unmittelbare Angleichung der ihnen zugrunde gelegten Gleichungen an die Versuchsergebnisse des Frischbetondrucks an einer beliebig gewählten Schalungskonstruktion unter Zuhilfenahme von Korrekturfaktoren. Eine häufig angewandte Methodik besteht auch in der Angleichung ihrer Koeffizienten anhand von Zusatzuntersuchungen oder ihre Bestimmung mittels anderweitiger Definitionen. Insofern setzen sich derartige Materialgesetze aus mathemati-

schen Formulierungen zusammen, welche für die Abbildung des Frischbetondrucks keine zwingende physikalische Relevanz aufzeigen. Einmal wird eine solche Erweiterung materialgesetzlicher Zusammenhänge dadurch erschwert, dass die Möglichkeit einer späteren Übertragung auf neu entwickelte Betonarten zweifelhaft ist und baubetriebliche Aspekte unberücksichtigt bleiben. Des Weiteren erlauben mathematische oder betonunspezifische Ausdrücke alleine keine plausibel nachvollziehbare Veranschaulichung des Frischbetondrucks.

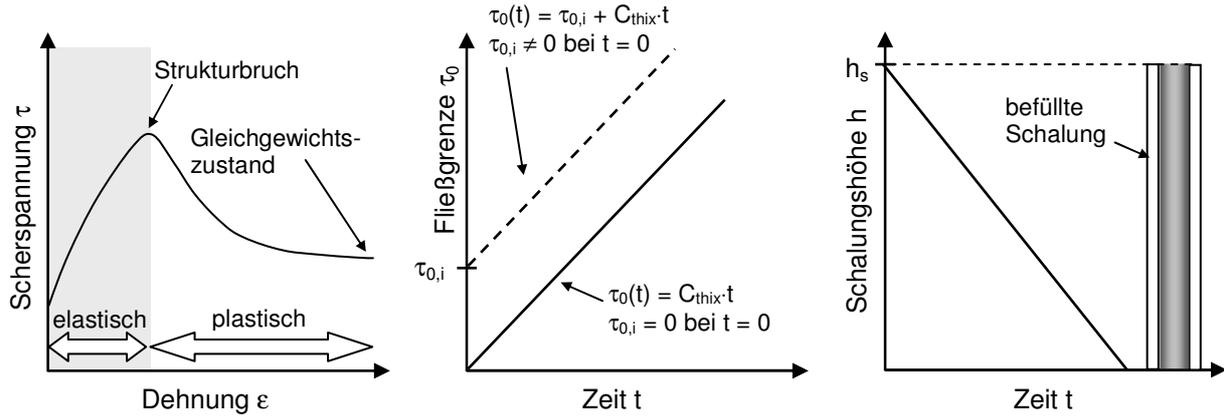
Eine weitere Anforderung an das Materialgesetz ist die gesonderte Berücksichtigung der einbaumechanischen Phänomene (siehe Abschnitt 5.3.2.1). Dies erfolgte bei den existierenden Berechnungskonzepten zumeist durch Verwendung der Gleichung  $h_E = v \cdot t$  (mit der Einbauhöhe  $h_E$  [hinsichtlich der Bemessung entspricht diese bei vollständiger Schalungsbefüllung in der Regel der Schalungshöhe  $h$ ], der Einbaugeschwindigkeit  $v$  und der Einbauzeit  $t$ ). Anhand der eigenständigen Einbeziehung dieses Phänomens soll der Frischbetondruck noch genauer wiedergegeben werden. Der Einfluss der Einbaugeschwindigkeit ist in experimentellen Frischbetondruckversuchen – aufgrund des charakteristischen  $v$ - $\sigma_h$ -Verlaufs – vielfach nachgewiesen worden. Sowohl in den in [98] oder [131] dargestellten Versuchsergebnissen als auch den eigenen Experimenten konnte gezeigt werden, dass besonders in einem Geschwindigkeitsbereich von 3,5 m/h bis 7 m/h (bzw. 28 m/h) in Abhängigkeit von der gewählten Schalungsgeometrie mit einem deutlichen Sprung der Einbaugeschwindigkeits-Frischbetondruckbeziehung gerechnet werden kann. Ab Einbaugeschwindigkeiten  $> 7$  m/h (bzw. 28 m/h) ist eher ein annähernd konstanter Kurvenverlauf festzustellen (siehe Bild 4.2). Aufgrund dieser Erkenntnis empfiehlt es sich – gemäß den Ausführungen des Abschnitts 4.1.3 – die Einbaugeschwindigkeit in Form einer durch Impulskräfte hervorgerufenen Zusatzauflast in den stoffgesetzlichen Beziehungen zu berücksichtigen.

Als dritte und letzte Anforderung an das Materialmodell ist die Abbildung der schalungskonstruktiven Mechanismen zu nennen (siehe Abschnitt 5.3.2.2). Diese lässt eine Implementierung der durch die Schalungsdurchbiegung hervorgerufenen Phänomene zu. Ihr Einfluss ist bisher selten auf experimentellem Wege analysiert worden. Die eigenen experimentellen Untersuchungen ergaben eine lineare Schalhautdehnungs-Frischbetondruckbeziehung. Entsprechend den Erläuterungen des Abschnitts 4.1.4 empfiehlt es sich, die Schalungs-Frischbetondruckinteraktion mittels eines Bettungsmoduls darzustellen.

## **5.2.2 Herleitung des Stoffmodells**

### **5.2.2.1 Grundsätzliche Annahmen und Vorgehensweise**

Die Erarbeitung des ausführlichen Materialgesetzes zur Bestimmung der horizontalen Schalungsbeanspruchung durch den Betoneinbau erfolgte in Anlehnung an die in [34] und [152] bereits für selbstverdichtenden Beton hergeleitenden stoffgesetzlichen Beziehungen sowie die sich in [152] daraus ergebenden einbaumechanischen Folgen. Eine schematische grafische Veranschaulichung dieser Grundlagen ist dem nachfolgenden Bild 5.1 zu entnehmen.



**Bild 5.1:** Schematische Darstellung stoffgesetzlicher Beziehungen, die der Entwicklung des eigenen Materialmodells zugrunde gelegt wurden und deren einbaumechanischen Folgen – charakteristische Spannungs-Dehnungsbeziehung eines thixotropen Frischbetons (links, in Anlehnung an [34]), Fließgrenze-Zeitbeziehung (Mitte, in Anlehnung an [34], [120] und [152]) und vereinfachte Schalungshöhen-Zeitbeziehung (rechts)

Aus der Darstellung des charakteristischen Spannungs-Dehnungsverhaltens thixotroper selbstverdichtender Betone (und damit auch thixotroper Normalbetone) in [34] ist in Bild 5.1, links zu ersehen, dass dieses sich bis zum Erreichen des Strukturbruchs durch eine elastische Charakteristik auszeichnet, siehe Abschnitt 2.1.3.1. Von dieser Annahme ausgehend, wurde auch das in [152] vorgestellte Modell entwickelt (siehe Abschnitt 2.5.4). Gleichzeitig ist (gemäß Abschnitt 2.1.3.2) sowohl in [120] (für Hochleistungsbeton [ohne Berücksichtigung des Verdichtungseinflusses]) als auch in [34] und [152] (für selbstverdichtenden Beton) ein linearer Zusammenhang zwischen Fließgrenze  $\tau_0$  und Zeit  $t$  (im Hinblick auf den in Bild 5.1 dargestellten Parameter Zeit  $t$  ist anzumerken, dass dieser der Ruhezeit  $t_r$  [siehe Gleichung 2.7] und damit der Einbauzeit entspricht [siehe Abschnitt 4.1.5.2]) festgestellt worden. Dieser ist schematisch in Bild 5.1 (Mitte) zu sehen (siehe Abschnitt 2.1.3.2). Die Thixotropiekonstante  $C_{thix}$  [kN/m·h] und damit der Anstieg der beiden Geraden (siehe Bild 5.1, Mitte) entspricht somit dem in Gleichung 2.7 vorgestellten  $A_{thix}$ - bzw.  $\dot{\tau}_s$ -Wert und damit dem in Abschnitt 4.1.5.2 bestimmten Regressionsbeiwert  $a$  (siehe Tabelle 4.2). Dabei ist zu berücksichtigen, ob die Fließgrenze eines Frischbetons zum Zeitpunkt  $t = 0$ , d. h. die Anfangsfließgrenze  $\tau_{0,i}$  nach Mischungsende, vernachlässigbar ist oder nicht (siehe Abschnitt 4.1.5.2).

Im Hinblick auf die einbaumechanische Beeinflussung der zeitabhängigen Fließgrenzenentwicklung haben [34] und [152] bereits eine lineare Charakteristik angegeben, siehe Abschnitt 2.1.3.2 bzw. Gleichung 2.7. Die Gerade der Fließgrenzen-Zeitbeziehung kann in diesem Zusammenhang aus mindestens zwei  $\tau_0$ -Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten  $t$  ermittelt werden. Diese ist bei vollständiger Schalungsbefüllung in Bild 5.1, rechts dargestellt – unter Vernachlässigung der unterhalb der Betonoberfläche, im oberen Schalungsbereich vorhandenen Scherzone (siehe Abschnitt 2.5.4 bzw. [152]), innerhalb der sich der gerade eingebaute Beton noch in Bewegung befindet. Demnach hat der im oberen Schalungsbereich platzierte

Beton bei vollständiger Befüllung bis zum Einbauende noch keine Möglichkeit, seine innere Struktur aufzubauen.

Neben den oben erläuterten stoffgesetzlichen Beziehungen gründet das ausführliche Materialgesetz auf den weiteren folgenden Annahmen, Voraussetzungen und Randbedingungen:

- 1) Das zu erarbeitende physikalische Materialmodell dient der Bestimmung des horizontalen Frischbetondrucks auf vertikale Schalungen.
- 2) Von elementarer Bedeutung für das zu entwickelnde Materialgesetz ist, dass nicht nur selbstverdichtende Betone als thixotrope Werkstoffe angesehen werden, sondern auch Normalbetone. Dass diese These den wirklichen Verhältnissen entspricht, ist bereits im Rahmen der Literatursichtung (siehe Abschnitt 2.1.3) erläutert worden. Die einzelnen Betone können jedoch hinsichtlich ihres Thixotropiegrades signifikante Unterschiede aufweisen, siehe [168]. Zur Bestimmung der Thixotropiekonstanten  $C_{thix}$  von frischem Normalbeton muss dabei der Verdichtungseinfluss berücksichtigt werden.
- 3) Die zugrunde gelegten stoffgesetzlichen Beziehungen sind nur für denjenigen Ansteif- bzw. Hydratationszeitraum gültig, in dem der Frischbeton thixotrope Eigenschaften aufweist (in der Regel drei Stunden, siehe Abschnitt 2.1.3.2 bzw. [10]). Einerseits entspricht dies dem realen Stoffverhalten, andererseits wird auf diese Weise verhindert, dass das herzuleitende Materialmodell im Laufe des Ansteif- bzw. Hydratationsvorgangs negative Frischbetondruckwerte aufweist.
- 4) Der Beton wird auf konventionellem Wege „von oben“ in die Schalung eingebaut. Dabei ist die in [93] vorgegebene Fallhöhe nicht zu überschreiten.
- 5) In der Scherzone des oberen Schalungsbereichs (siehe [152]) ist der Beton einem Fließprozess ausgesetzt. Aufgrund der vergleichsweise geringen dynamischen Fließgrenze (im Vergleich zur statischen Fließgrenze) wird dieser Bereich – auf der sicheren Seite liegend – als hydrostatisch angesehen. Die Höhe der Scherzone wird für selbstverdichtenden Beton nach den Angaben in [152] mit 0,2 m bis 0,4 m festgelegt. Bei Einbau von konventionellem Normalbeton wird sie um die in [50] vorgegebenen Wirkungsbereiche in Abhängigkeit von dem jeweiligen Verdichtungsgerät erweitert. Die Größe dieser Scherzonen ist jedoch nicht Bestandteil der Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit. Aufgrund der aus der Literatur bekannten absoluten Anfangsfließgrenzen (nach Beendigung des Mischvorgangs, z. B. [34], [120] oder [152]) bzw. der strukturphysikalischen Beeinflussung durch die Verdichtung von Normalbeton können diese Spannungen vernachlässigt werden.
- 6) Unter der Voraussetzung eines linear-elastischen Stoffverhaltens wird der Frischbeton als ein Kontinuum angesehen.

- 7) Anhand der Berücksichtigung des rheologischen Wissens (siehe [193] bzw. Abschnitt 2.5.4) sowie der geringen Werte der Messergebnisse der Schalhautdehnungen ist davon auszugehen, dass im Rahmen einer leichten Setzung des Frischbetons innerhalb der Schalung an der Schalhaut lediglich die Fließgrenze aktiviert wird. Beanspruchungen, welche die Fließgrenze überschreiten sind nicht möglich, da dies bedeuten würde, dass der Beton innerhalb der Schalung fließt (siehe auch [34]), was aufgrund der vorgegebenen Randbedingungen ausgeschlossen werden kann. Eine theoretische Relativverschiebung von Schalhautoberfläche und eingebautem Beton kann somit frühestens nach Überwindung der (statischen) Fließgrenze erfolgen. Insofern ist der alleinige Ansatz der statischen Fließgrenze (auf der sicheren Seite liegend) gerechtfertigt.
- 8) Der Einbauvorgang wird in keiner Weise durch externe Einwirkungen beeinträchtigt, was zu einer zusätzlichen Beanspruchung der Schalung führen würde.
- 9) Zur Herleitung des ausführlichen Materialgesetzes wird der „Einbauvorgang“ untersucht. Da dabei die Fließfähigkeit des Frischbetons am stärksten ausgeprägt ist, ist dieser Zustand für die Frischbetondruckermittlung maßgebend.
- 10) Der zeitlichen Fließgrenzenentwicklung wird ein linearer Verlauf zugrunde gelegt (siehe Bild 5.1, Mitte bzw. [34], [152] und [193]).

Im Rahmen der Erarbeitung des physikalischen Materialgesetzes wurde zunächst das sich an einem infinitesimalen Volumenelement einstellende Kräftegleichgewicht aufgestellt. Aus diesem ergab sich die resultierende vertikale Belastung. Durch Einführung eines physikalischen Seitendruckbeiwerts konnte in einem nächsten Schritt diese vertikale Belastung in eine horizontal ausgerichtete Schalungsbeanspruchung umgerechnet werden. Aus der entwickelten mathematischen Formulierung lässt sich der endgültige horizontale Frischbetondruck ermitteln und darstellen. Damit nicht nur den auftretenden stoffphysikalischen, sondern auch den einbaumechanischen Gegebenheiten Rechnung getragen werden konnte, wurden die entsprechenden Einflüsse in das Materialmodell eingearbeitet. Abschließend konnten die aufgetretenen schalungskonstruktiven Zusammenhänge abgeleitet und erläutert werden. Zur Überprüfung des auf diese Weise hergeleiteten Materialgesetzes wurden die entsprechenden Rechenwerte den eigenen experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt und bewertet. Eine Aussage über die baupraktischen Vorteile bei Verwendung des eigenen Materialmodells wurde anhand des Vergleichs mit existierenden Berechnungsmodellen (und damit auch Normen bzw. Richtlinien) getroffen.

### **5.2.2.2 Kräftegleichgewicht am Scheibenelement einer Schalung**

Die Literatursichtung zeigte, dass derzeit nur einzelne rheologische Modelle zur Bestimmung des Frischbetondrucks zur Verfügung stehen. In diesem Zusammenhang erscheint der Grundgedanke des rheologischen Modells in [152] – aufbauend auf dem von JANSSEN [123] vorgestellten Kräftegleichgewicht – ein sinnvoller Ansatz, siehe Punkt 7), Abschnitt 5.2.2.1. Das

nun folgende Modell kombiniert die beiden genannten Verfahrensweisen und erweitert sie insbesondere um sowohl rheologische als auch mechanische Gesetzmäßigkeiten.

Den Modellbezeichnungen ist zu entnehmen, dass nicht nur rheologische (siehe Abschnitt 5.2), sondern auch mechanische Aspekte (siehe Abschnitt 5.3) berücksichtigt werden. Während die Bezeichnung „rheologisch“ darauf hindeutet, dass das Modell aus elementaren physikalischen Gesetzmäßigkeiten gebildet ist, impliziert der Begriff „mechanisch“ die gleichzeitige Einbeziehung schalungskonstruktiver und einbaumechanischer Phänomene.

Da den auftretenden Frischbetondruck nicht nur rein rheologische, sondern auch mechanische Phänomene verursachen, muss dies auch bei einer Annäherung an wirkliche Gegebenheiten gebührende Beachtung finden (siehe Abschnitt 5.3). Dies erfolgt durch die Auswahl einer ausreichenden Parameteranzahl. Diese ergibt sich aus der Vertikalspannung, Schalwanddicke, Frischbetonwichte, Einbauhöhe und Fließgrenze als stoffphysikalische Parameter. Darüber hinaus die Einbaugeschwindigkeit und Schalungsdurchbiegung als mechanische Parameter. Dieser Abschnitt 5.2.2.2 konzentriert sich jedoch in erster Linie auf den rheologischen Aspekt. Die nachfolgenden Abschnitte beschäftigen sich anschließend mit der Implementierung der zusätzlichen mechanischen Effekte.

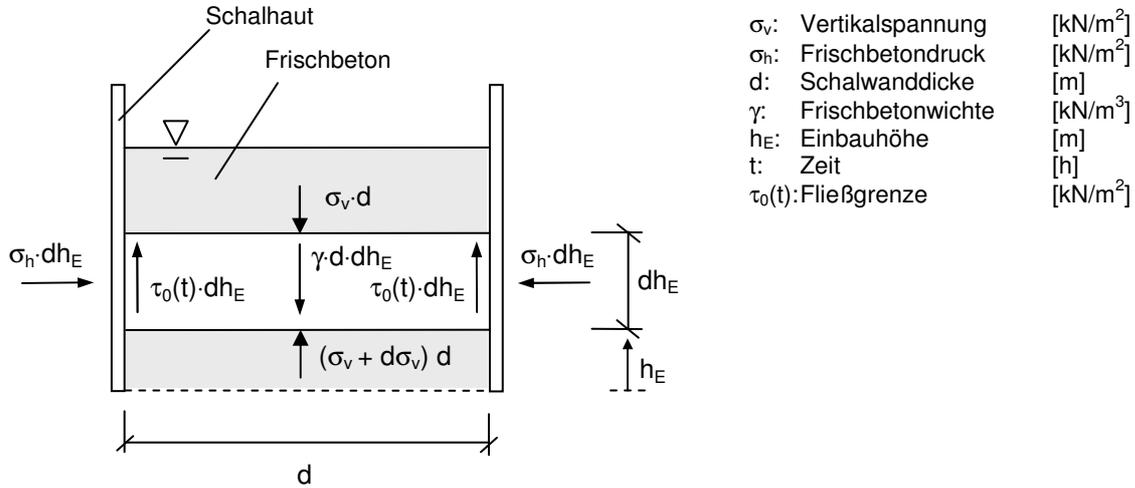
Wie zu Beginn des Abschnitts 5.2.2 bereits erwähnt, wird zur Ableitung des physikalischen Materialmodells das Kräftegleichgewicht analog dem Scheibenelementverfahren bzw. der JANSSEN-Gleichung [123] angesetzt, siehe auch [152]. Jedoch wird bei dem vorliegenden Modellansatz anstelle der aktivierten Schubspannung bzw. Schalungsreibung  $\tau_w$  die (statische) Fließgrenze  $\tau_0$  herangezogen (siehe Abschnitt 5.2.2.1 bzw. siehe [152] oder [193]). Die Fließgrenze  $\tau_0$  bezeichnet gemäß ihrer Definition diejenige Spannung, die überwunden werden muss, bevor der Beton fließen kann (siehe Abschnitt 2.1.2.1). Aufgrund der lotrechten Schalung und der Platzierung des eingebauten Betons in der Schalung ist seine Hauptfließrichtung vertikal. Dementsprechend tendiert der Frischbeton infolge seines Eigengewichts hauptsächlich zu einer Bewegung in vertikaler Richtung. Es wird der Einbauzustand „Schalungsbefüllung“ betrachtet, bei dem, mit Ausnahme der oberen Scherzone, der Großteil des eingebauten Betons in der Schalung ruht, siehe [152]. Bei einem Verbleiben des Frischbetons in der Schalung wird die Fließgrenze  $\tau_0$  jedoch nicht überschritten, da dies einem Fließvorgang gleichzusetzen wäre. Die zuvor erläuterten Zusammenhänge führen zu dem in Bild 5.2 dargestellten Kräftegleichgewicht eines Scheibenelements der Schalwanddicke d.

In [34] bzw. [152] wird der Beton infolge seines Luftgehalts bei einem kontinuierlichen Einbau komprimiert und aktiviert damit die Fließgrenze, siehe Abschnitt 5.2.2.1. Daher ist in Bild 5.2 die rheologische Kenngröße  $\tau_0(t)$  als Wandschubspannung angesetzt.

Im vorliegenden Fall ist von idealen Verhältnissen auszugehen, d. h. die Schalung wird nicht (z. B. durch Stoßbeanspruchungen) außerplanmäßig belastet, siehe Abschnitt 5.2.2.1.

Bis auf die Kenngröße  $\sigma_v$  hält die Wirkung der in Bild 5.2 angegebenen Kräfte über den gesamten Einbauvorgang (und nach vollständiger Schalungsbefüllung darüber hinaus) an. Die

auf das abgebildete Scheibenelement einwirkende Spannung  $\sigma_v$  infolge einer Auflast bleibt im Laufe des Einbauvorgangs nicht konstant, sondern nimmt mit anwachsender Einbauhöhe zu.



**Bild 5.2:** Kräftegleichgewicht am Scheibenelement der Schalung

Die im Rahmen des in Bild 5.2 dargestellten Kräftegleichgewichts auftretenden Zusammenhänge werden im Folgenden eingehend erläutert. Hierfür werden auch die beim Einbau auftretenden Beziehungen berücksichtigt. Dabei lässt sich der Einbauhöhenzuwachs bzw. die Schalungshöhenänderung  $dh_E$  für den Betoneinbau in Anlehnung an [98] mittels nachfolgender Gleichung 5.1 ersetzen, siehe Abschnitt 5.2.1:

$$dh_E = v \cdot dt \tag{5.1}$$

- mit  $dh_E$ : Einbauhöhenänderung [m]  
 $v$ : Einbaugeschwindigkeit [m/h]  
 $dt$ : Einbauzeitdifferenz [h]

Um eine wirklichkeitsnahe Darstellung des Kräftegleichgewichts gewährleisten zu können, soll zuvor die Abhängigkeit der Fließgrenzen-Zeitbeziehung von der Einbau- bzw. Schalungshöhe mit Hilfe der Gleichung 5.2 formuliert werden (siehe Bild 5.1 bzw. Abschnitt 2.1.3.2). Unter Vernachlässigung der Anfangsfließgrenze  $\tau_{0,i}$  (bedingt durch den Verdichtungsvorgang von Normalbeton bzw. den Fließvorgang von selbstverdichtendem Beton) ergibt sich die zeitliche Fließgrenzenentwicklung  $\tau_0(t)$  [kN/m<sup>2</sup>] nach Gleichung 5.2 (siehe Abschnitt 5.2.2.1) wie in [34], [120] bzw. [152] zu, siehe Abschnitt 4.1.5.2:

$$\tau_0(t) = C_{thix} \cdot t \tag{5.2}$$

- mit  $C_{thix}$ : Thixotropiekoeffizient [kN/(m<sup>2</sup>·h)]  
 $t$ : Einbauzeit [h]

Die für das Scheibenelement gültige Beziehung nach Gleichung 5.1 führt zu der bereits angegebenen Formulierung  $h_E = v \cdot t$  (mit der Einbauhöhe  $h_E$  [m] und der Einbauzeit  $t$  [h], siehe Abschnitt 5.2.1). Unter Einbeziehung dieser Einbauhöhen-Zeitbeziehung lässt sich die zeitliche Fließgrenzenentwicklung während des Einbauvorgangs mittels nachstehender Gleichung 5.3 angeben:

$$\tau_0(h_E) = C_{\text{thix}} \cdot \frac{h_E}{v} \quad (5.3)$$

Unter Berücksichtigung der oben vorgestellten Gleichungen 5.1 bis 5.3 wird nun – wie in Bild 5.2 dargestellt – das Kräftegleichgewicht in vertikaler Richtung (Betoneinbaurichtung) in Form von Gleichung 5.4 aufgestellt:

$$\sigma_v \cdot d + \gamma \cdot d \cdot dh_E = d \cdot (\sigma_v + d\sigma_v) + 2 \cdot C_{\text{thix}} \cdot \frac{h_E}{v} \cdot dh_E \quad (5.4)$$

mit	$\sigma_v$ :	Vertikalspannung	[kN/m <sup>2</sup> ]
	$d$ :	Wanddicke	[m]
	$\gamma$ :	Frischbetonwichte	[kN/m <sup>3</sup> ]

Wie in Gleichung 5.4 zu sehen ist, entfallen die beiden Terme  $\sigma_v \cdot d$  für weitere Rechenschritte. Bei der Integration der genannten Gleichung über die Einbauhöhe ergibt sich somit Gleichung 5.5:

$$\gamma \cdot d \cdot \int dh_E = d \cdot \int d\sigma_v + 2 \cdot \frac{C_{\text{thix}}}{v} \cdot \int h_E \cdot dh_E \quad (5.5)$$

Die Integration von Gleichung 5.5 führt zu der in Gleichung 5.6 gegebenen funktionalen Beziehung zur Bestimmung der vertikalen Lastverhältnisse, die sich in der Schalung einstellen:

$$\sigma_v = \gamma \cdot h_E - \frac{C_{\text{thix}} \cdot h_E^2}{v \cdot d} \quad (5.6)$$

Diese entsprechen den in [152] ermittelten Spannungen. Unter Berücksichtigung von Gleichung 5.1 kann Gleichung 5.6 in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt werden.

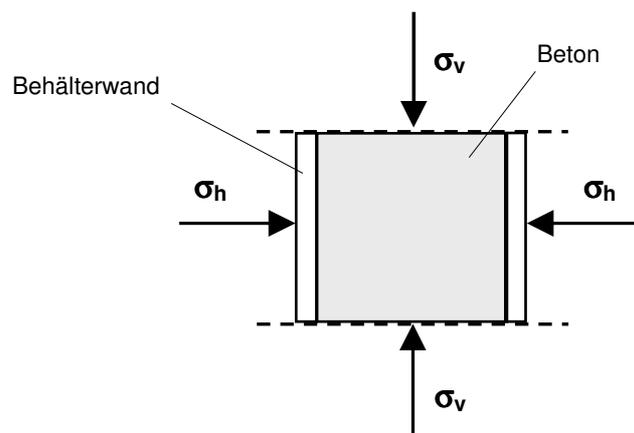
Um den horizontalen Frischbetondruck anhand der Gleichung 5.6 wirklichkeitsnah ermitteln zu können, bedarf es eines entsprechenden Seitendruckbeiwerts. Dieser wird in dem nachfolgenden Abschnitt 5.2.2.3 eingeführt und ermöglicht die Ermittlung einer Horizontalbeanspruchung aus einer einwirkenden Vertikallast.

### 5.2.2.3 Einführung des Seitendruckbeiwerts

Unter der in Abschnitt 5.2.2.1 getroffenen Annahme, dass es sich bei dem in die Schalung eingebauten Beton um ein Kontinuum handelt, bezieht sich die Herleitung des Seitendruckbeiwerts an die aus der Technischen Mechanik bekannte und schon in der Boden- bzw. Schüttgutmechanik praktizierte Verfahrensweise, siehe [101], [174] sowie [175]. Dazu bedarf es der Einführung des Seitendruckbeiwerts  $\lambda = \sigma_h/\sigma_v$ , siehe Abschnitt 2.5.1 bzw. Gleichung 2.11. Dieser ist ein geläufiges Instrument aus der Bodenmechanik zur Umrechnung von Vertikallasten in Horizontalbeanspruchungen. Die horizontalen Spannungen des in die Schalung eingebauten Betons resultieren somit aus den auftretenden Vertikalspannungen.

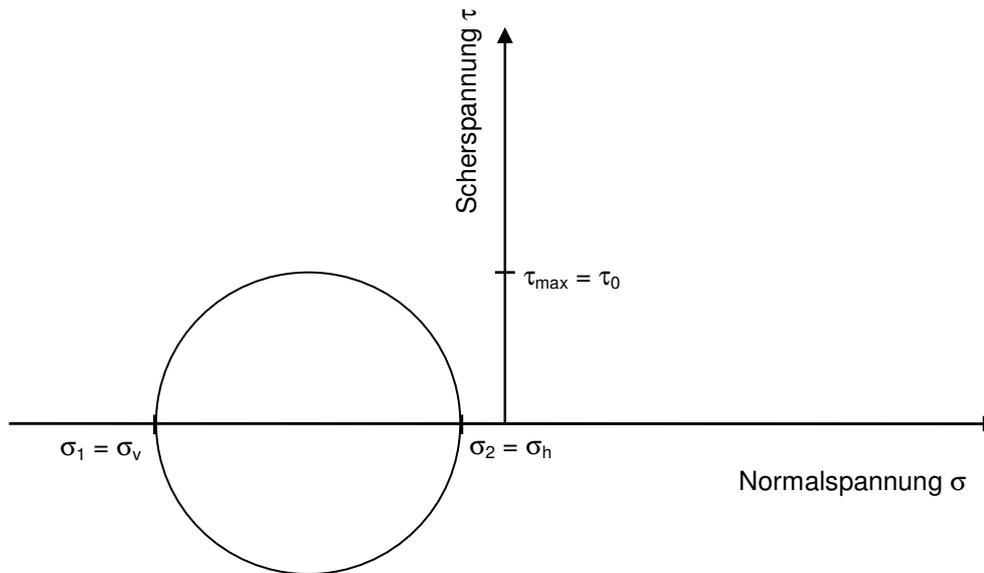
Hierbei stellt sich in der Regel ein  $\lambda$ -Wert zwischen 0 und 1 ein. Zum Erreichen dieser beiden Grenzwerte bedarf es zweier stoffphysikalischer Zustände. Der Maximalwert ( $\lambda = 1$ ) gilt für Flüssigkeiten, während das Minimum ( $\lambda = 0$ ) bei idealsteifen Festkörpern auftritt, siehe [174].

Zur Bestimmung des Seitendruckbeiwerts wird nun ein einzelnes Frischbetonelement in einem Behälter betrachtet. Die entsprechende Darstellung ist in Bild 5.3 zu sehen und lässt sich auf den in eine Schalung eingebauten Beton übertragen. Die dabei zu berücksichtigenden Spannungen sind die Vertikalspannung  $\sigma_v$  [ $\text{kN/m}^2$ ] sowie die Horizontalspannung  $\sigma_h$  [ $\text{kN/m}^2$ ].



**Bild 5.3:** Kräfteansatz an einem Frischbetonelement zur Herleitung des Seitendruckbeiwerts; in Anlehnung an [174]

Im Hinblick auf die Behälterwand und -tiefe wird vorausgesetzt, dass die Wände reibungsfrei ausgebildet sind. Das heißt, dass es sich um einen Hauptspannungszustand ohne auftretende Schubspannung handelt und dass die Behältertiefe unendlich ist. Die Größe  $\sigma_v$  bezeichnet die Hauptspannung in vertikaler Richtung, die Größe  $\sigma_h$  stellt die horizontale Hauptspannung dar. Nach den Ausführungen in [34] ist bekannt, dass die (statische) Fließgrenze vor Erreichen des Strukturbruchs mit der maximalen innerhalb des Frischbetons auftretenden Schubspannung  $\tau_{\max}$  gleichzusetzen ist. Mithin ist unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen die Abbildung der verschiedenen Spannungszustände des in Bild 5.4 dargestellten Volumenelements in einem MOHRschen Spannungskreis (siehe [101]) möglich.



**Bild 5.4:** Mohrscher Spannungskreis zur Bestimmung der maximalen Schubspannung  $\tau_{\max}$  aus den Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$ ; in Anlehnung an [101]

Bild 5.4 zeigt den MOHRschen Spannungskreis für die Hauptspannungen  $\sigma_1 = \sigma_v$  und  $\sigma_2 = \sigma_h$  sowie die maximal übertragbare Schubspannung  $\tau_{\max} = \tau_0$ . Dabei handelt es sich um einen reinen Druckspannungszustand.

Demnach lässt sich die Fließgrenze in Anlehnung an die aus der Elastostatik bekannten Gesetzmäßigkeiten mit nachfolgender Gleichung 5.7 ableiten:

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_v - \sigma_h) \quad (5.7)$$

Die Auflösung der obigen Gleichung 5.7 nach dem Spannungsverhältnis  $\sigma_h/\sigma_v$  führt nach Gleichung 5.8 zu dem Seitendruckbeiwert:

$$\lambda = 1 - \frac{2 \cdot \tau_0}{\sigma_v} \quad (5.8)$$

Bedingt durch die Zeitabhängigkeit der Fließgrenze (siehe Gleichung 5.2) nimmt der Seitendruckbeiwert  $\lambda$  mit zunehmender Ansteif- bzw. Hydratationszeit ab und lässt sich unter Vernachlässigung der Anfangsfließgrenze nach Gleichung 5.9 in der Form

$$\lambda = 1 - \frac{2 \cdot C_{\text{thix}} \cdot t}{\sigma_v} \quad (5.9)$$

darstellen.

Schließlich kann der horizontale Frischbetondruck unter Verwendung von Gleichung 5.7 entsprechend der nun folgenden Gleichung 5.10 bestimmt werden:

$$\sigma_h = \sigma_v - 2 \cdot \tau_0 \quad (5.10)$$

Die Berücksichtigung von Gleichung 5.9 führt zu der Ermittlung des horizontalen Frischbetondrucks nach Gleichung 5.11:

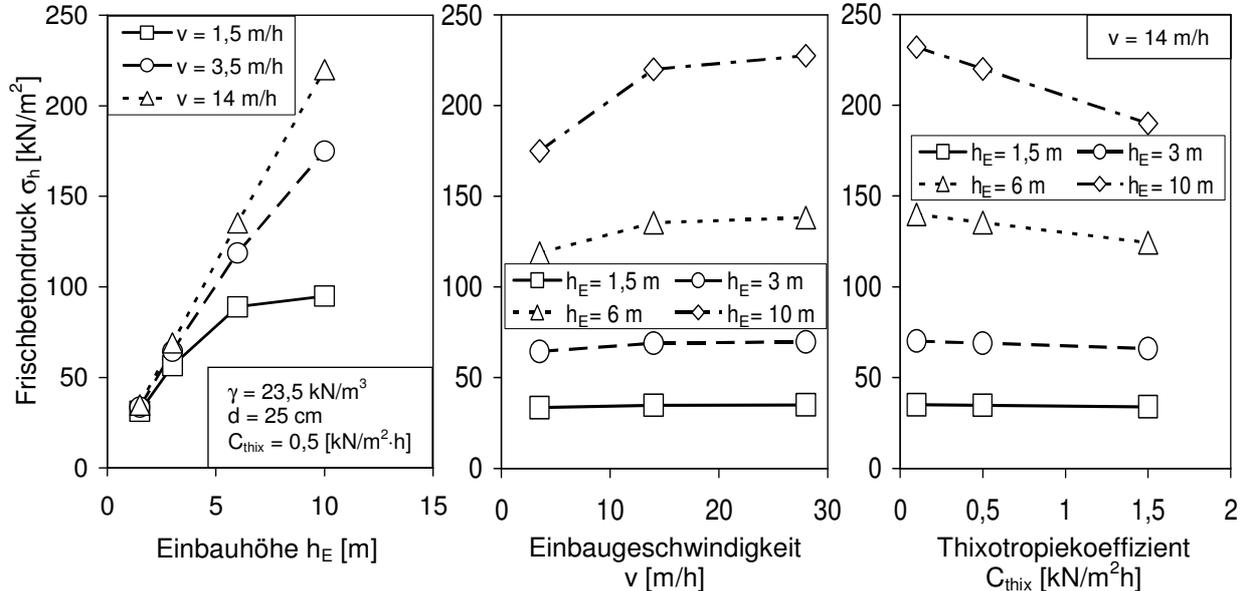
$$\sigma_h = \sigma_v - 2 \cdot C_{\text{thix}} \cdot t \quad (5.11)$$

Unter Einarbeitung der Gleichung 5.6 in Gleichung 5.11 ergibt sich der horizontale Frischbetondruck nach Gleichung 5.12:

$$\sigma_h = \gamma \cdot h_E - \frac{C_{\text{thix}} \cdot h_E^2}{v \cdot d} - 2 \cdot C_{\text{thix}} \cdot \frac{h_E}{v} \geq 0 \quad (5.12)$$

Die Berücksichtigung der Beziehung  $h_E = v \cdot t$  (siehe Abschnitt 5.2.1 bzw. Gleichung 5.1) in Gleichung 5.12 ermöglicht entsprechend die Beschreibung des Frischbetondrucks in Abhängigkeit von der Zeit.

Bei vorgegebener Schalwanddicke  $d$  und konstanter Frischbetonwichte  $\gamma$  wird die Größe des Frischbetondrucks nach Gleichung 5.12 maßgeblich von den Parametern Einbauhöhe  $h_E$ , Einbaugeschwindigkeit  $v$  und Thixotropiekoeffizient  $C_{\text{thix}}$  beeinflusst. Dies zeigt Bild 5.5.



**Bild 5.5:** Einfluss der Parameter Einbauhöhe  $h_E$  (links), Einbaugeschwindigkeit  $v$  (Mitte) und Thixotropiekoeffizient  $C_{\text{thix}}$  (rechts) auf den rechnerischen Frischbetondruck bei gegebenen Randbedingungen (Wichte [ $\gamma = 23,5 \text{ kN/m}^3$ ] und Schalwanddicke [ $d = 25 \text{ cm}$ ] für die drei dargestellten Einflüsse, variable Einbaugeschwindigkeit für den Einfluss Einbauhöhe und veränderliche Einbauhöhe für die Einflüsse Einbaugeschwindigkeit und Thixotropiekoeffizient)

Demnach wird die Einbauhöhen-Frischbetondruckbeziehung eines betrachteten Schalungspunkts in ihrer Charakteristik von der jeweils zugrunde gelegten Einbaugeschwindigkeit beeinträchtigt. Diese bewegt sich von einem gekrümmten Verlauf (Bild 5.5, links;  $v = 1,5$  m/h) mit zunehmender Einbaugeschwindigkeit immer mehr zu einem linearen Verlauf hin. Schon bei relativ geringen Einbaugeschwindigkeiten nähert sich die Einbauhöhen-Frischbetondruckbeziehung (Bild 5.5, links;  $v = 3,5$  m/h) einer linearen Form an. Bei einer Einbaugeschwindigkeit von 14 m/h wird die Einbauhöhen-Frischbetondruckbeziehung durch eine Gerade wiedergegeben.

Während die Einbaugeschwindigkeits-Frischbetondruckbeziehung eines betrachteten Schalungspunkts bei geringen Einbauhöhen (Bild 5.5, Mitte;  $h = 1,5$  m und 3 m) fast unbeeinflusst und damit konstant bleibt, ist eine stärkere Zunahme des Einflusses der Einbaugeschwindigkeit bei größeren Höhen (am Beispiel  $v = 14$  m/h) zu verzeichnen. Ein Knick der Funktionskurve tritt schon bei einer Einbauhöhe von  $h_E = 6$  m auf. Bei einer Einbauhöhe von  $h_E = 10$  m ist dieser bei dem betrachteten Beispiel signifikant.

Die gleiche Charakteristik ergibt sich bei anwachsender Einbauhöhe im Hinblick auf die Thixotropiekoeffizienten-Frischbetondruckbeziehung (exemplarisch für  $v = 14$  m/h in Bild 5.5, rechts). Bei einer Einbauhöhe von  $h_E = 1,5$  m und  $h_E = 3$  m ist die  $C_{thix}-\sigma_h$ -Beziehung annähernd konstant. Ab einer Einbauhöhe von  $h_E = 6$  m ist mit zunehmendem  $C_{thix}$ -Wert eine negative Steigung zu verzeichnen, deren Wert bei größeren Einbauhöhen (hier  $h_E = 10$  m) zunimmt.

Die im Rahmen des Betoneinbaus in eine Schalung auftretenden Prozesse werden entsprechend den obigen Erläuterungen bezüglich Bild 5.5 hinreichend gut abgebildet.

#### 5.2.2.4 Grenzwertbestimmung

In der Baupraxis ist die „kritische Einbaugeschwindigkeit“ von Interesse. Sie kann mit dem entwickelten Modell ermittelt werden. Diese bezeichnet diejenige Geschwindigkeit, bei welcher die mit zunehmender Einbauhöhe ansteigenden Vertikallastzuwächse durch die mit der Zeit anwachsenden Schubspannungen kompensiert werden können. Ihre Bestimmung erfolgt entsprechend der nachstehenden Bedingung [152]:

$$\frac{\partial \sigma_h}{\partial h_E} = 0 \quad (5.13)$$

Das Einsetzen von Gleichung 5.12 in Gleichung 5.13 führt zu der nachfolgenden Gleichung 5.14:

$$\gamma - 2 \cdot \frac{C_{thix} \cdot h_E}{v_{krit} \cdot d} - 2 \cdot \frac{C_{thix}}{v_{krit}} = 0 \quad (5.14)$$

Die Lösung von Gleichung 5.14 führt zu der Ermittlung der kritischen Einbaugeschwindigkeit  $v_{\text{krit}}$  [m/h] entsprechend der Gleichung 5.15:

$$v_{\text{krit}} = \frac{2 \cdot C_{\text{thix}}}{\gamma} \cdot \left( \frac{h_E}{d} + 1 \right) \quad (5.15)$$

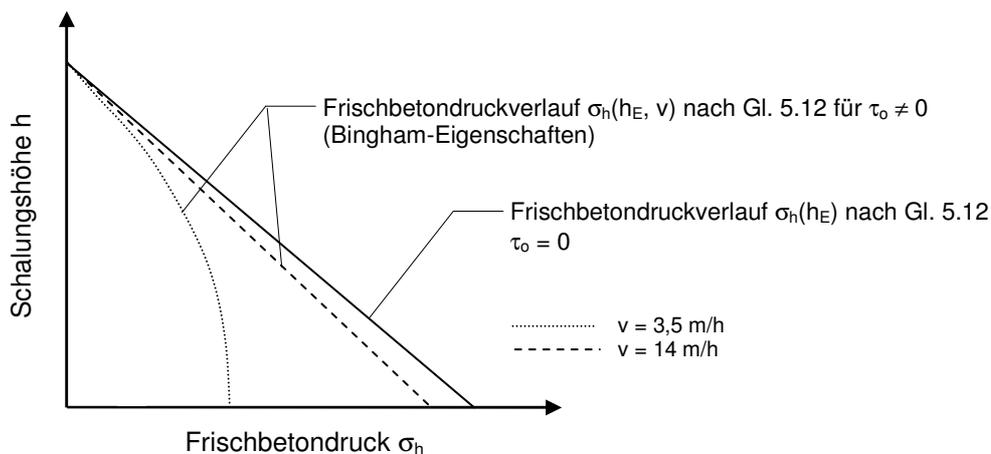
Wie Gleichung 5.15 zeigt, stellt die Thixotropie bzw. der Strukturaufbau des Betons ein wesentliches Kriterium dar. Infolge einer Erhöhung des Thixotropiegrades des Baustoffs kann die kritische Einbaugeschwindigkeit für eine wirtschaftliche Schalungsbemessung erhöht werden.

Die in Gleichung 5.15 formulierte kritische Einbaugeschwindigkeit lässt gegenüber dem in [152] formulierten Konzept höhere Werte zu, was anhand des rheologischen Seitendruckbeiwerts des Materialmodells ermöglicht wird. Die auf diese Weise erhaltenen Einbaugeschwindigkeiten führen zu einer höheren Wirtschaftlichkeit im Rahmen der Betonbautechnik.

Im Hinblick auf sehr große Einbaugeschwindigkeiten strebt für die Grenzwertbetrachtung  $v \rightarrow \infty$  (für  $v \rightarrow 0$  siehe Gleichung 5.15) unter Berücksichtigung der betonspezifischen Erstarungszeiten bzw. des Gültigkeitsbereiches (siehe Abschnitt 5.2.2.1) und damit praxisnaher Verhältnisse (Bed.:  $\gamma \cdot h_E \geq (C_{\text{thix}} \cdot h_E^2)/(v \cdot d) + 2 \cdot C_{\text{thix}} \cdot h_E/v$  und dementsprechend  $t \leq \gamma \cdot d/C_{\text{thix}}$ , siehe Gleichung 5.12) der Frischbetondruck  $\sigma_h$  gegen  $\gamma \cdot h_E$ . Entsprechend wird das Frischbetondruckverhalten im Grenzbereich anhand von Gleichung 5.12 gut abgebildet.

### 5.2.2.5 Vertikaler Frischbetondruckverlauf

In Bild 5.6 sind die mit dem im vorangegangenen Abschnitt 5.2.2.3 vorgestellten Materialgesetz ermittelten Schalungshöhen-Frischbetondruckbeziehungen schematisch dargestellt.



**Bild 5.6:** Schematische Darstellung der mittels des eigenen Materialmodells ermittelten Schalungshöhen-Frischbetondruckbeziehungen

Das Diagramm skizziert die  $h$ - $\sigma_h$ -Verläufe für Betone als BINGHAM-Stoff (mit Fließgrenze) und als NEWTON-Material (ohne Fließgrenze). Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass die Charakteristik der  $h$ - $\sigma_h$ -Beziehung bei gegebener Frischbetonwichte  $\gamma$ , Schalwanddicke  $d$  und Schalungshöhe  $h$  im Wesentlichen durch die Fließgrenze sowie die Einbaugeschwindigkeit beeinflusst wird. Entsprechend den Eigenschaften einer NEWTON-Flüssigkeit führt Gleichung 5.12 zu einer linearen  $h$ - $\sigma_h$ -Beziehung. Bei Ausbildung eines Fließwiderstands (z. B. eines BINGHAM-Materials) weicht ab einer gewissen Einbaugeschwindigkeit der  $h$ - $\sigma_h$ -Verlauf von der Linearität einer NEWTON-Flüssigkeit ab. Dies führt zu einer Reduzierung des maximalen Frischbetondrucks.

Dem oben dargestellten  $\sigma_h$ - $h$ -Diagramm sind hinsichtlich des Frischbetondruckverlaufs – insbesondere mit  $\tau_0 \neq 0$  – die nachstehenden Kennwerte zugrunde gelegt:  $v = 3,5$  m/h bzw. 14 m/h,  $C_{\text{thix}} = 1,8$  kN/(m<sup>2</sup>·h),  $d = 25$  cm,  $h = 10$  m,  $\gamma = 23,5$  kN/m<sup>3</sup>.

Dabei ging es alleine darum, zu zeigen, dass keine einheitliche charakteristische Schalungshöhen-Frischbetondruckbeziehung anhand des in der Gleichung 5.12 formulierten Werkstoffmodells abgebildet wird. Besonders der Betonfließgrenze kommt eine entscheidende Bedeutung zu. Entsprechend wurde bei der Wahl der o. g. Kennwerte darauf geachtet, dass diese baupraktisch realistischen Bedingungen entsprachen.

### 5.2.3 Überprüfung des physikalischen Materialmodells

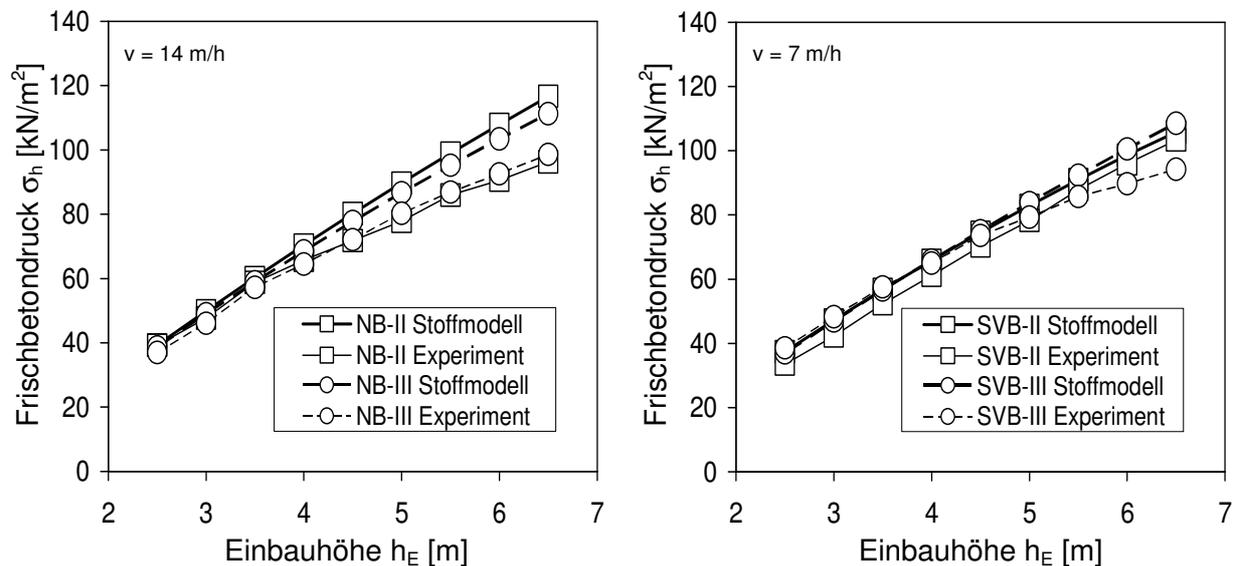
Die Bestimmung des Frischbetondrucks der untersuchten normalen und selbstverdichtenden Betone sollte anhand der in Abschnitt 5.2.2 erarbeiteten mathematischen Formulierungen uneingeschränkt möglich sein. Ob der entwickelte Ansatz den gestellten Ansprüchen auch wirklich gerecht wird, wird in den nun nachstehenden Ausführungen sondiert. Die dabei zugrunde gelegte Verfahrensweise setzt sich aus den folgenden Arbeitsschritten zusammen:

- 1) Wahl der Eingangsparameter  $v$ ,  $d$  ( $= 0,25$  m, siehe Abschnitt 3.3.2.1) und  $h_E$ . Hierfür wird ein Parameterpool aus den im Rahmen der experimentellen Untersuchungen verwendeten Größen gebildet.
- 2) Festlegung der Stoffkenngrößen  $\gamma$  und  $C_{\text{thix}}$ . Diese ergeben sich entsprechend dem jeweiligen Beton aus den in den Abschnitten 3.3.3.2 ( $\gamma$  aus der Mischungszusammensetzung) bzw. 4.1.5.2 ( $C_{\text{thix}}$  als Regressionsbeiwert der Fließgrenzen-Zeitbeziehung) ermittelten bzw. eingeführten Werten.
- 3) Berechnung des horizontalen Frischbetondrucks  $\sigma_h$  nach Gleichung 5.12.
- 4) Bestimmung der Frischbetondruck-Einbauhöhenbeziehung (in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit) sowie der Frischbetondruck-Einbaugeschwindigkeitsbeziehung (bei einer bestimmten Einbauhöhe) mittels der unter Arbeitsschritt 3) berechneten Ergebnisse.

- 5) Vergleich der unter Arbeitsschritt 4) ermittelten Beziehungen mit den in Abschnitt 4.1 dargestellten Zusammenhängen ( $\sigma_h$ - $h_E$ -Beziehung, siehe Abschnitt 4.1.6 bzw.  $\sigma_h$ - $v$ -Beziehung, siehe Abschnitt 4.1.3).

Anhand der Durchführung des nachfolgenden Arbeitsschritts 5) wird gezeigt, dass die nach den Arbeitsschritten 1) bis 3) berechnete Schalungsbeanspruchung gut mit den experimentellen Ergebnissen des Abschnitts 4.1 übereinstimmt und folglich eine wirklichkeitsnahe Bestimmung des Frischbetondrucks ermöglicht.

Bild 5.7 zeigt exemplarisch eine Gegenüberstellung der rechnerisch ermittelten  $\sigma_h$ - $h_E$ -Kurven mit den experimentell bestimmten Graphen am Beispiel der Normalbetone NB-II und NB-III (Bild 5.7, links) sowie der selbstverdichtenden Betone SVB-II und SVB-III (Bild 5.7, rechts).



**Bild 5.7:** Vergleich der nach dem physikalischen Stoffmodell bestimmten und der korrespondierenden experimentell erfassten Frischbetondruck-Einbauhöhenbeziehungen für die Betone NB-II und NB-III ( $v = 14$  m/h, links) bzw. SVB-II und SVB-III ( $v = 7$  m/h, rechts) – Messhöhe  $h = 0,75$  m; spezifische Beiwerte:  
 für NB-II:  $\gamma = 23,2$  kN/m<sup>3</sup>,  $C_{thix} = 1,6$  kN/(m<sup>2</sup>·h)  
 für NB-III:  $\gamma = 23,1$  kN/m<sup>3</sup>,  $C_{thix} = 2,0$  kN/(m<sup>2</sup>·h)  
 für SVB-II:  $\gamma = 23,1$  kN/m<sup>3</sup>,  $C_{thix} = 1,3$  kN/(m<sup>2</sup>·h)  
 für SVB-III:  $\gamma = 22,4$  kN/m<sup>3</sup>,  $C_{thix} = 1,0$  kN/(m<sup>2</sup>·h)

Dabei betragen die Einbauhöhen  $h_E = 2,5$  m, 3 m, 3,5 m, 4 m, 4,5 m, 5 m, 5,5 m, 6 m und 6,5 m. Als Einbaugeschwindigkeit wurden  $v = 7$  m/h (SVB-II und SVB-III) bzw. 14 m/h (NB-II und NB-III) gewählt. Die in Bild 5.7 abgebildeten Kurvenverläufe geben die an der Schalungs- bzw. Messhöhe  $h = 0,75$  m aufgetretenen Frischbetondrücke wieder. Bezüglich der experimentellen Ergebnisse wurden die mittleren (aus drei Einzelwerten bestimmten) Messwerte abgebildet. Die Stoffparameter  $\gamma$  und  $C_{thix}$ , die der Berechnung des Frischbetondrucks zugrunde liegen, sind für die einzelnen Betone in der Bildunterschrift enthalten.

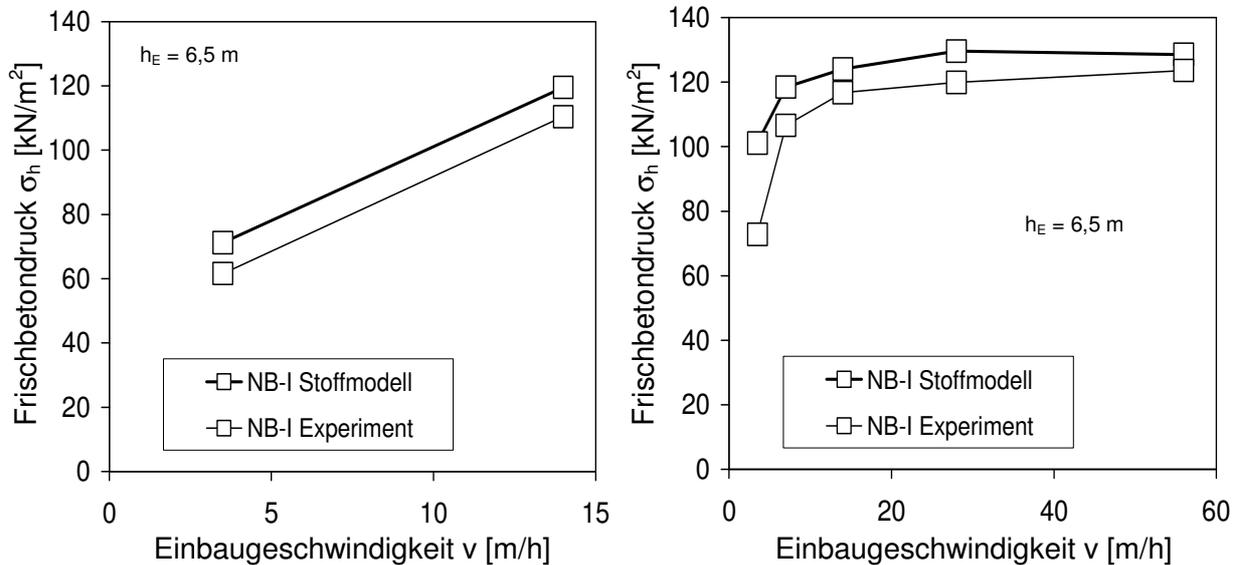
Aus dem Vergleich der bei einer Geschwindigkeit von  $v = 14$  m/h rechnerisch und experimentell bestimmten Frischbetondruck-Einbauhöhenbeziehungen für den Normalbeton NB-II bzw. NB-III ist anhand der Ergebniskurven ersichtlich, dass diese eine gute Übereinstimmung aufweisen (Bild 5.7, links). Eine gute Übereinstimmung zwischen Rechen- und Messwerten ergibt sich auch bei der in Bild 5.7, rechts dargestellten Gegenüberstellung der  $\sigma_h$ - $h_E$ -Beziehungen der selbstverdichtenden Betone SVB-II bzw. SVB-III ( $v = 7$  m/h). Die größte Abweichung der Rechenwerte von den Messergebnissen ist für die Normalbetone bei NB-II mit einem Betrag von  $20,5 \text{ kN/m}^2$  zu verzeichnen, siehe Bild 5.7, links. Für die selbstverdichtenden Betone beträgt diese bei SVB-III  $14,3 \text{ kN/m}^2$ . Diese Diskrepanzen liegen sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus sicherheitstechnischer Sicht durchaus in einem akzeptablen Bereich. So ist diesbezüglich in der Regel der rechnerisch ermittelte Frischbetondruck größer als der Messwert, jedoch befindet sich ihre Differenz in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen.

Die geringfügigen Abweichungen der rechnerisch ermittelten von den aus experimentellen Untersuchungen gewonnenen Kurven lassen sich u. a. durch die grundsätzliche Problematik rheometrischer Messungen (siehe Abschnitt 2.1.4.3) erklären. Diese mussten in Kauf genommen werden, da rheometrische Messungen prinzipiell mit einer Unwägbarkeit behaftet sind. Die Messwerte sind nur auf sehr komplexem Wege in absoluter Form erfassbar. Weicht der rheometrisch bestimmte  $C_{thix}$ -Wert auch nur geringfügig von dem tatsächlichen Wert ab, so wächst diese Diskrepanz infolge seiner Zeitabhängigkeit mit fortschreitender Zeit an, siehe Abschnitt 2.1.3.2.

Um zu prüfen, inwieweit die in den experimentellen Untersuchungen bestimmten Frischbetondruck-Einbaugeschwindigkeitsbeziehungen mittels des physikalischen Materialmodells abgebildet werden können, werden diese den entsprechenden Rechenwerten gegenübergestellt. Die experimentell bestimmten  $\sigma_h$ - $v$ -Beziehungen bei einer Einbauhöhe von  $6,5$  m und die zugehörigen rechnerisch ermittelten  $\sigma_h$ - $v$ -Beziehungen sind exemplarisch für den Normalbeton NB-I bzw. den selbstverdichtenden Beton SVB-I in Bild 5.8 dargestellt. An der Messhöhe  $h = 0,75$  m geben die abgebildeten Kurvenverläufe den dabei aufgetretenen (anhand von drei Einzelwerten bestimmten) mittleren Frischbetondruck in Abhängigkeit von den Einbaugeschwindigkeiten  $v = 3,5$  m/h und  $14$  m/h (NB-I) bzw.  $v = 3,5$  m/h,  $7$  m/h,  $14$  m/h,  $28$  m/h und  $56$  m/h (SVB-I) wieder. Für beide Betone sind die der Frischbetondruckermittlung zugrunde liegenden Stoffparameter  $\gamma$  und  $C_{thix}$  der Bildunterschrift zu entnehmen.

Im Rahmen der Gegenüberstellung der Frischbetondruck-Einbaugeschwindigkeitsbeziehungen ist sowohl für den Normalbeton NB-I (Bild 5.8, links) als auch für den selbstverdichtenden Beton SVB-I (Bild 5.8, rechts) festzustellen, dass diese gut übereinstimmen. Die Eignung des eigenen Materialmodells für eine praktische Anwendung wird besonders dadurch hervorgehoben, dass für alle betrachteten Einbaugeschwindigkeiten nicht nur die Rechenwerte des Normalbetons NB-I, sondern auch die des selbstverdichtenden Betons SVB-I grundsätzlich die experimentellen Messwerte überschreiten. Die größte Diskrepanz zwischen Rechenwerten und Messergebnissen ergibt sich für den Normalbeton NB-I mit  $9,6 \text{ kN/m}^2$  ( $v = 3,5$  m/h) sowie für den selbstverdichtenden Beton SVB-I zu  $28,3 \text{ kN/m}^2$  ( $v = 3,5$  m/h). Hinsichtlich der

Beurteilung der Gegenüberstellung der  $\sigma_h$ - $v$ -Beziehungen (und der damit verbundenen Diskrepanzen zwischen Rechen- und Messwerten) gelten die vorangegangenen Erläuterungen zu Bild 5.7.



**Bild 5.8:** Vergleich der nach dem physikalischen Stoffmodell bestimmten und der korrespondierenden experimentell erfassten Frischbetondruck-Einbaugeschwindigkeitsbeziehungen der Betone NB-I (links) und SVB-I (rechts) – Messhöhe  $h = 0,75 \text{ m}$ , Einbauhöhe  $h_E = 6,5 \text{ m}$ ; spezifische Beiwerte:  
 für NB-I:  $\gamma = 23,1 \text{ kN/m}^3$  bzw.  $23,5 \text{ kN/m}^3$ ,  $C_{thix} = 1,5 \text{ kN}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$   
 für SVB-I:  $\gamma = 23,3 \text{ kN/m}^3$ ,  $23,1 \text{ kN/m}^3$ ,  $23,2 \text{ kN/m}^3$  bzw.  $22,9 \text{ kN/m}^3$ ,  
 $C_{thix} = 0,8 \text{ kN}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,  $0,7 \text{ kN}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,  $0,9 \text{ kN}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,  $0,4 \text{ kN}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  bzw.  
 $1,1 \text{ kN}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

Gleichzeitig bestätigen die in Bild 5.8 dargestellten rechnerischen Frischbetondruck-Einbaugeschwindigkeitsbeziehungen, dass der prägnante Einfluss der Einbaugeschwindigkeit auf den Frischbetondruck in einem Bereich zwischen  $v = 3,5 \text{ m/h}$  bis  $7 \text{ m/h}$ , ein leichter in einem Bereich von  $7 \text{ m/h}$  bis  $28 \text{ m/h}$  sowie die annähernd lineare Charakteristik bei Einbaugeschwindigkeiten  $v > 28 \text{ m/h}$  (siehe Abschnitt 4.1.3) anhand des Materialmodells wirklichkeitsnah wiedergegeben werden.

## 5.2.4 Gegenüberstellung mit aus der Literatur bekannten Berechnungsmodellen

Der vorangegangene Abschnitt 5.2.3 diente der Überprüfung der generellen Gültigkeit des in Gleichung 5.12 hergeleiteten physikalischen Materialmodells anhand der Gegenüberstellung rechnerischer und experimentell ermittelter Frischbetondrucke. Im Weiteren soll nun die Frischbetondruckverteilung über die Schalungshöhe überprüft und gleichzeitig exemplarisch mit anderen Modellvorstellungen sowie Regelwerken verglichen werden. Aus der Literatursichtung (Abschnitt 2.5) ging hervor, dass derzeit verschiedene Konzepte zur Frischbetondruckbestimmung herangezogen werden. Diese lassen sich grundsätzlich in boden-, schüttgut-, hydromechanische, rheologische und empirische Ansätze einteilen. Im Rahmen der in

diesem Abschnitt 5.2.4 durchgeführten Modellgegenüberstellungen wird darauf geachtet, dass das eigene Materialmodell jeweils exemplarisch mit Konzepten verglichen wird, welche das Erstarrungsverhalten bzw. den zeitlichen Einfluss auf den Frischbetondruck berücksichtigen. Dabei ist zu beachten, dass den fremden Konzepten andere Kenngrößen zugrunde liegen können, als dem eigenen Stoffgesetz, siehe Abschnitt 2.5.

Die Vorgehensweise entsprach zunächst den Arbeitsschritten 1) bis 3) der in Abschnitt 5.2.3 gewählten Methodik. Abweichend davon wurden für den weiteren Ablauf nachfolgende Arbeitsschritte durchgeführt:

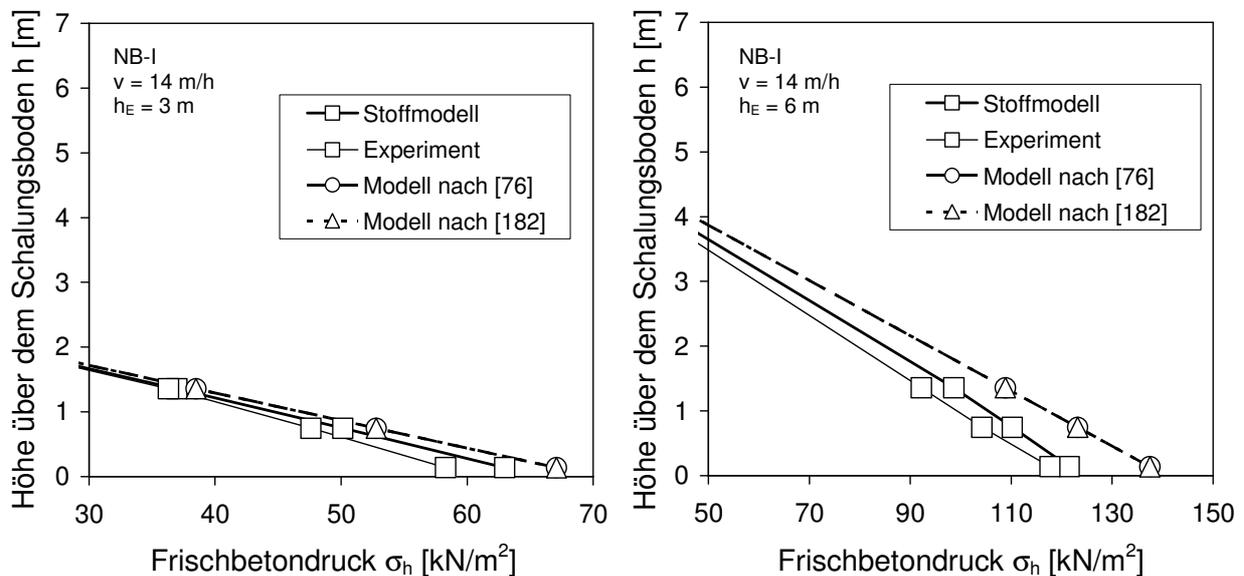
- 4) Ermittlung der Frischbetondruck-Schalungshöhenbeziehung durch die in Punkt 3) (siehe Abschnitt 5.2.3) berechneten Werte mit den entsprechenden Schalungshöhen.
- 5) Errechnung des Frischbetondrucks  $\sigma_h$  nach den entsprechenden Gleichungen fremder Berechnungsverfahren.
- 6) Bestimmung der fremden Frischbetondruck-Schalungshöhenbeziehung mit Hilfe der in Punkt 5) ermittelten Werte.
- 7) Vergleich der unter Arbeitsschritt 6) bestimmten mit den in Punkt 4) ermittelten Beziehungen.

Der Arbeitspunkt 4) wird die Erkenntnisse des vorangegangenen Abschnitts 5.2.3 bestätigen, dass die rechnerisch ermittelten Frischbetondruck-Schalungshöhenbeziehungen eine gute Übereinstimmung mit dem experimentellen vertikalen Druckverlauf aufweisen. Ferner wird im Rahmen der Abgrenzung zu fremden Berechnungsmodellen für den Frischbetondruck erkennbar (Arbeitsschritt 6)), dass das eigene Stoffmodell aufgrund seines physikalischen und mechanischen Fundamentes nicht die Schwächen anderer Modelle aufweist (siehe Abschnitt 2.5).

#### ***Vergleich mit bodenmechanischen (mit Erstarrung) und empirischen Konzepten***

Anhand der (in Abschnitt 4.1 durchgeführten) Parameterstudie konnte gezeigt werden, dass die in Punkt 3) (siehe Abschnitt 5.2.3) genannte Methodik die Bestimmung der stoffgesetzlichen Zusammenhänge der in den Experimenten untersuchten Kenngrößen ermöglicht. In Bild 5.9 sind für den Normalbeton NB-I sowohl bei einer Einbauhöhe  $h_E = 3$  m als auch bei  $h_E = 6$  m beispielhaft die rechnerischen Frischbetondruck-Schalungshöhenbeziehungen nach dem eigenen Stoffmodell und anderer Modellvorstellungen dargestellt. Für den Normalbeton NB-I sind dies für eine Einbaugeschwindigkeit  $v = 14$  m/h die der Norm [51] zugrunde liegenden [183] in [76] (empirisches Konzept) sowie in [182] (bodenmechanisches Konzept mit Erstarrung) dargestellten Berechnungsmethoden. Um den Frischbetondruck von Normalbeton zu bestimmen, werden häufig bodenmechanische oder empirische Konzepte herangezogen, siehe Abschnitt 2.5.7. Bild 5.9 zeigt zudem die zugehörigen, experimentell erfassten Verläufe

der mittleren (an drei Messpunkten bestimmten) Frischbetondrücke über die Schalungshöhe. Die zugehörigen Stoffparameter  $\gamma$  und  $C_{thix}$  sind in der Bildunterschrift enthalten.



**Bild 5.9:** Gegenüberstellung der nach dem physikalischen Stoffmodell bestimmten, der korrespondierenden experimentell erfassten sowie der nach fremden Modellvorstellungen ermittelten Frischbetondruck-Schalungshöhenverläufe für den Normalbeton NB-I ( $v = 14$  m/h) bei einer Einbauhöhe von  $h_E = 3$  m (links) und  $h_E = 6$  m (rechts); spezifische Beiwerte:  $\gamma = 23,5$  kN/m<sup>3</sup>,  $C_{thix} = 1,5$  kN/(m<sup>2</sup>·h)

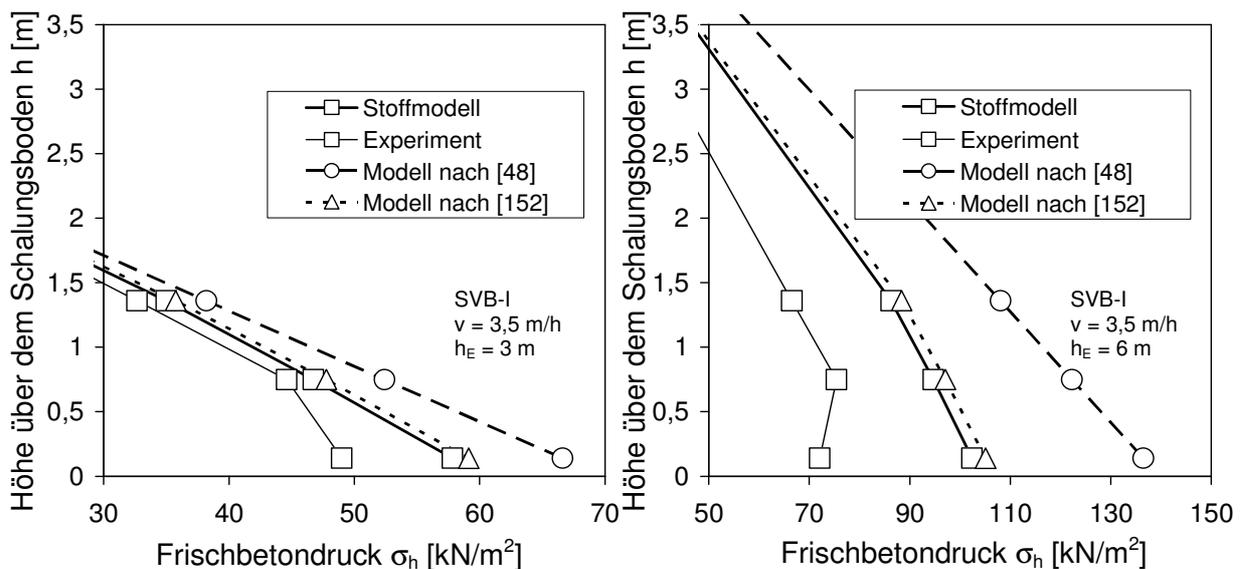
Aus Bild 5.9 ist zu erkennen, dass sowohl für eine Einbauhöhe  $h_E = 3$  m (Bild 5.9, links) als auch für  $h_E = 6$  m (Bild 5.9, rechts) die Frischbetondruckverteilung der experimentellen Messwerte über die Schalungshöhe mittels des eigenen Stoffmodells für den Normalbeton NB-I gut angenähert wird. Für die untersuchten Schalungshöhen liegen die eigenen Rechenwerte durchgehend über den Messergebnissen (siehe Ausführungen zu Bild 5.7), sind aber geringer als die Frischbetondrücke nach den beiden hinzugezogenen Referenzmodellen in [76] sowie [182]. Mit zunehmender Einbauhöhe sind die Unterschiede zwischen den eigenen Rechenwerten und den Ergebnissen der Referenzmodelle ([76] und [182]) stärker ausgeprägt. Diese beträgt bezüglich den Modellen in [76] bzw. [182] bei einer Einbauhöhe von 3 m bis zu 6,1 % (Messhöhe 0,14 m). Bei einer Einbauhöhe von 6 m ergeben sich hinsichtlich der beiden genannten Modelle prozentuale Abweichungen von bis zu 11,6 % (Messhöhe 0,14 m).

Die Ursachen für die relative Ungenauigkeit der genannten Modellvorstellungen wurden bereits ausführlich in der Literatursichtung (siehe Abschnitt 2.5) erläutert. Dabei ist besonders deren Beschränkung bezüglich der Einbaugeschwindigkeit hervorzuheben, welche dazu führt, dass bei beiden Vorhersagemethoden für Einbaugeschwindigkeiten  $v > 7$  m/h grundsätzlich ein hydrostatischer Druckansatz gewählt wird. Darüber hinaus erweist sich dieser durchgehend hydrostatische Ansatz in Bezug auf größere Einbauhöhen (infolge des thixotropie- bzw. strukturaufbaubedingten zunehmenden Druckabfalls) als äußerst unwirtschaftlich. So werden

das stoffphysikalische Verhalten und damit die durch die thixotropen Eigenschaften (bzw. den Strukturaufbau) bestimmte zeitliche Frischbetondruckentwicklung vernachlässigt. Anhand seiner vollkommen stoffphysikalischen Charakteristik weist das eigene Materialmodell derartige Schwächen nicht auf (siehe Abschnitt 5.2.2).

### **Vergleich mit schüttgutmechanischen (mit Erstarrung), hydromechanischen und rheologischen Konzepten**

Zur Beurteilung des eigenen Stoffmodells für die Verwendung von selbstverdichtendem Beton (hier SVB-I) wurden exemplarisch die Berechnungsansätze in der Richtlinie [48] (hydromechanisches Konzept) sowie [152] (rheologisches Konzept) herangezogen (Bild 5.10, zugrunde gelegte Beiwerte sind der Bildunterschrift zu entnehmen). Bei dem dargestellten Ergebnisvergleich betrug die Einbaugeschwindigkeit  $v = 3,5$  m/h. Auch für den Fall des selbstverdichtenden Betons SVB-I liegen nicht nur bei einer Einbauhöhe von  $h_E = 3$  m (Bild 5.10, links), sondern auch bei  $h_E = 6$  m (Bild 5.10, rechts) die Rechenwerte des eigenen Materialmodells durchgehend über den mittleren (an drei Messpunkten bestimmten) Ergebnissen (siehe Erläuterungen zu Bild 5.7) und unter den rechnerischen Werten anderer Modelle ([48] und [152]).



**Bild 5.10:** Gegenüberstellung der nach dem physikalischen Stoffmodell bestimmten, der korrespondierenden experimentell erfassten sowie der nach fremden Modellvorstellungen ermittelten Frischbetondruck-Schalungshöhenverläufe für den selbstverdichtenden Beton SVB-I ( $v = 3,5$  m/h) bei einer Einbauhöhe von  $h_E = 3$  m (links) und  $h_E = 6$  m (rechts); spezifische Beiwerte:  $\gamma = 23,3$  kN/m<sup>3</sup>,  $C_{thix} = 0,8$  kN/(m<sup>2</sup>·h)

Die Diskrepanzen der eigenen Rechenergebnisse zu denen anderer Modelle ([48] und [152]) nehmen mit zunehmender Einbauhöhe (und damit Einbauzeit) ebenfalls zu (Berücksichtigung der Thixotropie gilt im Rahmen des eigenen Modells auch für den Seitendruckbeiwert [siehe

Abschnitt 5.2.2.3]). Bei einer Einbauhöhe von 3 m betragen diese hinsichtlich dem Konzept in [48] bis zu 13,2 % (Messhöhe 0,14 m) bzw. 24,5 % (Messhöhe 0,14 m) bei einer Einbauhöhe von 6 m. Im Vergleich zu dem Modell in [152] (für  $K = 1$ , siehe Gleichung 2.21) sind die eigenen Rechenwerte um bis zu 2,2 % (Messhöhe 0,14 m) für  $h_E = 3$  m sowie bis zu 2,6 % (Messhöhe 0,14 m) für  $h_E = 6$  m reduziert.

Wie bereits im Hinblick auf Bild 5.9 (Normalbeton) erwähnt, erklären sich die Differenzen zu den anderen Modellen (siehe Bild 5.10) aus den in der Literatursichtung (siehe Abschnitt 2.5) genannten kritischen Merkmalen. Das hydromechanische Konzept [48] berücksichtigt weder einen zeitlichen noch einen thixotropen Einfluss bzw. Strukturaufbaueinfluss für die Bestimmung des Frischbetondrucks. Wie Bild 5.10 zeigt, kann dies zu einer drastischen Überschätzung der wirklichen Verhältnisse führen. Die Diskrepanz zu dem in [152] vorgestellten Modell ergibt sich aus dem unterschiedlichen Seitendruckbeiwert. Während dieser in [152] (in Abhängigkeit vom Luftporengehalt) konstant gehalten wird, berücksichtigt der eigene ebenfalls den auftretenden Thixotropie- bzw. Strukturaufbaueinfluss und ermöglicht eine noch genauere und vollkommen stoffphysikalische Beschreibung des Frischbetondrucks. Dies macht sich umso bemerkbarer, je höher die jeweiligen  $C_{\text{thix}}$ -Werte sind bzw. je geringer die Einbaugeschwindigkeit ist.

Eine Gegenüberstellung mit dem in [130] vorgestellten rheologischen Modell (siehe Abschnitt 2.5.4) macht keinen Sinn, da die darin angegebenen Seitendruckbeiwerte lediglich für die beschriebenen experimentellen Untersuchungen gelten.

Der Vergleich mit dem in [157] vorgestellten schüttgutmechanischen Konzept (mit Erstarrung) ist aufgrund der bereits in der Literatursichtung aufgezeigten Defizite (siehe Abschnitt 2.5.2) nicht auf einfachem rechnerischen Wege in der in Bild 5.10 gegebenen Form bzw. nur mittels einer numerischen Integration möglich (die in [157] vorgestellte Gleichung kann für die Kenngrößen  $\mu(t)$  und  $\lambda(t)$  nicht geschlossen gelöst werden, siehe Abschnitt 2.5.2 bzw. [157]). Die genannte Modellvorstellung lässt lediglich die Bestimmung eines maximalen Frischbetondruck-Grenzwertes zu. Dieser ergibt sich für die Bild 5.10 zugrunde gelegten Bedingungen (Erstarrungszeit ca. 5,5 h, siehe [99], unbewehrtes Bauteil) und der Einbauhöhe 3 m zu dem entsprechenden hydrostatischen Frischbetondruck, siehe [48] in Bild 5.10. Für die Einbauhöhe 6 m ergibt sich der maximale Frischbetondruck-Grenzwert nach dem vereinfachten Verfahren (Erstarrungsmodell ohne Silowirkung) zu  $130,4 \text{ kN/m}^2$ . Ein Vergleich zeigt infolgedessen die gleiche Diskrepanz zu dem eigenen Modell wie der Rechenwert nach [48] ( $h_E = 3$  m) bzw. eine Differenz von 21,5 % ( $h_E = 6$  m). Die Ursachen dafür wurden ebenfalls bereits in Abschnitt 2.5.2 eingehend erläutert. Diesbezüglich sind insbesondere der Ansatz der Schalungsreibung sowie die Vernachlässigung rheologischer Einflüsse (insbesondere der Thixotropie bzw. des Strukturaufbaus) zu nennen.

### 5.2.5 Vergleich mit aus Normen und Richtlinien bekannten Konzepten

Der vorangegangene Abschnitt 5.2.4 befasste sich mit der Gegenüberstellung des (in Abschnitt 5.2.2 hergeleiteten) physikalischen Materialmodells mit aus der Literatur bekannten

Berechnungsmodellen. Im Folgenden sollen nun die Einsparpotentiale für die Auslegung einer Schalung, bei der Verwendung des eigenen Modells anstatt der national gültigen Norm für Normalbeton [51] und der Richtlinie für selbstverdichtenden Beton [48], exemplarisch aufgezeigt werden. Die den genannten Bemessungsvorschriften zugrunde liegenden Ansätze basieren zum einen auf empirischen und bodenmechanischen (unter Berücksichtigung der Erstarrung) Grundlagen für Normalbeton bzw. auf einem hydrostatischen Ansatz für selbstverdichtenden Beton (siehe Abschnitt 2.5.6 bzw. 5.2.4).

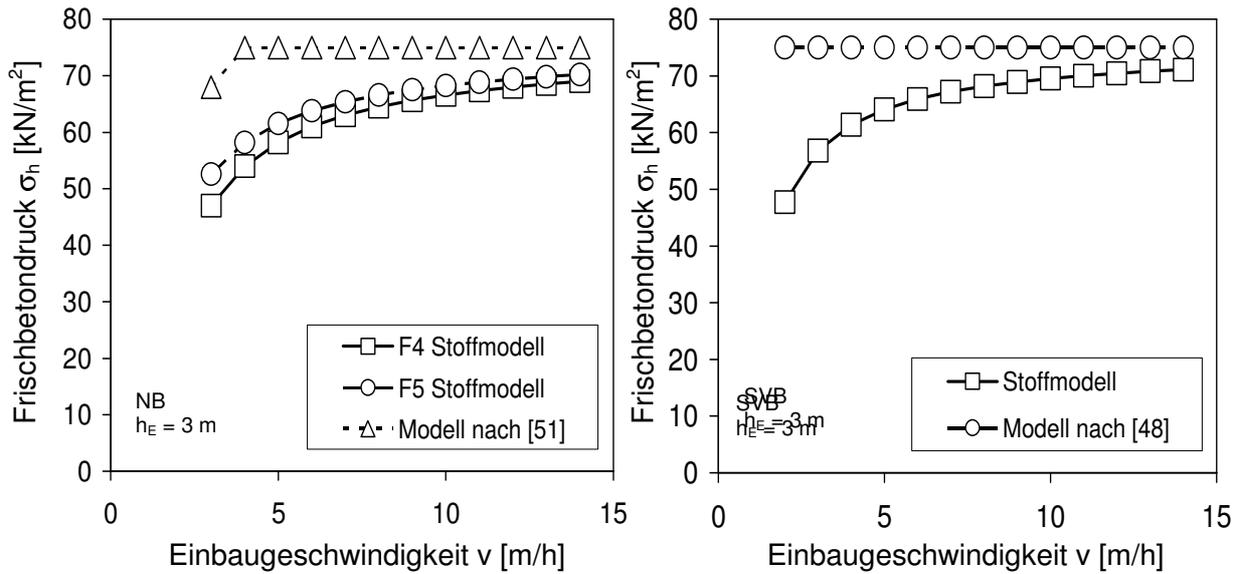
In diesem Zusammenhang ist zu beobachten, dass diese Berechnungsansätze z. T. auf anderen Kenngrößen basieren als das eigene Materialgesetz, siehe Abschnitt 2.5 bzw. 5.2.2. Entsprechend ergibt sich die gewählte Vorgehensweise aus den nachfolgenden Arbeitsschritten:

Wie bereits in Abschnitt 5.2.4 entsprach die Vorgehensweise zunächst den Arbeitsschritten 1) bis 3) der in Abschnitt 5.2.3 gewählten Methodik. Dabei wurden, u. a. aus Gründen der Vergleichbarkeit, unter Berücksichtigung von  $v_{\text{krit}}$  (siehe Abschnitt 5.2.2.4) auch Angaben aus den o. g. Bemessungsvorschriften zugrunde gelegt:

- 4) Ermittlung der Frischbetondruck-Einbaugeschwindigkeitsbeziehung (in Abhängigkeit von der Einbauhöhe) anhand der in Arbeitsschritt 3) bestimmten Ergebnisse.
- 5) Vergleich der unter Arbeitsschritt 4) bestimmten Beziehungen mit den in der Norm [51] bzw. Richtlinie [48] vorgegebenen Bemessungswerten.

Bild 5.11 zeigt für die im Hochbau praxisrelevante Einbauhöhe 3 m den Vergleich der eigenen rechnerischen Frischbetondrucke mit den Bemessungswerten der Norm [51] sowie der Richtlinie [48] (siehe auch [98]). Dabei sind aus Bild 5.11, links die Gegenüberstellungen für frischen Normalbeton sowie aus Bild 5.11, rechts die jeweiligen Bemessungswerte für frischen selbstverdichtenden Beton zu entnehmen.

Bild 5.11 zeigt, dass für eine praxisübliche Einbauhöhe  $h_E = 3$  m (unter der Annahme der im Rahmen der experimentellen Untersuchung gewonnenen bzw. in der Literatur angegebenen [siehe Abschnitt 2.1.3.2] Thixotropiekoeffizienten) das entwickelte Materialmodell (siehe Abschnitt 5.2.2) neben einer wirklichkeitsnahen auch eine ökonomische Frischbetondruckermittlung von sowohl Normalbeton als auch selbstverdichtendem Beton zulässt. Die Ursachen für diese Beobachtung wurden eingehend in Abschnitt 2.5 erläutert.



**Bild 5.11:** Gegenüberstellung der nach dem physikalischen Stoffmodell sowie der nach der Norm [51] bzw. der Richtlinie [48] ermittelten Einbaugeschwindigkeits-Frischbetondruckverläufe für Normalbeton (NB, links) bzw. selbstverdichtenden Beton (SVB, rechts) bei einer Einbauhöhe von  $h_E = 3$  m; spezifische Beiwerte:

$$\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{für NB (F4): } C_{thix} = 2,0 \text{ kN}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

$$\text{für NB (F5): } C_{thix} = 1,6 \text{ kN}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

$$\text{für SVB: } C_{thix} = 1,3 \text{ kN}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

Bild 5.11 zeigt, dass für eine praxisübliche Einbauhöhe  $h_E = 3$  m (unter der Annahme der im Rahmen der experimentellen Untersuchung gewonnenen bzw. in der Literatur angegebenen [siehe Abschnitt 2.1.3.2] Thixotropiekoeffizienten) das entwickelte Stoffmodell (siehe Abschnitt 5.2.2) neben einer wirklichkeitsnahen auch eine ökonomische Frischbetondruckermittlung von sowohl Normalbeton als auch selbstverdichtendem Beton zulässt.

Entsprechend betragen für Normalbeton die rechnerischen Frischbetondruckunterschiede zwischen dem eigenen Stoffmodell und der Norm [51] mindestens 8,0 % (F4,  $v = 14$  m/h) bzw. 6,4 % (F5,  $v = 14$  m/h). Hingegen ergeben sich die maximalen rechnerischen Frischbetondruckdifferenzen zu 30,9 % (F4,  $v = 4$  m/h) bzw. 22,6 % (F5,  $v = 4$  m/h). Die Gegenüberstellung der rechnerisch ermittelten Frischbetondrucke zwischen dem eigenen Stoffmodell und den Bemessungswerten der Richtlinie [48] ergibt Diskrepanzen in einem Bereich von 5,2 % ( $v = 14$  m/h) bis 36,4 % ( $v = 2$  m/h).

## 5.3 Rheologisch-mechanisches Stoffmodell

### 5.3.1 Grundsätzliche Erwägungen

Im Zuge der Herleitung des Stoffmodells zeigte die Literatursichtung, dass derzeit kaum Modelle zur Frischbetondruckbeschreibung existieren, die explizit externe mechanische Einflüsse berücksichtigen, siehe z. B. [29]. Hierbei erscheint eine Erweiterung des in Abschnitt 5.2 entwickelten rheologischen Stoffmodells sinnvoll. Dementsprechend gelten auch hier die bereits in Abschnitt 5.2.2.1 aufgeführten Annahmen.

Die Modellbezeichnung wurde gewählt, weil neben einem rheologischen Ansatz auch mechanische Elemente berücksichtigt werden. Die beiden mechanischen Komponenten (Einbaupuls und Schalungsverformung) bilden typische Beanspruchungen ab, die während und nach dem Betoneinbau auf die Schalung einwirken. Die Kombination aus rheologischen und mechanischen Modellkomponenten ermöglicht eine wirklichkeitsnahe Beschreibung des Frischbetondrucks unter Einbeziehung einbaumechanischer und schalungskonstruktiver Einflüsse.

Zur Berücksichtigung des Einflusses der Einbaugeschwindigkeit auf den Frischbetondruck wurden die Erkenntnisse der Ergebnisanalyse aus Abschnitt 4.1.3 verwendet. Im Rahmen der Diskussion der experimentellen Ergebnisse wurde gezeigt, dass im Hinblick auf die Abhängigkeit des Frischbetondrucks von der Einbaugeschwindigkeit eine Impulswirkung besteht. Dabei ist mit zunehmender Einbaugeschwindigkeit eine Erhöhung der zusätzlichen Vertikalbelastung auf den in die Schalung bereits eingebauten Beton zu verzeichnen.

Bezüglich des Einflusses der Schalhautdehnungen auf den Frischbetondruck hat die Diskussion der experimentellen Ergebnisse gezeigt (Abschnitt 4.1.4), dass diesbezüglich ein linearer Zusammenhang existiert. Dieser lässt sich in Form eines Schalungsbettungsmoduls modellieren. Aufgrund der Größe der Messwerte der Schalhautdehnung ist ihr Einfluss während des Betoneinbaus eher geringfügig, gewinnt aber im Rahmen des Hydratationsvorgangs (siehe Abschnitt 4.1.7) zunehmend an Bedeutung und ist für die Frischbetondruckabnahme von großer Relevanz.

### 5.3.2 Ableitung des Materialmodells

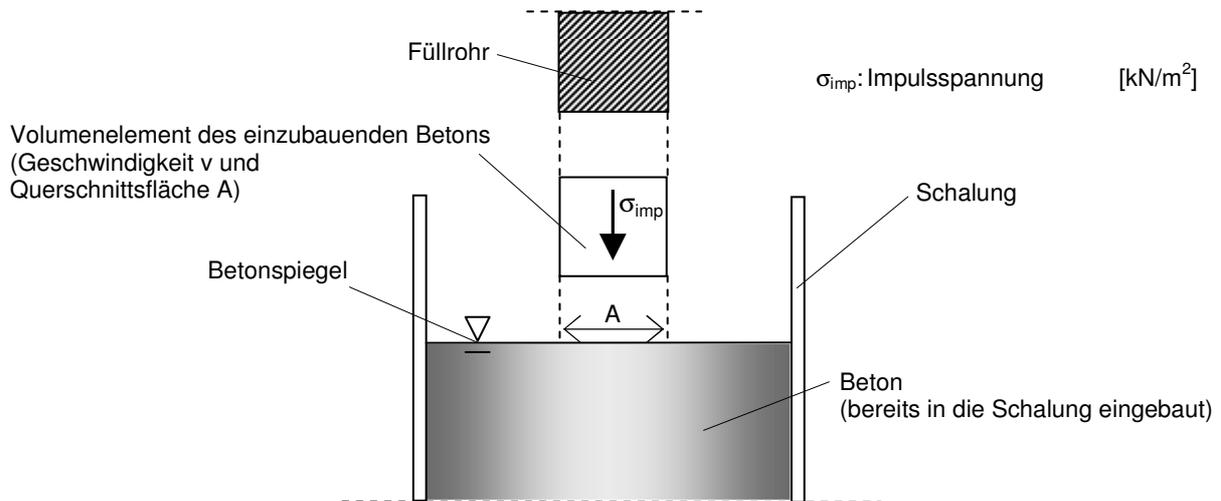
#### 5.3.2.1 Einarbeitung einbaumechanischer Einflüsse

Das in Abschnitt 5.2.2.3 vorgestellte Werkstoffmodell bildet den allein auf stoffphysikalischem Wege erzeugten Frischbetondruck ab. Um einen wirklichkeitsnahen baupraktischen Bezug gewährleisten zu können, ist eine zusätzliche Implementierung einbaumechanischer Belastungen unerlässlich. Diese wird in der vorliegenden Arbeit für den Betoneinbau „von oben“ in eine Schalung durchgeführt. Die Wirkung einbaumechanischer Einflüsse im Rahmen anderer Befüllungsverfahren (z. B. „von unten“) ist in der vorliegenden Arbeit nicht experimentell untersucht worden.

Bereits in Gleichung 5.12 ist die Kenngröße Einbaugeschwindigkeit enthalten. Diese wurde jedoch ausschließlich aufgrund ihres Zusammenhangs mit der Einbauhöhe (vgl. Gleichung

5.1) in die genannten Gleichungen einbezogen und gibt daher nicht die tatsächliche, während des Betoneinbaus auftretende einbaumechanische Zusatzbelastung wieder. Hingegen wird dies ermöglicht, indem die aus Gleichung 5.6 ermittelte Vertikallast  $\sigma_v$  nicht nur auf Grundlage der Frischbetonwichte  $\gamma$  bzw. des Betoneigengewichts errechnet, sondern auch die durch die Einbaubeschleunigung initiierte Impulsauflast berücksichtigt wird. Dies führt zu einer Modifizierung der o. g. Gleichungen, die durch eine einzige Kenngröße erweitert werden. Die übrigen Parameter bleiben in bekannter Form innerhalb der Gleichungsformulierung erhalten.

Die mathematische Formulierung der bei dem Betoneinbau in vertikale Schalungen auftretenden mechanischen Gesetzmäßigkeiten wurde in Anlehnung an die Impulsgleichung des 2. NEWTONschen Gesetzes erarbeitet, siehe [125]. Diese allgemeingültige kinematische Transportgleichung findet z. B. in der Hydromechanik bei der Beschreibung reibungsfreier sowie -behalteter Strömungen ihre Anwendung und ist dabei von signifikanter Bedeutung. Um diese Gesetzmäßigkeit auf den Frischbetonsdruck anwenden zu können, wird der in die Schalung einfließende Beton vor Auftreffen auf den bereits eingebauten als ebener Strahl angesehen. Dessen kinematisches Verhalten kann entsprechend dem aus der Hydromechanik bekannten Fall einer „ebenen Ablenkplatte“ erklärt werden. In diesem Zusammenhang wird der bereits in der Schalung befindliche Betonspiegel als die Ablenkplatte definiert, auf welche der noch einzubauende Beton in der Schalung auftrifft, vgl. [125] bzw. siehe Bild 5.12.



**Bild 5.12:** *Prinzipielle Darstellung der Impulswirkung während des Betoneinbaus in eine vertikale Schalung*

Unter Berücksichtigung dieser Annahme erfährt der bereits in die Schalung eingebaute Beton im Laufe des fortschreitenden Einbauvorgangs – zusätzlich zu dem Eigengewicht des noch einzubauenden Materials – in vertikaler Richtung eine Impulsbelastung. Diese führt unter Einbeziehung des Seitendruckbeiwerts zu einer Erhöhung des horizontalen Frischbetondrucks. Das Prinzip dieses Vorgangs wird in Bild 5.12 – unter Vernachlässigung der Verdichtungszone (Normalbeton) bzw. des Scherbereichs (selbstverdichtender Beton) – exemplarisch für die Verwendung eines Füllrohrs dargestellt. Hinsichtlich der physikalischen sowie mecha-

nischen Vorgänge und der daraus resultierenden strömungsmechanischen Effekte innerhalb des Verdichtungsbereichs (Normalbeton) bzw. der Scherzone (selbstverdichtender Beton) werden in diesem Abschnitt 5.3.2.1 keine Aussagen getroffen, da dies nicht Gegenstand der gegebenen Aufgabenstellung ist und in der zukünftigen Forschung gesonderter Behandlung bedarf.

Aus der schematischen Darstellung in Bild 5.12 lässt sich die Impulskraft, die sich aus dem Einbauprozess ergibt, nach Gleichung 5.16 wie folgt angeben:

$$F_{\text{imp}} = \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (5.16)$$

mit  $F_{\text{imp}}$ : Einbauimpulskraft [kN]  
 $\rho$ : Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]  
 $A$ : Querschnittsfläche des einzubauenden Volumenelements [m<sup>2</sup>]

Aus Gleichung 5.16 kann entsprechend der nachfolgenden Gleichung 5.17 die resultierende Einbauimpulsspannung abgeleitet werden:

$$\sigma_{\text{imp}} = \rho \cdot v^2 \quad (5.17)$$

mit  $\sigma_{\text{imp}}$ : Einbauimpulsspannung [kN/m<sup>2</sup>]

Mit vollständiger Schalungsbefüllung oder Unterbrechung des Einbauvorgangs kommen auch die in den Gleichungen 5.16 und 5.17 beschriebenen Impulseffekte zum Stillstand. Daher tritt die in diesem Abschnitt erarbeitete Einbauimpulsspannung (siehe Gleichung 5.17) explizit nur im Rahmen des Betoneinbaus auf und ist – bei gleichbleibender Einbaugeschwindigkeit – über den besagten Zeitraum konstant.

Anhand der oben hergeleiteten Gesetzmäßigkeiten kann nun eine Implementierung der einbaumechanischen Phänomene in das in Abschnitt 5.2.2.3 entwickelte Materialmodell erfolgen. Eine angemessene Berücksichtigung der Einbauimpulsspannung in dem in Bild 5.2 dargestellten Kräftegleichgewicht führt zu einer Modifizierung von Gleichung 5.4. Aufgrund der Größenordnung des Einbauimpulses (siehe Abschnitt 4.1.3) wird – auf der sicheren Seite liegend – auf eine weitere Spannungsabminderung innerhalb der Schalung verzichtet und im Folgenden die in Gleichung 5.17 angegebene Impulsspannung alleine als zusätzliche Vertikallast angesetzt. Während des Einbauvorgangs wird das sich einstellende Kräftegleichgewicht entsprechend Gleichung 5.18 in folgender Weise bestimmt:

$$\bar{\sigma}_v \cdot d + \gamma \cdot d \cdot dh_E + \sigma_{\text{imp}} \cdot \frac{d_A}{d} = d \cdot (\bar{\sigma}_v + d \bar{\sigma}_v) + 2 \cdot C_{\text{thix}} \cdot \frac{h_E}{v} \cdot dh_E \quad (5.18)$$

mit  $\bar{\sigma}_v$ : Einbauvertikalspannung mit Impuls [kN/m<sup>2</sup>]  
 $d_A$ : Füllrohrdurchmesser [m]

Eine Lösung dieser Gleichung ergibt somit für die Gesamteinbauspannung in vertikaler Richtung, siehe Gleichung 5.19:

$$\bar{\sigma}_v = \gamma \cdot h_E + \sigma_{\text{imp}} \cdot \frac{d_A}{d} - \frac{C_{\text{thix}} \cdot h_E^2}{v \cdot d} \quad (5.19)$$

Unter Einbeziehung des Horizontallastverhältnisses nach Gleichung 5.9 kann der horizontale Frischbetondruck  $\bar{\sigma}_h$  auf vertikale Schalungen während des Einbauvorgangs unter Berücksichtigung des Impulses anhand der nachfolgenden Gleichung 5.20 ermittelt werden:

$$\bar{\sigma}_h = \gamma \cdot h_E - \underbrace{\frac{C_{\text{thix}} \cdot h_E^2}{v \cdot d} - 2 \cdot C_{\text{thix}} \cdot \frac{h_E}{v}}_{\sigma_h} + \rho \cdot v^2 \cdot \frac{d_A}{d} \geq 0 \quad (5.20)$$

mit  $\bar{\sigma}_h$ : Frischbetondruck während Einbau mit Impuls [kN/m<sup>2</sup>]

Demzufolge wird im Laufe des Einbauvorgangs die Frischbetondruckbestimmung entsprechend der Gleichung 5.20 empfohlen, nach Beendigung oder Unterbrechung des Einbauvorgangs ist die Verwendung der Gleichung 5.12 ausreichend. Auf der sicheren Seite liegend und somit maßgebend ist für die Schalungsbemessung jedoch die innerhalb dieses Abschnitts 5.3.2.1 entwickelte Gleichung 5.20.

Da im Rahmen der experimentellen Untersuchungen die Einbauimpulse lediglich rechnerisch ermittelt wurden (siehe Abschnitt 4.1.3), bedarf es diesbezüglich weiterer Untersuchungen, um spezifische Werte zu gewinnen und eine explizite Überprüfung des Materialmodells (siehe Gleichung 5.20) durchführen zu können.

### 5.3.2.2 Entwicklung schalungskonstruktiver Beziehungen

Zur Vervollständigung des angestrebten wirklichkeitsnahen Bezugs des Werkstoffmodells muss als ein letztes Phänomen die Schalungsdurchbiegung bzw. -verformung berücksichtigt werden.

Aus den bisher im Rahmen dieses Kapitels entwickelten Gleichungen zur Bestimmung des Frischbetondrucks kann noch kein eindeutiger Zusammenhang mit der Schalungsdurchbiegung hergestellt werden. Allerdings bietet sich anhand der in Abschnitt 5.2.2.3 bzw. 5.3.2.1 vorgestellten Gesetzmäßigkeiten die Möglichkeit, diese in einer Form zu erweitern, die in Abhängigkeit von der jeweiligen Schalungssteifigkeit den Schalungsverformungen Rechnung trägt.

Zur Herleitung der Schalungsdurchbiegungs-Frischbetondruckbeziehung wird an dieser Stelle der Schalungsbettungsmodul eingeführt. Dessen Wirkungsweise entspricht dem aus der Bodenmechanik bekannten Bettungsmodul (siehe Abschnitt 4.1.4). Die hierfür gültigen Gleich-

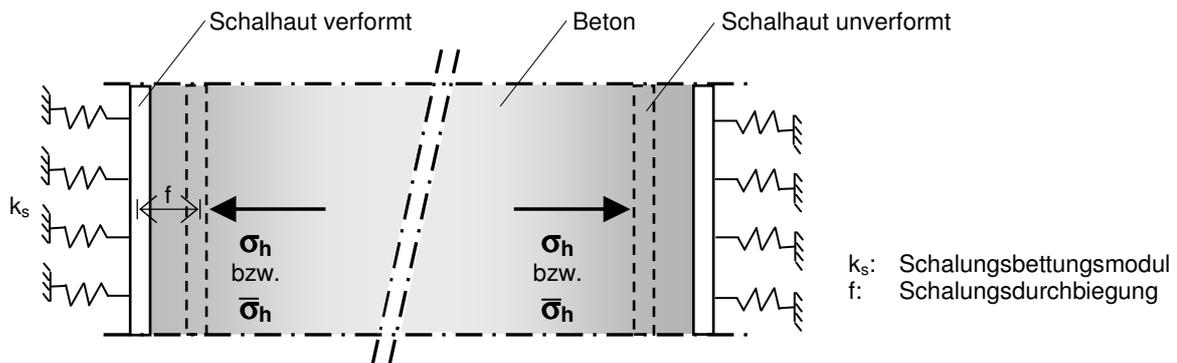
gewichtsbedingungen ergeben sich entsprechend den beiden folgenden Gleichungen 5.21 bzw. 5.22:

$$k_s = \frac{\sigma_h}{f} \quad (5.21)$$

$$\bar{k}_s = \frac{\bar{\sigma}_h}{f} \quad (5.22)$$

mit  $k_s$  bzw.  $\bar{k}_s$ : Schalungsbettungsmodul [kN/m<sup>3</sup>]  
 f: Schalungsdurchbiegung [m]

Die Gleichungen 5.21 bzw. 5.22 sind an die aus der Bodenmechanik bekannte Kenngröße Bettungsmodul angelehnt, siehe [185]. Entsprechend wird die Schalhaut bzw. das Schalungssystem als ein Federsystem angesehen. Dieses ist schematisch in dem nachfolgenden Bild 5.13 dargestellt.



**Bild 5.13:** Prinzip des Schalungsbettungsmoduls und der sich daraus ergebenden Biegelinie zur Beschreibung der Frischbetondruck-Schalungsdurchbiegungsbeziehungen am Beispiel eines infinitesimalen Schalungsvolumenelements

Somit entspricht die Mechanik des Verformungsverhaltens der Schalung resp. Schalhaut dem einer elastischen Bettung, siehe [185]. Gemäß den prinzipiellen Eigenschaften des aus der Bodenmechanik bekannten Bettungsmoduls bezeichnet der Schalungsbettungsmodul keinen Material- und damit Betonkennwert. Er stellt einen Schalungskennwert dar, welcher von den einzelnen Schalungsbestandteilen sowie der daraus konstruierten Schalung maßgeblich bestimmt wird. Eine Folge davon ist, dass sich weder in horizontaler, noch in vertikaler Schalungsrichtung eine konstante Verteilung des Schalungsbettungsmoduls einstellt. Bedingt durch die Zeitabhängigkeit des Frischbetondrucks und der entsprechenden Verformungen handelt es sich zudem indirekt auch um einen zeitlich veränderbaren Kennwert.

Die Festlegung der  $k_s$ -Werte, die sich in Abhängigkeit von der gewählten Schalung einstellen, ist aus den in Abschnitt 4.1.4 vorgestellten Ergebnissen nicht möglich und bedarf weiterführender Untersuchungen, insbesondere weil diese sich aus der Summe der einzelnen Schalungsbestandteile, wie u. a. Schalungsanker oder -träger, bilden. Folglich müssten bei unter-

schiedlichen Frischbetondruckzuständen für jedes dieser Systemteile die spezifischen Verformungen experimentell erfasst werden.

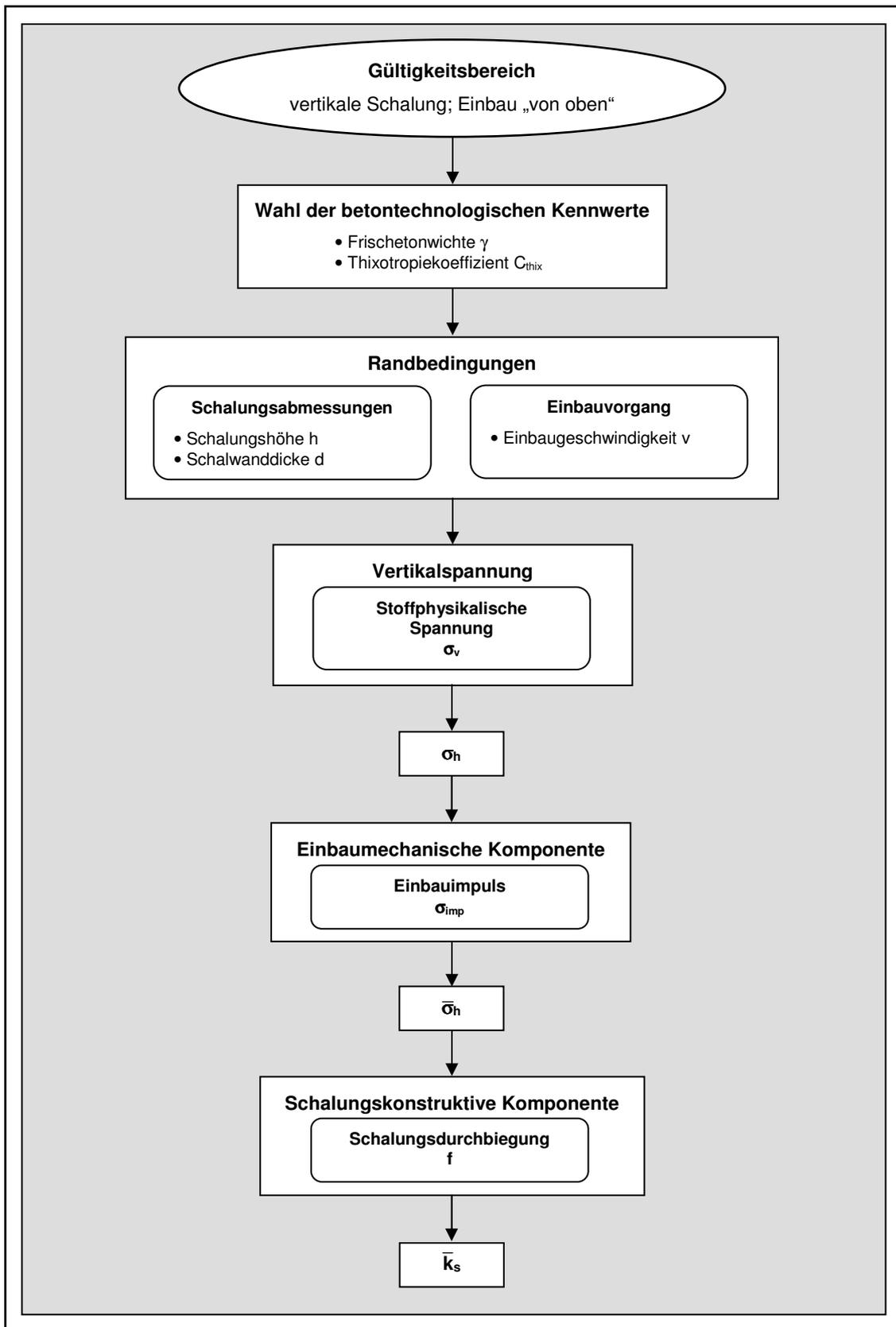
Im Bezug auf den fortschreitenden Hydratationsvorgang ist allerdings anzumerken, dass auch werkstoffspezifische Kennwerte einen Einfluss auf die Schalungsverformung ausüben können. Dabei sind insbesondere chemische bzw. lastabhängige Vorgänge zu nennen, welche das Betonvolumen und damit die Schalungsdurchbiegung beeinflussen. Diese sind z. B. das Schwinden  $\epsilon_{cs}$ , das Kriechen  $\epsilon_{cc}$  oder die Temperaturdehnung  $\epsilon_{cT}$  und müssten als betonspezifische Kennwerte in die oben aufgeführten Gleichungen eingebunden werden. Dementsprechend ergibt sich die Schalungsdurchbiegung nicht nur in Abhängigkeit von dem stoffphysikalisch und einbaumechanisch bedingten Frischbetondruck, sondern auch von betonspezifischen Kennwerten in der Form  $f(\sigma_h$  bzw.  $\bar{\sigma}_h, \epsilon_{cs}, \epsilon_{cc}, \epsilon_{cT}, \dots)$ .

Für den nach Erstarrungsende eingepprägten Frischbetondruck (siehe Abschnitt 4.1.7) und den in der Literatursichtung beschriebenen passiven Schalungsdruck (siehe Abschnitt 2.4.3) stellen die beiden Gleichungen 5.21 und 5.22 eine wirklichkeitsnahe Lösung dar. Diese nicht stoffphysikalische, sondern verformungsbedingte Schalungsbeanspruchung kann bei Kenntnis der betonspezifischen Durchbiegungskomponente  $f_{bet}(\epsilon_{cs}, \epsilon_{cc}, \epsilon_{cT}, \dots)$ , in Abhängigkeit von der jeweiligen Schalungssteifigkeit, unter Zuhilfenahme des Schalungsbettungsmoduls ermittelt und damit der eingepprägte bzw. passive Schalungsdruck bestimmt werden.

### 5.3.2.3 Zusammenführung der einbaumechanischen und schalungskonstruktiven Elemente

In den beiden vorangegangenen Abschnitten 5.3.2.1 und 5.3.2.2 wurde das physikalische Materialmodell (siehe Abschnitt 5.2.2.2) jeweils um die mechanischen Einwirkungen aus Einbaugeschwindigkeit und Schalungsdurchbiegung erweitert. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen nun an dieser Stelle zusammengeführt und gemeinsam in das physikalische Materialmodell implementiert werden.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung des Frischbetondrucks unter Berücksichtigung des stoffphysikalischen, einbaumechanischen und schalungskonstruktiven Verhaltens ergibt sich aus den Ausführungen der Abschnitte 5.2.2, 5.3.2.1 und 5.3.2.2. Bild 5.14 zeigt die erforderlichen Schritte zur Bestimmung des Frischbetondrucks unter Einbeziehung rheologischer und mechanischer Einflüsse. Hierfür müssen vor Beginn der Frischbetondruckermittlung die gewünschten Eingangsparameter zur Schalungsgeometrie (Höhe  $h$  und Schalwanddicke  $d$ ) und zum Einbauprozess (Geschwindigkeit  $v$ ) gewählt werden. Sollten keine Erfahrungswerte bekannt sein, sind die spezifischen Materialparameter (Wichte  $\gamma$  und Thixotropiekoeffizient  $C_{thix}$ ) im Rahmen von betontechnologischen Untersuchungen an einem Referenzbeton festzustellen. Die Rezeptur des einzubauenden Betons muss mit der des Referenzbetons übereinstimmen. Gleichzeitig sind dabei die zu erwartenden Umgebungsbedingungen einzuhalten.



**Bild 5.14:** Vorgehensweise zur Zusammenführung der einbaumechanischen und schalungskonstruktiven Elemente zur Bestimmung des Frischbetondrucks und der zugehörigen Ermittlung des Schalungsbettungsmoduls

Unter Berücksichtigung der stoffphysikalischen Eigenschaften und der einbaumechanischen Einflüsse können nun sowohl der physikalische Frischbetondruck  $\sigma_h$  als auch die Einbaupulsspannung  $\sigma_{imp}$  ermittelt werden. Beide zusammen ergeben die Frischbetondruckbeanspruchung  $\bar{\sigma}_h$ . Abschließend kann in Abhängigkeit von der Schalungssteifigkeit und damit von der spezifischen Frischbetondruck-Schalungsverformungsbeziehung der Schalungsbettungsmodul  $\bar{k}_s$  bestimmt werden.

Die Darstellung in Bild 5.14 gilt für den für die Schalungsbemessung maßgebenden Einbauvorgang. Des Weiteren wurden bei dieser vereinfachten Abbildung die sich aus chemischen und lastabhängigen Vorgängen ergebenden betonspezifischen Kennwerte (siehe Abschnitt 5.3.2.2) vernachlässigt.

Bei Einhaltung der in Bild 5.14 dargestellten Vorgehensweise lassen sich sämtliche stoffphysikalischen und mechanischen Vorgänge im Rahmen der Schalungsbelastung durch Betone darstellen. Aufgrund der Erkenntnisse der Abschnitte 5.3.2.1 und 5.3.2.2 ergibt sich daraus für den Einbauvorgang die Formulierung der Gleichung 5.23, welche die einbaumechanischen und schalungskonstruktiven Modellanteile zusammenführt:

$$\bar{k}_s \cdot f = \underbrace{\gamma \cdot h_E - \frac{C_{thix} \cdot h_E^2}{v \cdot d} - 2 \cdot C_{thix} \cdot \frac{h_E}{v}}_{\sigma_h} + \rho \cdot v^2 \cdot \frac{d_A}{d} \quad (5.23)$$

Wie die Gleichung 5.23 zeigt, stehen bei einer wirklichkeitsnahen Betrachtung die Verformungen der Schalung im Gleichgewicht mit den auftretenden Beanspruchungen. Für die befüllte Schalung entfallen die einbaumechanischen Anteile. Entsprechend werden anstelle des Schalungsbettungsmoduls  $\bar{k}_s$  bzw. der Frischbetonbeanspruchung  $\bar{\sigma}_h$  (Abschnitt 5.3.2.1) in den beiden o. g. Gleichungen alleine die Parameter  $k_s$  bzw.  $\sigma_h$  verwendet (s. o.).

## 5.4 Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen dieses Kapitels wurden zwei neue Stoffmodelle (physikalisches und rheologisch-mechanisches Modell) zur Ermittlung der Frischbetondruckbelastung ausgearbeitet. Dabei wurden lineare Frischbetondruck-Rheologiebeziehungen gewählt. Diese werden, neben den geometrischen und einbautechnologischen Parametern (rheologisch-mechanisches Modell), alleine durch die Fließgrenze  $\tau_0(t)$  definiert (physikalisches und rheologisch-mechanisches Modell). Auf der Grundlage der Erkenntnisse der Literatursichtung ist in dieser Kenngröße der Einfluss aller weiteren Werkstoffparameter enthalten.

An die Entwicklung der beiden Stoffgesetze wurden hohe Ansprüche gestellt. Einerseits sollten sie auf eindeutigen physikalischen Beziehungen gründen (physikalisches und rheologisch-mechanisches Materialmodell), andererseits aber auch den einbaumechanischen und schalungskonstruktiven Phänomenen Rechnung tragen (rheologisch-mechanisches Materialmodell). Das stoffphysikalische Verhalten des Frischbetons innerhalb der Schalung konnte in

Verbindung mit dem Kräftegleichgewicht nach JANSSEN abgebildet werden. Für die Bestimmung des Seitendruckbeiwerts wurde der MOHRsche Spannungskreis hinzugezogen. Aufbauend auf dem erarbeiteten rheologischen Modell konnte nun in Anlehnung an das 2. NEWTONsche Gesetz die mathematische Formulierung des einbaumechanischen Impulses erfolgen, der den Einfluss der Einbaugeschwindigkeit während des Einbauvorgangs modelliert. Zusätzlich wurde eine mechanische Beziehung ausgearbeitet, welche das Verhältnis von Frischbetondruck und -durchbiegung – nach dem Prinzip des aus der Bodenmechanik bekannten Bettungsmoduls – auf einfache Weise in Form des Schalungsbettungsmoduls beschreibt.

Mittels der anschließend durchgeführten Überprüfung konnte die Nutzbarkeit des neu entwickelten physikalischen Materialmodells nachgewiesen werden. Dabei wurden die stoffmodellierten Zusammenhänge für verschiedene Einbaugeschwindigkeiten auf die experimentell untersuchten Einbauhöhen bezogen. Der Vergleich der theoretischen mit den experimentell erfassten Beziehungen ergab eine prinzipiell richtige Wiedergabe des Frischbetondrucks durch das physikalische Materialmodell. Darüber hinaus zeigte die Gegenüberstellung der theoretischen Vorhersage mit den experimentellen Ergebnissen und ausgewählten anderen Modellvorstellungen, dass das eigene Stoffmodell am ehesten die Voraussetzungen für eine vollkommen stoffphysikalische Formulierung und allgemeingültige baupraktische Anwendung erfüllt.

Anhand der Formulierung des Stoffmodells kann sowohl der Frischbetondruck von Normalbeton als auch von selbstverdichtendem Beton beschrieben werden. Im Hinblick auf eine Anwendbarkeit von Normalbeton wurden im Rahmen der experimentellen Untersuchungen lediglich verschiedene Normalbetone der Konsistenzklasse F4 bis F5 untersucht.

Beide Stoffgesetze wurden auf der Basis der experimentellen Untersuchungen von je drei Normalbetonen und drei selbstverdichtenden Betonen abgeleitet. Dabei waren die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale ihr jeweiliger Zement-, Gesteinskörnungs- und Fließmittelgehalt. Dennoch könnten sie auch zur Beschreibung des Frischbetondrucks anderer Betone, wie z. B. Leichtbeton etc., angewendet werden. Für das physikalische bzw. rheologisch-mechanische Materialmodell wäre im Idealfall lediglich die Ermittlung der jeweiligen  $\tau_0(t)$ -Funktion erforderlich. Hinsichtlich verschiedener Betonarten, wie z. B. Leichtbeton, Stahlfaserbeton, hochfestem Beton, ultrahochfestem Beton sowie den korrespondierenden selbstverdichtenden Betonen, existieren diesbezüglich noch keinerlei Erkenntnisse. Ein wesentliches Kriterium für den spezifischen Frischbetondruck der genannten Betone werden ihre rheologischen Eigenschaften sein. Bei einer verminderten Fließfähigkeit führt dies hinsichtlich der Schalungsbemessung zu hohen Einsparungspotentialen.

Im Hinblick auf das Hydratationsverhalten bedarf es allerdings gesonderter Untersuchungen, welche die Rolle der dabei auftretenden Vorgänge, wie z. B. Schwinden oder Quellen, und den damit verbundenen passiven Frischbetondruck klären. Eine Möglichkeit hierfür wäre die Einführung zusätzlicher Materialkennwerte.

## 6 Folgerungen für die Baupraxis

Die wesentliche Bedeutung der neuen Materialmodelle liegt darin, dass unter Einbeziehung der rheologischen Eigenschaften (physikalisches und rheologisch-mechanisches Materialmodell) sowie der einbaumechanischen und schalungskonstruktiven Einflüsse (rheologisch-mechanisches Stoffmodell) der Frischbetondruck und die sich daraus ergebende Schalungsbemessung von sowohl frischem Normalbeton (hier u. a. auch am Beispiel von Fließbeton) als auch von selbstverdichtendem Beton präzise und wirtschaftlich berechnet werden können. Dies erlaubt den Einsatz weitaus wirtschaftlicher Schalungen als bei einer Bemessung nach den bisher verfügbaren Modellen (siehe Abschnitt 5.2.4), welche vielfach (bis auf wenige Ausnahmen, z. B. [152]) an Konzepte nicht zementgebundener Baustoffe angelehnt sind. Darüber hinaus bieten die eigenen Materialmodelle erstmalig einen betonartübergreifenden Ansatz. Dadurch wird vermieden, dass in Abhängigkeit von der Betonart verschiedene Bemessungsmethoden angewendet werden müssen. Aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen wurden im Rahmen der Herleitung der erarbeiteten Materialmodelle baupraktische Auswirkungen (betontechnologische und herstellungstechnische) identifiziert, deren Berücksichtigung wesentlich zu einer zielsicheren und wirtschaftlichen Schalungsbemessung beitragen.

Im Hinblick auf die betontechnologischen Aspekte sind diesbezüglich in erster Linie die nachstehenden Einsparungspotentiale zu nennen:

- 1) Die Verwendung einer Rezeptur mit hohem Feinkornanteil. Es ist davon auszugehen, dass mit dessen Erhöhung ein Ansteigen des  $C_{thix}$ -Wertes und damit eine Reduzierung des Frischbetondrucks einhergeht.
- 2) Die Wahl von selbstverdichtendem Betonen führt zu ähnlichen Frischbetondrücken wie der Einsatz von Normal- bzw. Fließbetonen. Von wirtschaftlichem Nutzen ist dabei die Personaleinsparung, da der Verdichtungsaufwand bei dem Einbau selbstverdichtender Betone entfällt.
- 3) Um eine effiziente Schalungsbemessung garantieren zu können, bedarf es der verstärkten Einbeziehung rheometrischer Messverfahren in die Baupraxis.

Neben den o. g. betontechnologischen Einsparungspotentialen sind zusätzlich auch herstellungstechnische Aspekte zu beachten, um die Leistungsfähigkeit des physikalischen Materialmodells vollständig ausschöpfen zu können und damit eine Rationalisierung des Bauablaufs gewährleisten zu können. Diese sind:

- 1) Ein signifikanter Einfluss der Einbaugeschwindigkeit auf den Frischbetondruck ist lediglich in einem Bereich  $v < 7$  m/h zu verzeichnen, ein leichter hingegen in einem Bereich zwischen 7 m/h bis 28 m/h. Daher empfiehlt es sich ab einer Einbaugeschwindigkeit von 7 m/h nach Möglichkeit einen deutlich höheren Wert zu wählen. Dies führt zu einer Optimierung der Wirtschaftlichkeit von Betonbaustellen.
- 2) Von einem seitlichen Betoneinbau ist nach Möglichkeit abzusehen, da dieser infolge des damit verbundenen (möglichen) Druckstoßes zu einer Erhöhung des sich einstellenden Frischbetondrucks führt.
- 3) Um einbaubedingte Schwankungen der Belastungsverhältnisse der Schalung zu vermeiden und die vorgenommene Bemessung vollständig und effektiv auszunutzen, ist der Einbau mit einer konstanten Geschwindigkeit vorzunehmen (aus sicherheitstechnischen Gesichtspunkten keine Überschreitung, aus wirtschaftlichen Aspekten keine Unterschreitung).

Teilsicherheitsbeiwerte sind ein wesentliches Element ingenieurtechnischer Bemessungskonzepte und ihrer baupraktischen Anwendung. Wie aus der Herleitung betontechnologischer Bemessungsmodelle bekannt (z. B. [86]), müssen zur Angabe von Teilsicherheitsbeiwerten die Ergebnisse der verfügbaren Literatur herangezogen werden. Ein Überblick über den bekannten Wissensstand ist in [98] zusammengefasst. Demnach ist hinsichtlich der Schalungsbemessung zwischen den beiden Grenzzuständen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit zu unterscheiden. Die eigenen experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Korrelation zwischen Frischbetondruck und Schalungsverformung zu beobachten ist.

Empfehlungen für Teilsicherheitsbeiwerte sind in [48], [98] und [182] zu finden. Aus den darin zur Verfügung gestellten Informationen folgt, dass eine explizite Angabe des Teilsicherheitsbeiwerts derzeit noch mit zahlreichen Unwägbarkeiten (z. B. Schalungskomponenten oder Betonart) behaftet ist. Aus diesem Grunde wird auf Grundlage der Empfehlungen aus der Literatur der Teilsicherheitsbeiwert mit  $\gamma_F = 1,85$  grob geschätzt. Um diesen explizit angeben zu können, bedarf es weiterführender Untersuchungen. Dabei sind neben sicherheitstechnischen vor allem auch wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen.

Im Hinblick auf die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erfassten Frischbetondrücke ist anzumerken, dass diese bei einem baupraktischen Einbau evtl. etwas geringer ausfallen können. Das verwendete Modellschalungssystem führte zu Frischbetondrücken, die für die Schalungsbemessung auf der sicheren Seite liegen, da im Bereich der simulierten Einbauhöhen lediglich die absolute Auflast wirkte und nicht durch die thixotropen Eigenschaften bzw. den Strukturaufbau (und damit  $\tau_0$ ) abgetragen werden konnte. Dies musste jedoch in Kauf genommen werden, da eine Simulation auf keinem anderen Wege möglich war.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit behandelte die experimentelle Untersuchung des Frischbetondrucks. Hierfür wurden zahlreiche offene Fragen bezüglich der im Rahmen des Betoneinbaus in einer Schalung ablaufenden Prozesse sowie der Einbeziehung rheologischer Kenngrößen in die schwerpunktmäßige Entwicklung zweier allgemeingültiger Stoffgesetze geklärt.

Der Kenntnisstand über den Frischbetondruck wurde zunächst mit Hilfe einer Literatursichtung eingehend aufgezeigt und diskutiert. Hiermit wurde die Basis zur Konkretisierung der offenen Fragen und ihrer Beantwortung geschaffen. Dabei wurde gezeigt, dass eine allgemeingültige und vollkommen physikalische Beschreibung des Frischbetondrucks kaum bekannt oder erarbeitet ist. Die Bestimmung des Frischbetondrucks stütze sich bisher zumeist auf betonfremde Modellvorstellungen, wie z. B. aus der Boden-, Schüttgut- bzw. Hydromechanik, sowie empirische Konzepte. Nur vereinzelt wurden bislang rheologische Konzepte hergeleitet. Maßgebende einbaumechanische und schalungskonstruktive Parameter finden bei den gegenwärtig verfügbaren Modellvorstellungen weitgehend kaum Beachtung.

Im Anschluss daran wurden experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung des Frischbetondrucks von sowohl Normalbeton als auch von selbstverdichtendem Beton durchgeführt. Das Hauptziel der Experimente war die Identifizierung der für den Frischbetondruck maßgebenden Parameter. Zudem konnten aus den gewonnenen Ergebnissen Empfehlungen für die Baupraxis abgeleitet werden.

Im Zuge von Modellschalungssystem-Versuchen konnten verschiedene Einbauhöhen praxisnah simuliert werden. Zu diesem Zweck wurde erstmals eigens ein Modellschalungssystem entworfen und konstruiert, welches Einbauhöhen simuliert, die über die tatsächlich vorhandene Schalungshöhe hinausgehen. Die Abmessungen der dabei verwendeten Trägerschalung betragen  $h \times b \times d = 150 \text{ cm} \times 200 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ . Die die effektive Schalungshöhe überschreitenden Einbauhöhen wurden bis zu einer Höhe von 6,50 m simuliert. Als Untersuchungsparameter wurden die Mischungszusammensetzung, die Einbaugeschwindigkeit, die Schalhautdehnung, die Fließgrenze, die Konsistenz, die Schalungsgeometrie sowie die Baustofftemperatur gewählt.

Die aus den experimentellen Modellschalungssystem-Versuchen erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse wurden ausführlich diskutiert. Es konnte gezeigt werden, dass der Frischbetondruck von sowohl Normalbeton als auch selbstverdichtendem Beton aus der gleichen Kombination physikalischer Prozesse und der Mischungseigenschaften geprägt wird. Zudem wurde festgestellt, dass zur Bestimmung des Frischbetondrucks einbaudynamische und schalungskonstruktive Einflüsse unabdingbar sind. Es wurde gezeigt, dass für eine erweiterte stoffphysikalische Ermittlung des Frischbetondrucks die folgenden Einflussparameter entscheidend sind: Einbaugeschwindigkeit, Einbauhöhe, Rohdichte, Fließgrenze und Schalhautdehnung.

Im Rahmen der durchgeführten Parameterstudie wurde u. a. festgestellt, dass im Hinblick auf den Einfluss der Mischungszusammensetzung eine Frischbetondruckreduzierung mittels eines

vergleichsweise größeren Korndurchmessers erfolgen kann. Es wurde gezeigt, dass diese auch bei der Verwendung von Zementen mit einem höheren Partikelfeinheitsgrad auftreten kann. Ferner wurde festgestellt, dass sowohl für Normalbeton als auch für selbstverdichtenden Beton der Einfluss der Einbaugeschwindigkeit in einem Bereich von 3,5 m/h bis 7 m/h signifikant ausgeprägt ist. In diesem Zusammenhang muss die während des Einbauvorgangs auftretende Impulsauflast zusätzlich berücksichtigt werden. Im Hinblick auf die Schalhautdehnungs-Frischbetondruckbeziehungen wurde eine lineare Proportionalität nachgewiesen. Dabei zeichnet sich die Schalung aufgrund ihrer Elastizität durch ihren spezifischen Schalungsbettungsmodul aus. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass eine Zunahme des Thixotropiegrads bzw. des Strukturaufbaus zu einer Verminderung des Frischbetondrucks führen kann. Im Hinblick auf die Abhängigkeit des Frischbetondrucks von der Konsistenz wurde zwar eine Druckabnahme durch die Verminderung der Konsistenz verzeichnet, jedoch war ein funktionaler Zusammenhang nicht feststellbar.

Im Hinblick auf die Frischbetondruckverteilung über die Schalungshöhe wurden zwei charakteristische Verläufe festgestellt. In Abhängigkeit von der Einbaugeschwindigkeit und dem vorherrschenden Strukturaufbau zeichnet sich diese entweder durch einen linearen (hydromechanische Charakteristik) oder einen gekrümmten (schüttgutmechanische Charakteristik) Verlauf aus. Hingegen war ein Einfluss der Schalungsbreite auf den Frischbetondruck nicht zu verzeichnen. Ein Zusammenhang zwischen der Betontemperatur und dem Frischbetondruck wurde insofern festgestellt, dass mit einer Temperaturzunahme ein Druckabfall einhergeht. Dabei wurde beobachtet, dass im Gegensatz zu einer Vielzahl bestehender Modellvorstellungen, eine vollkommene Frischbetondruckabnahme zu einem Zeitpunkt von 24 Stunden nach Einbaubeginn nicht auftritt. Dies kann theoretisch allein bei absolut steifen bzw. unverformbaren Schalungen sowie einer ausreichenden Schrumpfdehnung auftreten.

Im Rahmen der experimentellen Frischbetondruckuntersuchungen von selbstverdichtendem Beton in einer Rahmenschalung mit den Abmessungen  $h \times b \times d = 300 \text{ cm} \times 125 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$  wurden die mit dem Modellschalungssystem gewonnenen Ergebnisse verifiziert. Als Untersuchungsparameter dienten die Konsistenz sowie die Schalungsgeometrie.

Die Überprüfung der im Zuge der Modellschalungssystem-Versuche gewonnenen Ergebnisse ergab, dass der Frischbetondruck sehr gut mit dem eigenen Modellschalungssystem simuliert werden kann. Ein Unterschied der Ergebnisse der Modellschalungssystem-Versuche mit denen der Rahmenschalungsversuche war nicht feststellbar. Darüber hinaus konnte bestätigt werden, dass der Frischbetondruck selbstverdichtender Betone in Abhängigkeit von der Einbaugeschwindigkeit und der Thixotropie bzw. des Strukturaufbaus einen annähernd horizontalen Verlauf aufweisen kann und nur unmerklich durch die Schalungsbreite beeinflusst wird. Hinsichtlich des Einflusses des Setzfließmaßes und damit der Konsistenz verstärkte sich die Erkenntnis, dass kein eindeutiger funktionaler Zusammenhang mit dem Frischbetondruck feststellbar ist.

Auf der Grundlage der experimentellen Untersuchungen wurde ein neues „physikalisches Materialmodell“ zur Beschreibung des Frischbetondrucks entwickelt. Mittels eines Vergleichs

der Mess- mit den Rechenwerten konnte die Richtigkeit des Stoffmodells überprüft werden. Des Weiteren zeigte eine Gegenüberstellung mit unterschiedlichen verfügbaren Modellvorstellungen die Vorteile des eigenen Materialmodells, indem die damit berechneten Frischbetondrucke sich sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus sicherheitstechnischer Sicht empfehlenswert erwiesen. Die wesentliche Stärke des eigenen Materialmodells ist, dass sich der Frischbetondruck betonartübergreifend anhand einer vollkommen rheologischen bzw. stoffphysikalischen Formulierung beschreiben lässt. Das entwickelte Materialmodell ermöglicht somit die Bestimmung des Frischbetondrucks sowohl für normale als auch selbstverdichtende Betone und erübrigt die Verwendung unterschiedlicher Bemessungsansätze.

Abschließend wurde ein „erweitertes Stoffmodell“ zur Beschreibung des Frischbetondrucks erarbeitet. Dabei handelt es sich um eine Erweiterung des physikalischen Materialmodells hin zu einem „rheologisch-mechanischen Stoffgesetz“. Hierbei ist es gelungen, neben den rheologischen Frischbetoneigenschaften auch die einbaumechanischen und schalungskonstruktiven Phänomene mit einzubeziehen. Diese konnten erstmals auf einem mathematischen Wege formuliert werden.

Anhand der beiden Materialmodelle wurde ein Werkzeug erarbeitet, mit dem der Frischbetondruck wirtschaftlich bestimmt werden kann. Der durch die Stoffmodelle hinsichtlich des Frischbetondrucks erworbene Kenntnisstand, kann, auch im Hinblick auf die in der vorliegenden Arbeit empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerte, durch weitere Forschungsarbeiten, insbesondere experimentelle Untersuchungen, abgesichert und optimiert sowie für andere Betonarten erweitert werden.

Im Hinblick auf die Anwendung der Materialmodelle auf Normalbetone geringerer Konsistenz sollte sicherlich genauer überprüft werden, wie die Frischbetondruckcharakteristik ausgeprägt ist. Dazu bedarf es zusätzlicher umfangreicher Untersuchungen. Des Weiteren wäre seitens der Einbautechnik eine gezielte Untersuchung der im Rahmen verschiedener Verdichtungsarten ablaufenden Phänomene von wesentlichem Interesse.

Es empfiehlt sich, die bestehenden Normen und Richtlinien hinsichtlich der Frischbetondruckbemessung an den in der vorliegenden Arbeit erarbeiteten Wissensstand anzupassen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Aberle, J.: Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Kaltwasserabfluss. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2000
- [2] Aitein, P.-C.: High-Performance Concrete. E & FN Spon, London, 1998
- [3] Andriamanatsilavo, R.: Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage: Expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation. Dissertation, Centre de Recherche de Lorient, 2003
- [4] American Concrete Institute (ACI) – ACI Committee 622: Pressure on Formwork, ACI Journal 30, 1958
- [5] American Concrete Institute (ACI) – ACI SP-4: Formwork for Concrete, 5<sup>th</sup> Edition, Farmington Hills, MI, 1989
- [6] American Concrete Institute (ACI) – ACI Committee 116: Cement and Concrete. In: ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Farmington Hills, MI, 2000
- [7] American Concrete Institute (ACI) – ACI Committee 347-04: Guide to Formwork for Concrete, Farmington Hills, MI, 2004
- [8] American Society for Testing and Materials (ASTM): Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete. ASTM C143-90, Vol. 04.02, West Conshocken, PA, 2002
- [9] Amziane, S.: Contribution à l'étude des matériaux cimentaires à l'état frais. Habilitation, Université de Bretagne Sud, Lorient, 2005
- [10] Amziane, S.; Ferraris, C.: Cementitious paste setting using rheological and pressure measurements. ACI Materials Journal, Vol. 104, No. 2, 2007
- [11] Assaad, J.; Khayat, K. H.; Mesbah, H.: Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete. ACI Materials Journal, Vol. 100, No. 2, 2003
- [12] Assaad, J.: Formwork Pressure of Self-Consolidating Concrete – Influence of Thixotropy. Dissertation, Université de Sherbrooke, Quebec, 2004
- [13] Assaad, J.; Khayat, K. H.: Variations of lateral and pore water pressure of self-consolidating concrete at early age. ACI Materials Journal, Vol. 101, No. 4, 2004
- [14] Assaad, J.; Khayat, K. H.: Formwork pressure on self-consolidating concrete made with various binder types and contents. ACI Materials Journal, Vol. 102, No. 4, 2005
- [15] Assaad, J.; Khayat, K. H.: Kinetics of formwork pressure drop of scc containing various types and contents of binder. Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005
- [16] Assaad, J.; Khayat, K. H.: Effect of coarse aggregate characteristics on lateral pressure exerted by self-consolidating concrete. ACI Materials Journal, Vol. 102, No. 3, 2005

- [17] Assaad, J.; Khayat, K. H.: Effect of viscosity-enhancing admixtures on formwork pressure and thixotropy of self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 103, No. 4, 2006
- [18] Association française de normalisation (AFOR): NF P 93-350 – Banches industrialisées pour ouvrages en béton. Groupe AFNOR, Paris, 1995
- [19] Bäuml, M. F.: Steigerung der Dauerhaftigkeit selbstverdichtender Betone durch den Einsatz von Polymerfaserkurzschnitt. Dissertation, Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich, 2002
- [20] Banfill, P. F. G.: A viscometric study of cement pastes containing superplasticisers with a note on experimental techniques. *Magazine of Concrete Research*, London, 1981
- [21] Banfill, P. F. G.: Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 1994
- [22] Banfill, P. F. G.; Xu Yongmo; Domone, P. L. J.: Relationship between the rheology of unvibrated fresh concrete and its flow under vibration in a vertical pipe apparatus. *Magazine of Concrete Research*, London, 1999
- [23] Banfill, P. F. G. et al.: Comparison of Concrete Rheometers – International Tests at LCPC. NISTIR 6819, Ferraris, C. F. & Brower, L. E. (Hrsg.), Nantes, 2000
- [24] Banfill, P. F. G.: The rheology of fresh cement and concrete – A review. In: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC), Grieve, O. & Owens, G. (Hrsg.), Cement & Concrete Institute (C&CI), Durban, 2003
- [25] Barnes, H. A.; Hutton, J. F.; Walters, K.: An Introduction to Rheology. *Rheology Series*, 3, Elsevier, Amsterdam, 1989
- [26] Bauberatung Zement: Bereiten und Verarbeiten von Beton. *Zement-Merkblatt – Bontotechnik B7*, Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Köln, 2002
- [27] Beitzel, H.: Herstellung und Verarbeitung von Beton. *Beton-Kalender 2004 – Sonderdruck*, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2004
- [28] Beitzel, M.: Modelling fresh concrete pressure on vertical formwork. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International PhD Symposium in Civil Engineering, Walraven, U. et al. (Hrsg.), Taylor Francis Group, London, 2004
- [29] Beitzel, M.: Neue Erkenntnisse zum Frischbetondruckverhalten. *Kurzbericht (Entwurf)*, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [30] Beitzel, M.; Beitzel, H.; Müller, H. S.: Fresh concrete pressure of self-compacting concrete on a vertical formwork. In: *The 3<sup>rd</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Shah, S. P. (Hrsg.), Chicago, 2008
- [31] Bernabeu, A.: Form-system and surface quality. In: *Brite Euram Proposal*, No. BE96-3801, Brüssel, 2001

- [32] Billberg, P.: Formwork pressure generated by self-compacting concrete. In: RILEM Proceedings PRO 33 „Self-Compacting-Concrete“, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium, Wallevik, O. & Nielsson, I. (Hrsg.), RILEM Publications, Bagneux, 2003
- [33] Billberg, P.; Silfwerbrand, J.; Österberg, T.: Form pressures generated by self-consolidating concrete. Concrete International, 2005
- [34] Billberg, P.: Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete – Influence of Thixotropy and Structural Behaviour at Rest. Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2006
- [35] Bingham, E. C.: Fluidity and Plasticity. McGraw-Hill Book, New York, 1922
- [36] Blask, O.: Zur Rheologie von polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen, 2002
- [37] Böhm, F.: Über den Seitendruck des frisch eingebrachten Beton. Beton und Eisen, 18, 1965
- [38] Böge, A.: Technische Mechanik. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage, 27. Auflage, Wiesbaden, 2006
- [39] Brameshuber, W.; Uebachs, S.: Investigations on the formwork pressure using self-compacting concrete. In: RILEM Proceedings PRO 33 „Self-Compacting-Concrete“, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium, Wallevik, O. & Nielsson, I. (Hrsg.), RILEM Publications, Bagneux, 2003
- [40] Breitenbücher, R.: Erste Erfahrungen mit selbstverdichtendem Beton in der Praxis. Kongressunterlagen, 45. Betontage, Betonwerk + Fertigteil-Technik, Nr. 1, 2001
- [41] Breitenbücher, R.: Selbstverdichtender Beton – Chancen und Voraussetzungen. Beton, Heft 9, 2001
- [42] Breitenbücher, R.: Betonchnologie Gestern – Heute – Morgen. Wayss & Freytag am Donnerstag, Frankfurt, 2008
- [43] Bronstein et. al.: Taschenbuch der Mathematik. 1. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 1993
- [44] Buchenau, G.; Hillemeier, B.: Kugelfallrheometer zur Prüfung von Selbstverdichtendem Beton. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 100, Heft 2, 2005
- [45] Construction Industry Research and Information Association (CIRIA): CIRIA Research Report Nr. 1 – The pressure of concrete on formwork. London, 1965
- [46] Construction Industry Research and Information Association (CIRIA): CIRIA Research Report Nr. 108 – The pressure of concrete on formwork. London, 1985
- [47] de Larrard, F.: Concrete Mixture Proportioning – A Scientific Approach. E & FN Spon, Taylor & Francis Group, Oxford, 1999
- [48] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“. Beuth Verlag, Berlin, 2003

- [49] Deutscher Beton- und Bautechnikverein (DBV): DBV-Merkblatt Betonierbarkeit von Bauteilen aus Beton und Stahlbeton. Berlin, 2004
- [50] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 4235-1-5: Verdichten von Beton durch Rütteln. Beuth Verlag, Berlin, 1978
- [51] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 18218 – Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen. Beuth Verlag, Berlin, 1980
- [52] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 18137-2 – Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 2: Triaxialversuch. Beuth Verlag, Berlin, 1990
- [53] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 18137-3 – Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 3: Direkter Scherversuch. Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [54] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN/EN 196 – Prüfverfahren für Zemente – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Beuth Verlag, Berlin, 1995
- [55] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 1053-1 – Mauerwerk – Teil 1: Berechnung und Ausführung. Beuth Verlag, Berlin, 1996
- [56] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN/EN 1015 – Prüfverfahren für Mörtel im Mauerwerk, Beuth Verlag, Berlin, 1999
- [57] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 1342-1 – Viskosität – Teil 1: Rheologische Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 1999
- [58] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme. Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [59] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN EN 12350 – Prüfung von Frischbeton. Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [60] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 1045 – Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [61] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN EN 197-1 – Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Deutsche Fassung EN 197-1: 2000, Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [62] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN EN 934-2 – Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 2: Betonzusatzmittel; Definitionen und Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung. Deutsche Fassung EN 934-2:2001, Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [63] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 1048-1 – Frischbeton. Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [64] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 1048-5 – Prüfverfahren für Beton; gesondert hergestellte Probekörper. Beuth Verlag, Berlin, 2002

- [65] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN EN 4085 – Baugrund – Berechnung des Erddrucks. Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [66] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN EN 197-4 – Zement – Teil 4: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Hochofenzement mit niedriger Anfangsfestigkeit. Deutsche Fassung EN 197-4:2004-08, Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [67] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN EN 450-1 – Flugasche für Beton – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien. Deutsche Fassung EN 450-1:2005, Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [68] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 18202 – Toleranzen im Hochbau – Bauwerke. Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [69] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 4074-1 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz. Beuth Verlag, Berlin, 2008
- [70] Djelal, C.: Designing and perfecting a tribometer for the study of friction of a concentrated clay-water mixture against a metallic surface. *Materials and Structures*, Vol. 34, No. 1, 2001
- [71] Djelal, C.; Vanhove, Y.; Magnin, A.: Tribological behaviour of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 5, 2004
- [72] Doka: Doka Bemessungshilfen. Amstetten, 2000
- [73] Doraiswamy, D.: The Origins of Rheology: A Short Historical Excursion. *Rheology Bulletin*, Vol. 71, No. 2, 2002
- [74] Einstein, A.: Eine neue Bestimmung der Moleküldimension. *Annalen der Physik*, Vol. 34, 1911
- [75] EKATO Rühr- und Mischtechnik (Hrsg.): Handbuch der Rührtechnik. Rünzi, Schopfheim, 2000
- [76] Ertingshausen, H: Über den Schalungsdruck von Frischbeton. Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1965
- [77] Fedroff, D; Frosch, R. J.: Formwork for self-consolidating concrete. *Concrete International*, Vol. 26, Nr. 10, 2004
- [78] Ferraris, C.; de Larrard, F.; Sedran, T.: Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material. *Materials and Structures*, Vol. 31, No. 7, 1998
- [79] Ferraris, C. F.; de Larrard, F.: Testing and Modelling of Fresh Concrete Rheology. NISTIR 6094, Building and Fire Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1998
- [80] Ferraris, C. F.: Measurement of the rheological properties of high performance concrete – State of the art. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 104, Nr. 5, 1999

- [81] Ferraris, C.; de Larrard, F.; Martys, N.: Fresh concrete rheology – Recent developments. In: *Materials Science of Concrete*, Vol. 6, Mindess, S. & Skalny, J. P. (Hrsg.), West Sussex, 2001
- [82] Ferraris, C. F.; Martys, N. S.: Relating fresh concrete viscosity measurements from different rheometers. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 108, No. 3, 2003.
- [83] Ferron, R. et al.: Rheological method to evaluate the thixotropy of cement pastes for SCC. *ACI Materials Journal*, 2006
- [84] Feys, D.; Verhoeven, R.; De Schutter, G.: Fundamental study of the rheology of Self Compacting Concrete, composed with Belgian materials. In: *Proceedings (electronic) of the 7<sup>th</sup> National Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, Faculté Polytechnique de Mons, 2006
- [85] Flatt, R. J.; Houst, Y. F. A.: A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticisers. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001
- [86] Foos, S.: Bemessung unbewehrter befahrbarer Betonplatten unter witterungsbedingten Beanspruchungen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [87] Francois, D.; Pineau, A.; Zaoui, A.: *Mechanical Behaviour of Materials*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998
- [88] Freimann, T.: Einfluss von Steinkohleflugaschen auf das rheologische Verhalten von Zementleimen und -mörteln, Dissertation, Universität Hannover, 2002
- [89] Gaede, K.: Zuschrift zu R. Hoffmann [Hof43]. *Beton- und Stahlbetonbau*, Vol. 42, Heft 15/16, 1944
- [90] Gardner, N. J.; Ho, P. T.-J.: Lateral pressure of fresh concrete. *ACI Journal*, Title No. 76-35, July 1979
- [91] Gardner, N. J.: Pressure of concrete against formwork. *ACI Journal*, Title No. 77-31, 1980
- [92] Gardner, N. J.: Formwork pressures and cement replacement by fly ash. *Concrete International*, October 1984
- [93] Gehbauer, F.: *Baubetriebstechnik I*. Institut für Maschinenwesen im Baubetrieb, Universität Karlsruhe (TH), Reihe V, Heft 16, Karlsruhe, 2000
- [94] Golaszewski, J.: Rheologie von frischem Mörtel und frischen Betonmischungen. *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, Nr. 6, 2007
- [95] Graf, O.; Kaufmann, F.: Schalungsdruck beim Betonieren. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 135, 1960
- [96] Graubner, C.-A.; Proske, T.: Einfluss von Form und Größe der Gesteinskörnungen auf den erforderlichen Mehlkorngesamt und die Festbetoneigenschaften von selbstverdichtendem Beton. *Schlussbericht*, Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 2004

- [97] Graubner, C.-A.; Proske, T.: Formwork pressure – A new concept for the calculation. In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the 4<sup>th</sup> RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago, 2005
- [98] Graubner, C.-A.; Beitzel, H.; Beitzel, M. et al.: Sachstandsbericht – Frischbeton-druck fließfähiger Betone. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2006
- [99] Graubner, C.-A.; Beitzel, H.; Beitzel, M. et al.: Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz – Ein Gemeinschaftsprojekt deutscher Forschungseinrichtungen. Abschlussbericht, Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 2008
- [100] Greim, M.: Alles fließt – Baustoff-Rheometrische Messverfahren und ihre Grenzen. 13. Workshop und Kolloquium „Rheologische Messungen an Baustoffen“, Schleibinger Geräte Teubert u. Greim, Hochschule Regensburg, [www.schleibinger.com/k2004/greim04/printsw2.pdf](http://www.schleibinger.com/k2004/greim04/printsw2.pdf), 2004
- [101] Gross, D.; Hauger, W.; Schnell, W.: Technische Mechanik 2 – Elastostatik. Springer-Verlag, Berlin, 1992
- [102] Grube, H.; Rickert, J.: Selbstverdichtender Beton – ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems Beton. Beton, Vol. 49, Nr. 4, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 1999
- [103] Grübl, P.; Weigler, H.; Karl S.: Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften. Ernst & Sohn, Berlin, 2001
- [104] Gudehus, G.: Bodenmechanik. Skriptum, Universität Karlsruhe (TH), 1981
- [105] Guerrin, A.: La pousseé exercée par le béton frais su les coffrages. La technique des travaux, 26. Jhg., 1950
- [106] Ha-Be: Stabilisierer 72 (ST). Technisches Merkblatt, [www.ha-be-hameln.de](http://www.ha-be-hameln.de), 2009
- [107] Hackley, A.; Ferraris, C.: Guide to Rheological Nomenclature – Measurements in Ceramic Particulate Systems. National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 946, Gaithersburg, MD, 2001
- [108] Haist, M.: Selbstverdichtender Beton (SVB). Umdrucke, Vorlesung „Betontechnologie“, WS 2005/06, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe (TH), 2005
- [109] Haist, M.: Selbstverdichtender Leichtbeton. In: DAfStb-Forschungskolloquium, Beiträge zum 47. Forschungskolloquium, Universität Karlsruhe (TH), Müller, H. S. & Stempniewski, L., Berlin, 2006
- [110] Haist, M.: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2009
- [111] Hakansson, U.: Rheology of Fresh Cement-Based Grouts. Dissertation, The Royal Institute of Technology, Stockholm, 1993

- [112] HeidelbergCement: Betontechnische Daten. Heidelberg, 2005
- [113] Hermann, M.: (Untersuchungen zur) Gleitbauweise im Stahlbetonbau. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1984
- [114] Hillemeier, B.; Buchenau, G.: Rheologie. In: DAfStb-Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB), Reinhardt, H.-W. (Hrsg.), DAfStb-Heft 516, Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [115] Hillemeier, B.: Selbstverdichtender Beton als kostengünstige und produktive Methode für den Hochbau, das Bauen im Bestand und die stationäre Vorfertigung. Abschlussbericht, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiete Baustoffe und Baustoffprüfung, Technische Universität Berlin, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2006
- [116] Hochstein, B.: Rheologie von Kugel- und Fasersuspensionen mit viskoelastischen Matrixflüssigkeiten. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1997
- [117] Hochstein, B.: Rheologie I – Grundlagen der Rheologie, Rheometrie, Einführung in die Rheologie disperser Systeme. Skriptum, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Universität Karlsruhe (TH), 2005
- [118] Höveling, H.: Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB). Dissertation, Universität Hannover, 2006
- [119] Hoffmann, R.: Der Schalungsdruck von frischem Beton. Beton- und Stahlbetonbau, H. 17/18, 1943
- [120] Hu, C.; de Larrard, F.: The rheology of fresh high-performance concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 2, 1996
- [121] International Council for Research and Innovation in Building and Construction; International Federation for Structural Concrete: CIB-CEB-FIB – Manual de Technologie – Coffrage. Rotterdam, Lausanne, 1977
- [122] Iwasaki, N.: Estimation of workability – Why has the slump remained being used so long. Concrete Journal, Vol. 21, No. 10, 1983
- [123] Janssen, H. A.: Versuche über Getreideversuche in Silozellen. VDI-Zeitschrift, Vol. 39, August 1895
- [124] Jin, J.: Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete. Dissertation, University of London, 2002
- [125] Jirka, G. H.: Einführung in die Hydromechanik. Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe (TH), Universitätsverlag Karlsruhe, 2008
- [126] Keck, H. J.: Untersuchung des Fließverhaltens von Zementleim anhand rheologischer Messungen. Dissertation, Universität Essen, Shaker Verlag, Aachen, 1999
- [127] Khayat, K. H.; Ollivier, J.-P.: Viser une consistance adaptée aux moyens de mise en oeuvre. In: Les bétons: Base et données pour leur formulation, Baron, J. & Ollivier, J.-P. (Hrsg.), Eyrolles, Paris, 1997

- [128] Khayat, K. H.; Assaad, J.; Mesbah, H.: Variations of formwork pressure of self-consolidating concrete of section width and casting rate. Proceedings of the 1<sup>st</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Shah, S. P.; Daczko, J. A. & Lingscheidt, J. N. (Hrsg.), Chicago, 2002
- [129] Khayat, K. H. et al.: Effect of section width and casting rate on variations of formwork pressure of self-consolidating concrete. RILEM Materials and Structures, 2005
- [130] Khayat K. H.; Assaad, J.: Use of rheological properties of SCC to predict formwork pressure. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the 4<sup>th</sup> RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago, 2005
- [131] Khayat, K. H.; Assaad, J.: Effect of w/cm and high-range water-reducing admixture on formwork pressure and thixotropy of self-consolidating concrete, ACI Materials Journal, Vol. 103, No. 3, 2006
- [132] Khayat, K. H. et al. (Hrsg.): SCC Formwork Pressure – Task 1: Capturing Existing Knowledge on Formwork Pressure Exerted by SCC. The National Ready-Mix Concrete Research Foundation and The Strategic Development Council, American Concrete Institute, Sherbrooke, 2007
- [133] Kordts, S.: Selbstverdichtender Beton. In: Tagungsband zum 41. Forschungskolloquium des DAfStb, Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.), Düsseldorf, 2002
- [134] Kordts, S.; Breit, W.: Beurteilung der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton. In: Betontechnische Berichte 2001-2003, Verein Deutscher Zementwerke, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Thielen, G. (Hrsg.), Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 2003
- [135] Kordts, S.: Herstellung und Steuerung der Verarbeitungseigenschaften selbstverdichtender Betone. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2005
- [136] Krüger, M.: Prüfmethode zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit von selbstverdichtenden Betonen. In: Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen – Festschrift zum 60. Geburtstag von H.-W. Reinhardt, Grosse, C. (Hrsg.), Stuttgart, Libri.de Internet (Books on Demand), Hamburg 1999
- [137] Kurtis, K.: Properties of Fresh Concrete. School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, [www.ce.gatech.edu/~kk92/fresh.pdf](http://www.ce.gatech.edu/~kk92/fresh.pdf), 2007
- [138] Lapasin, R.; Longo, V.; Rajgelj, S.: A thixotropic model for cement pastes. In: Proceedings VIII<sup>th</sup> International Congress on Rheology, Naples, Vol. 3, Plenum Press, New York, 1980
- [139] Lapasin, R.; Papo, A.; Rajgelj, S.: The phenomenological description of the thixotropic behaviour of fresh cement pastes, Rheological Acta, Vol. 22, No. 4, 1983
- [140] Leemann, A.; Hoffman, C.: Schalungsdruck von selbstverdichtendem Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik, Nr. 11, 2003

- [141] Leemann, A.; Hoffmann, C.: Pressure of self-compacting concrete on the formwork. In: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, RILEM Publications, Bagneux, 2003
- [142] Leemann, A.; Hoffmann, C., Winnefeld, F.: Influence of the mix design on the formwork pressure of self-compacting concrete. In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the 4<sup>th</sup> RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago, RILEM Publications, Bagneux, 2005
- [143] Lewis, J. A. et al.: Polyelectrolyte effects on the rheological properties of concentrated cement suspensions. Journal of the American Ceramic Society, Vol. 83, 2000
- [144] L'Hermite, R.: La vibration du béton frais. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Nr. 11, Febr. 1948
- [145] Linder, R.: Stichwort: Schalung. Bauverlag, Wiesbaden, 1973
- [146] Mechtcherine, V.: Bruchmechanische und fraktologische Untersuchungen zur Rissausbreitung in Beton. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2000
- [147] Mooney, M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. Journal of Colloid Science, Vol. 6, 1951
- [148] Müller, H. S.: Baustoffkunde und Konstruktionsbaustoffe. Skriptum zu den Vorlesungen, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [149] Nielsen, L. F.: Rheology of some fluid extreme composites. Reprint from the Nordic Concrete Research, Vol. 2, 2001
- [150] Noack, P.: Ergebnisse neuer Forschungsarbeiten über die Eigenschaften des Zementbetons und Versuche zur Bestimmung seines Seitendrucks. Dissertation, Technische Hochschule Dresden, 1919
- [151] Ore, E. L.; Straughan, J. J.: Effect of cement hydration on concrete form pressure. ACI Journal, Vol. 65, No. 9
- [152] Ovarlez, G.; Roussel, N.: A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork. Materials and Structures, Vol. 39, No. 2, 2006
- [153] Paillère, A. M.; Briquet, P.: Influence of fluidifying synthetic resins on the rheology and deformation of cement pastes before and during setting. In: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Congress on Chemistry of Cements, Vol. 3, Cement and Concrete Association, London, 1980
- [154] PERI: Tabellen – Schalungstechnik. Weißenhorn, 2002
- [155] PERI: Wandschalung aus Trägerelementen. Vorlesungsreihe „Grundlagen zum Schalungsbau“, Schalungsvorträge für den Lehrbetrieb, CD-Rom, Weißenhorn, 2006

- [156] PERI: Betonschalungen – Grundlagen des Schalungsbaues, Schalungsvorträge für den Lehrbetrieb. CD-Rom, Weißenhorn, 2006
- [157] Proske, T.: Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton – Ein wirklichkeitsnahes Modell zur Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2007
- [158] Pürrer, E.: Einflüsse auf den Schalungsdruck. Österreichische Bauzeitung, Jahrgang 1987, Nr. 29, 1987
- [159] Pusch, G.: Problematik der Frischbetonseitendruckermittlung für vertikale Schalungen. Betontechnik, 1999
- [160] Rehm, U.-P.: Ermittlung des Antriebsdrehmoments von Räumarmen in Silos mit kohäsivem Schüttgut. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1998
- [161] Reichle, E.: Der Kostenfaktor Schalung. Skriptum, Institut für Technologie und Management im Bauwesen, Universität Karlsruhe (TH), 2005
- [162] Reimann, J.: EDV-Einsatz in der Schalungsplanung – Anforderungen, Konzepte, Nutzen. verlag moderne industrie, Landsberg/Lech, 1997
- [163] Reiner, M.: Rheology. In: Encyclopedia of Physics – Vol. VI: Elasticity and Plasticity, S. Flügge (Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin, 1958
- [164] Reinhardt, H.-W.; Wüstholtz, T.: About the influence of the content and composition of the aggregates on the rheological behaviour of self-compacting concrete. Materials and Structures, Vol. 39, Nr. 7, 2006
- [165] Ritchie, A. G. B.: The pressures developed from concrete on formwork. Civil Engineering and Public Works Review, 1962
- [166] Roby, H. G.: Pressure of concrete on forms. Civil Engineering, Vol. 5, 1935
- [167] Rodin, S.: Pressure of Concrete on Formwork. Proceedings, Institute of Civil Engineers, Vol. 1, Part 1, No. 6, London, 1952
- [168] Roussel, N.: A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. Cement and Concrete Research, Vol. 36, 2006
- [169] Schlichting, H.: Grenzschicht-Theorie. G. Braun Buchverlag, Karlsruhe, 1982
- [170] Schlüter, V. G.: Entwicklung eines experimentell gestützten Bewertungsverfahrens zur Optimierung und Charakterisierung der Dehnungsübertragung oberflächenapplizierter Faser-Bragg-Gitter-Sensoren. Dissertation, Technische Universität Berlin, BAM-Dissertationsreihe, Berlin, 2010
- [171] Schmitt, R.: Die Schalungstechnik – Systeme, Einsatz, Logistik. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2001
- [172] Schneider, K.-J. (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure – mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 15. Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf, 2002

- [173] Schulze, D.: Untersuchungen zur gegenseitigen Beeinflussung von Silo und Austragorgan. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1991
- [174] Schulze, D.: Fließverhalten von Pulvern und Schüttgütern (Grundlagen). Internetveröffentlichung, [www.dietmar-schulze.de](http://www.dietmar-schulze.de), 2008
- [175] Schulze, D.: Spannungen in Silos. Internetveröffentlichung, [www.dietmar-schulze.de](http://www.dietmar-schulze.de), 2008
- [176] Simha, R.: A treatment of the viscosity of concentrated suspensions. *Journal of Applied Physics*, Vol. 29, Issue 9, 1952
- [177] Shunk, F. R.: Pressure of concrete on forms. *Engineering News*, Vol. 62, No. 11, 1909
- [178] Skarendahl, A.; Petersson, Ö.: State-of-the-Art Report of RILEM TC 174-SCC. RILEM Report 23, RILEM Publications, Bagnex, 2000
- [179] Skarendahl, A.: Use of self-compacting concrete in one-site constructions. ERMCO-Congress, Berlin, 2001
- [180] Söderlind, L.: Full-Scale tests for housing. In: RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, RILEM Publications, Bagnex, 1999
- [181] Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel. *Beton*, Vol. 45, H. 11, Verlag Bau+Technik, 1995
- [182] Specht, M.: Die Belastung von Schalung und Rüstung durch Frischbeton. Dissertation, Technische Universität Hannover, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1973
- [183] Specht, M.: Der Frischbetondruck nach DIN 18 218 – die Grundlagen und wichtigsten Festlegungen. *Die Bautechnik*, 58. Jhg., Heft 8, 1981
- [184] Specht, M.: Theorie des Frischbetondrucks – gegenwärtiger Stand und ungeklärte Probleme. *Bautechnik*, Heft 3, 1987
- [185] Springmann, S.: Geotechnik III – Teil 2, V Flachfundation. Skript, Institut für Geotechnik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2006
- [186] Struble, L.; Lei, W.-G.: Rheological changes associated with setting of cement paste. *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 2, 1995
- [187] Tanner, R. I.: *Engineering Rheology*. Oxford Engineering Sciences Series, Vol. 52, 2<sup>nd</sup> Edition, Oxford University Press, New York, 2000
- [188] Tattersall, G. H.: *The Workability of Concrete*. A viewpoint publication, The Portland Cement Association, Skokie, IL, 1976
- [189] Tattersall, G. H.; Banfill, P. F. G.: *The Rheology of Fresh Concrete*. Pitman Publisher, London, 1983
- [190] Tattersall, G. H.; Baker, P. H.: The effect of vibration on the rheological properties of fresh concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 40, 1988

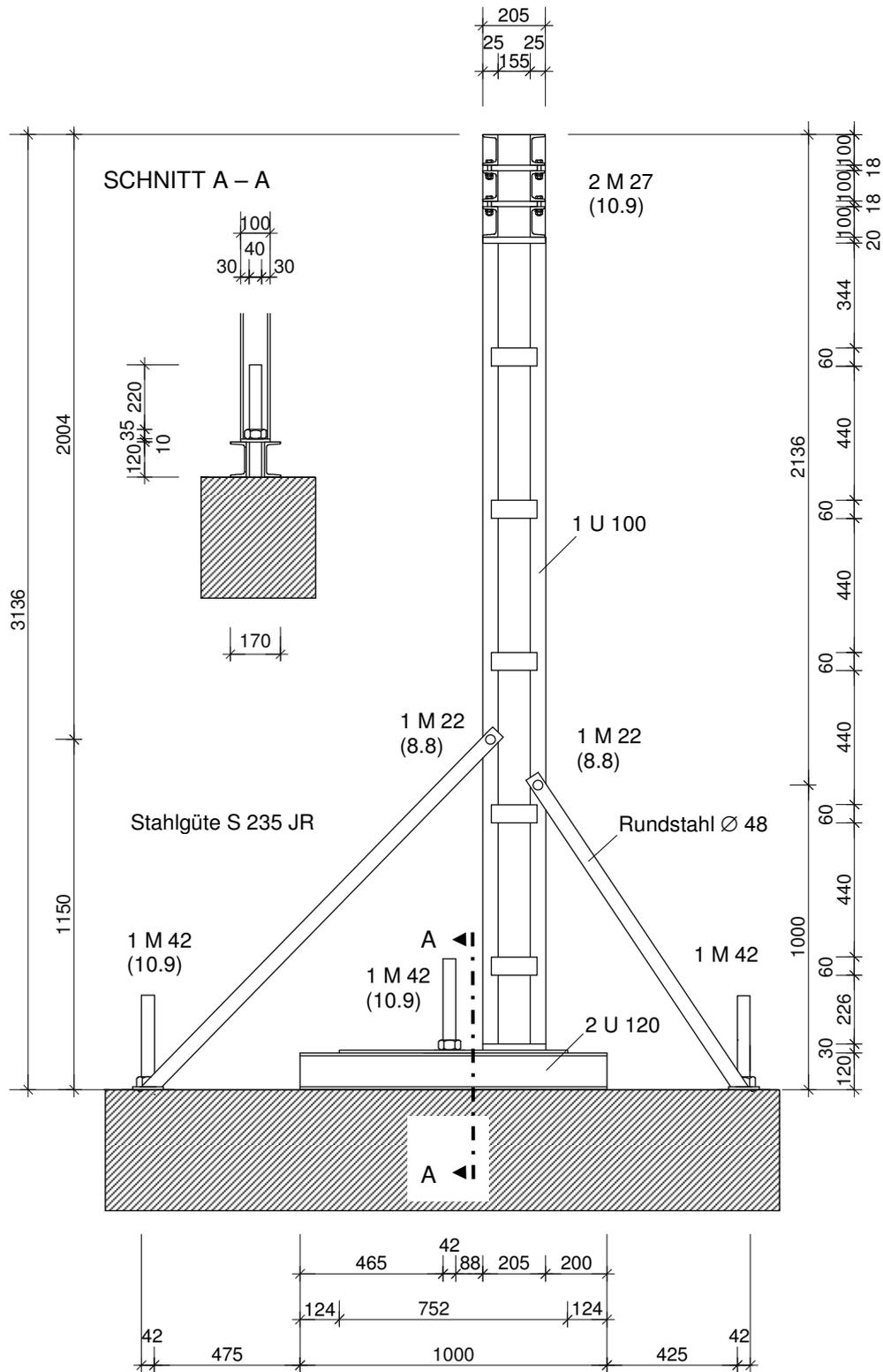
- [191] Tattersall, G. H.; Baker, P. H.: An investigation into the effect of vibration on the workability of fresh concrete using a vertical pipe apparatus. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 41, 1989
- [192] Tattersall, G. H.: *Workability and Quality-Control of Concrete*. Taylor & Francis Group (E & FN Spon), London, 1991
- [193] Tchamba, J. C. et al.: Lateral stress exerted by fresh fluid concrete on formwork: Laboratory experiments. *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 11, 2008
- [194] Tejeda-Dominguez, F., Lange, D. A.; D'Ambrosia, M. A.: Formwork Pressure of Self-Consolidating Concrete (SCC) in Tall Wall Applications. *Transport Research Board of the National Academies (TRB)*, 84<sup>th</sup> Annual Meeting, Washington, D.C., 2005
- [195] Teller, L. W.: The effect of vibration on the pressure of concrete against formwork. *Public Roads*, Vol. 12, No. 1, 1931
- [196] Thienel, K.-C.: *Werkstoffe des Bauwesens. Skriptum, Frühjahrstrimester 2007*, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, 2007
- [197] Toussaint, E.: Schalungsdruck bei großen Betonkörpern. *Österreichische Bauzeitschrift*, 1, 1950
- [198] Toussaint, E.: Beitrag zur Theorie des Schalungsdruckes. *Mayreder-Zeitschrift*, Mai 1973
- [199] Uspenskij, V. P. Über den Schalungsdruck von Frischbeton. *St. Petersburg Polytechnic State University*, Nr. 208, Trudy, 1960
- [200] Vanhove, Y. et al.: Study of Self-Compacting Concrete Pressure on Formwork. In: *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, Ozawa, K. & Ouchi, M. (Hrsg.), COMS Engineering Corporation, Fukui, 2001
- [201] Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.): *Zement-Taschenbuch 2002*. 50. Ausgabe, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 2002
- [202] Vogel, R.: Eine Messzelle für Spezialmörtel. *Mitteilung 07/1*, 16. Regensburger Baustoffkolloquium, Hochschule Regensburg, 2007, [www.vogel-labor.de](http://www.vogel-labor.de), 2008
- [203] Vogt, N.: *Grundbau und Bodenmechanik. Studienunterlagen, Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik*, Zentrum Geotechnik, Technische Universität München, 2002
- [204] vom Berg, W.: Influence of specific surface and concentration of solids upon the flow behaviour of cement pastes. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31, No. 109, London, 1979
- [205] Wallevik, O. H.: *The Rheology of Fresh Concrete and its Application on Concrete with and without Silica Fume*. Dissertation, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 1990

- [206] Wallevik, O. H.; Iversen, K.: Rheological approach in mix design of very high strength concrete. Report, Course Literature, Nordic Rheology Conference, Reykjavik, 1997
- [207] Wallevik, O. H.: Rheology – A scientific approach to develop self-compacting concrete. In: RILEM Proceedings PRO 33 of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Self-Compacting Concrete, Wallevik, O. & Nielsson, I. (Hrsg.), RILEM Publications, Bagnaux, 2003
- [208] Wallevik, J. E.: Rheology of Particle Suspensions – Fresh Concrete, Mortar and Cement Paste with Various Types of Lignosulfonates. Dissertation, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2003
- [209] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile 2 – Beton. Bauverlag, Wiesbaden, 1981
- [210] Westag & Getalit: Großflächen-Schalungsplatten – Der Maßstab im Betonbau. Rheda-Wiedenbrück, 2007
- [211] Wierig, H. J.; Nelskamp, H.: Messstreuungen bei der Prüfung der Frischbetonkonsistenz. Beton, Vol. 33, Nr. 10, 1983
- [212] Wierig, H.-J.: Verfahren zur Prüfung der Konsistenz von Frischmörtel und Frischbeton. Schriftenreihe des Bundesverbands der deutschen Transportbetonindustrie, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1984
- [213] Winnefeld, F.: Rheologische Eigenschaften von Mörteln und Betonen. TEC21, Verlags-AG der akademischen technischen Vereine, Zürich, 2001
- [214] Winnefeld, F.: Rheological behaviour of portland cement pastes during early hydration. Proceedings, 24<sup>th</sup> International Conference on Cement Microscopy, San Diego, 2002
- [215] Witte, A. M.: Le facteurs qui influent sur la poussée laterale exercée par le béton frais sur les parois du coffrage. Béton armé, 5. Jhg., Nr. 33, 1961
- [216] Wolf, B.: Untersuchungen zum Formverhalten mikroskopisch kleiner Fluidtropfen in stationären und instationären Scherströmungen. Dissertation, Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich, 1995
- [217] Wüstholtz, T.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton. Dissertation, Universität Stuttgart, 2005
- [218] Yahia, A.; Khayat, K. H.: Analytical models for estimating yield stress of high performance pseudoplastic grout. Cement and Concrete Research, Vol. 31, 2001
- [219] Yamada, A.; Yanagisawa, T.; Hanehara, S.: Influence of temperature on the dispersibility of polycarboxylate type superplasticizer for highly fluid concrete. In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Pro 7, Skarendahl, A. & Petersson, Ö. (Hrsg.), RILEM Publications, Cachan, 1999

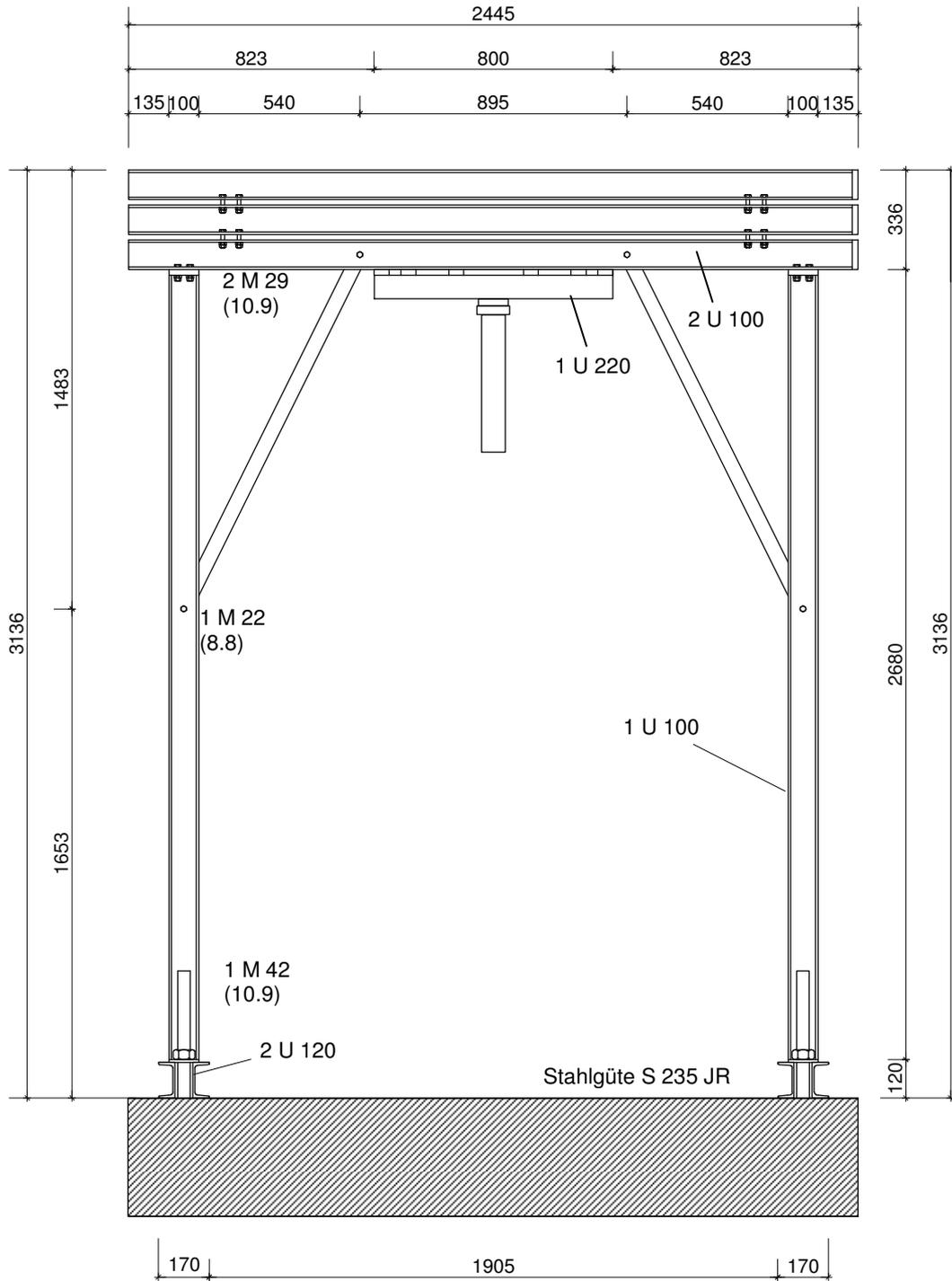
## **Anhang**

Anhang zu Kapitel 3  
Anhang zu Kapitel 4

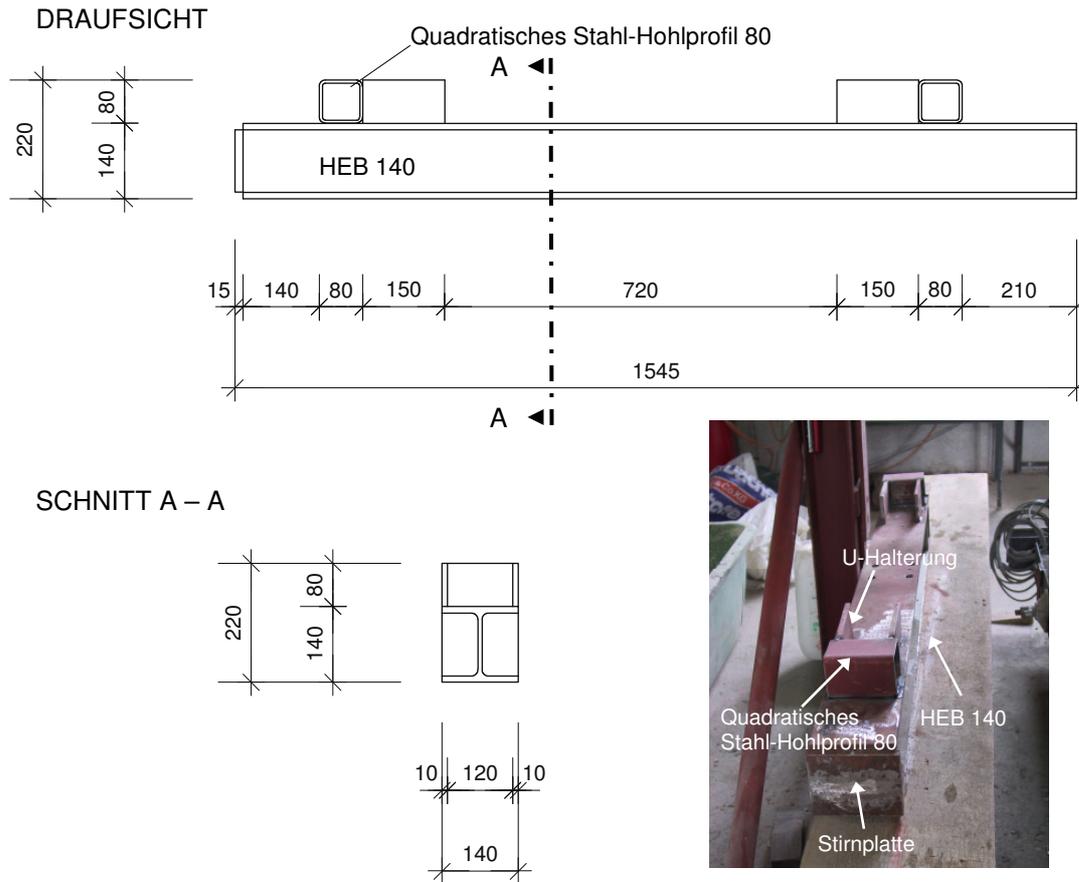
A2  
A9



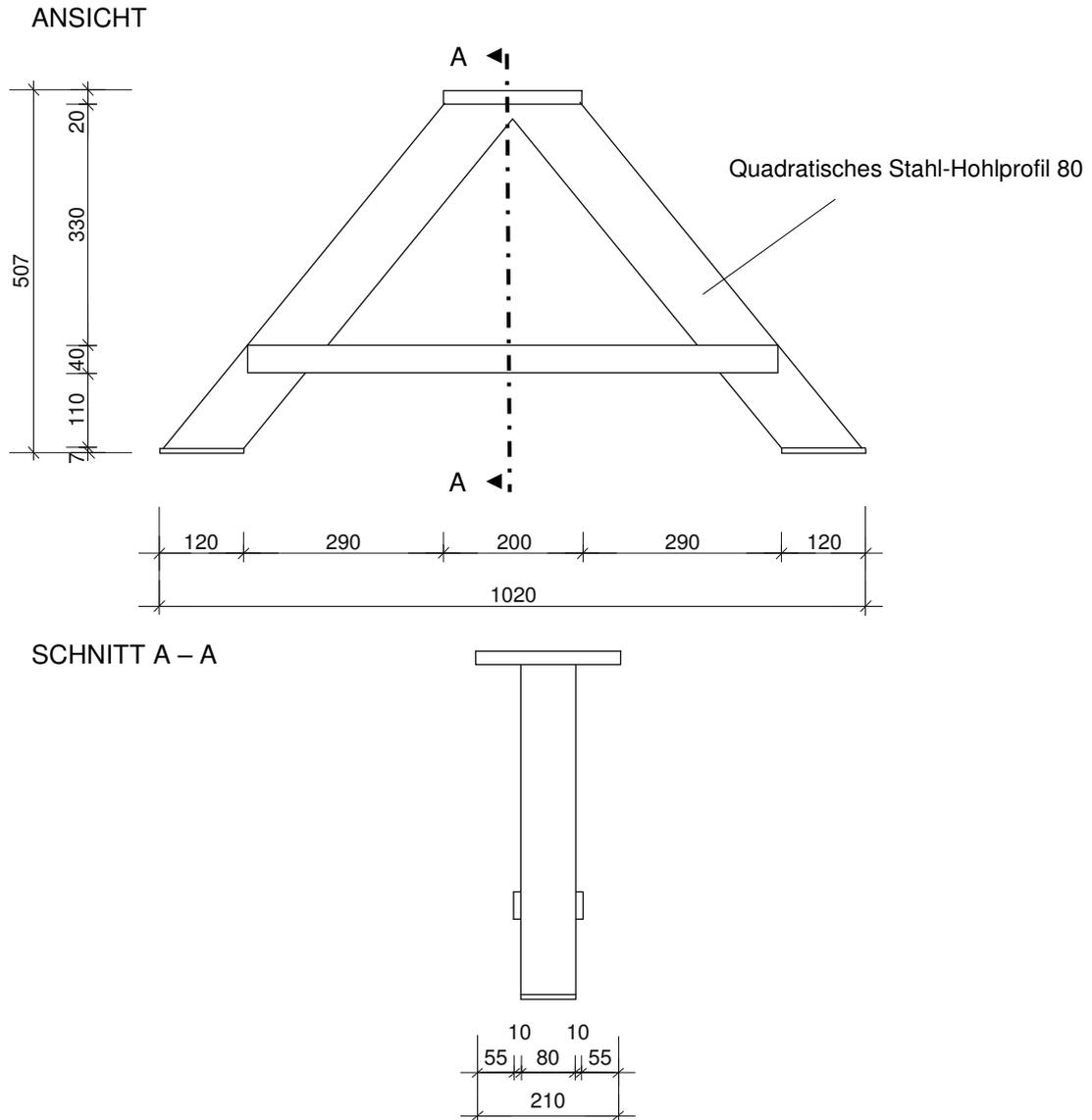
**Bild A 3.1:** Ansicht eines Stahlrahmenstiels zur Befestigung des zentralen Lasteinleitungspunkts des Systems zur Auflastsimulation verschiedener, über die eigentliche Schalungshöhe hinausgehender Einbauhöhen (große Konstruktionszeichnung) und Detailabbildung der Befestigung des zugehörigen Fußpunkts (oben links); alle Abmessungen in [mm]



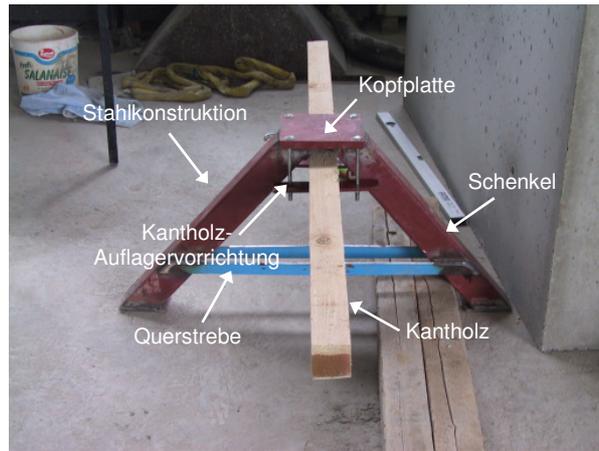
**Bild A 3.2:** Konstruktionszeichnung des Stahlrahmens zum Anbringen der Versuchsaapparatur zur vertikalen Auflastsimulation verschiedener Einbauhöhen; Maße in [mm]



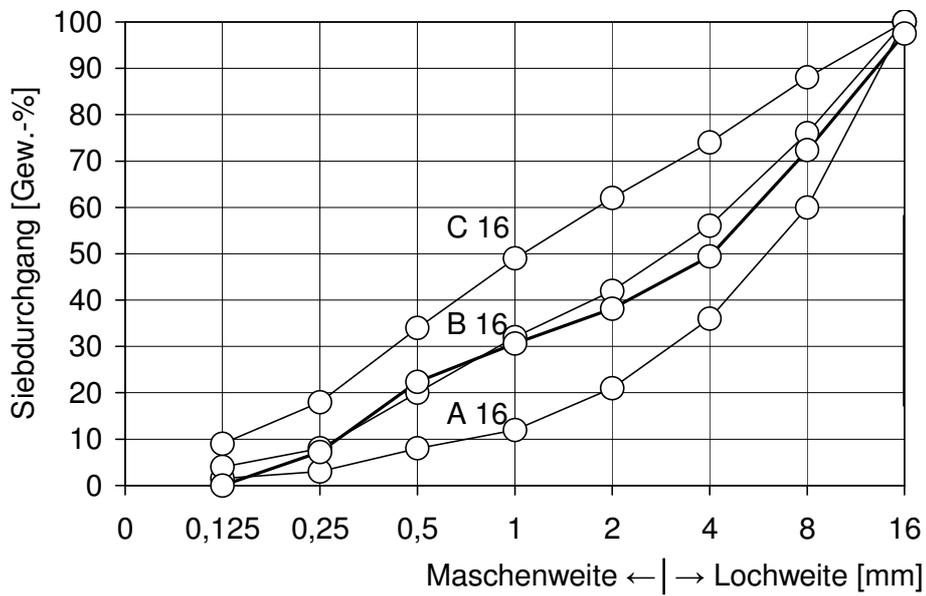
**Bild A 3.3:** *Modifiziertes Stahlprofil HEB 140 zur gleichmäßigen Spannungsübertragung einer vertikal aufgetragenen Belastung auf die auf der Oberfläche des Schalungsinhalts platzierten Bohle – Draufsicht (oben), Querschnitt (unten links) und modifizierte Konstruktion (unten rechts); alle Abmessungen in [mm]*



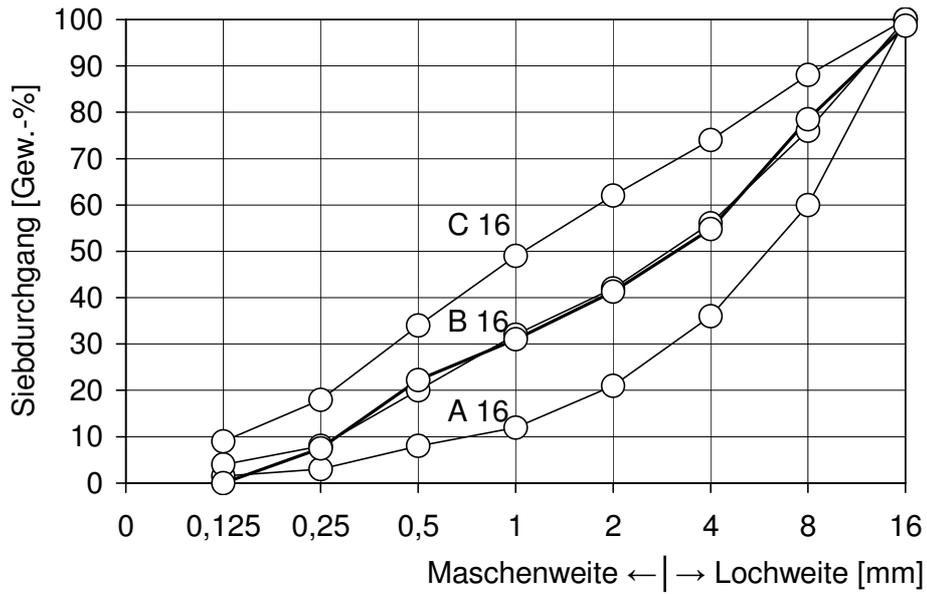
**Bild A 3.4:** Ansicht der Lastverteilungskonstruktion aus Stahl zur Weitergabe der simulierten Last auf das modifizierte HEB-Stahlprofil (oben) und ihr dazugehöriger Querschnitt (unten); alle Abmessungen in [mm]



**Bild A 3.5:** *Stahlkonstruktion zur Spannungsweiterleitung – ausgehend vom Lasteinleitungspunkt des Zylinders am Stahlrahmenriegel – mit entsprechender Vorrichtung zur Gewährleistung eines gleichmäßigen vertikalen Absenkvorgangs*



**Bild A 3.6:** *Sieblinie für die Normalbetone*



**Bild A 3.7:** Sieblineie für die selbstverdichtenden Betone

**Tabelle A 3.1:** Kennwerte des verwendeten Normalbetons NB-I (Einzelwerte)

Einbau- geschwin- digkeit v [m/h]	Frischbetonkennwerte				Festbetonkennwerte
	w/z- Wert	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Luftporen LP [Vol.-%]	Ausbreitmaß a [cm]	Druckfestigkeit $\beta_{w28}$ an Würfeln [N/mm <sup>2</sup> ]
3,5	0,50	2310	1,0	54	54
14	0,50	2346	1,0	58	54

**Tabelle A 3.2:** Kennwerte des verwendeten selbstverdichtenden Betons SVB-I (Einzelwerte)

Einbaugeschwindigkeit $v$ [m/h]	Frischbetonkennwerte					Festbetonkennwerte	
	$w/z_{eq}$ -Wert	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Luftporen LP [Vol.-%]	Setzfließmaß mit/ohne Blockierring [cm]		Auslaufzeit Trichter $t_{tr}$ [s]	Druckfestigkeit $\beta_{w28}$ an Würfeln [N/mm <sup>2</sup> ]
				ohne $s_m$	mit $s_{m_b}$		
3,5	0,33	2329	2,2	75	71	10,6	66
7	0,34	2310	1,8	70	71	10,7	66
14	0,36	2318	2,5	74	75	5,9	69
28	0,37	2289	2,3	74	74	5,2	56
56	0,47	2285	2,2	74	75	8,1	69

**Tabelle A 3.3:** Kennwerte des verwendeten selbstverdichtenden Betons SVB-IV (Einzelwerte)

Einbaugeschwindigkeit $v$ [m/h]	Frischbetonkennwerte					Festbetonkennwerte	
	$w/z_{eq}$ -Wert	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Luftporen LP [Vol.-%]	Setzfließmaß mit/ohne Blockierring [cm]		Auslaufzeit Trichter $t_{tr}$ [s]	Druckfestigkeit $\beta_{w28}$ an Würfeln [N/mm <sup>2</sup> ]
				ohne $s_m$	mit $s_{m_b}$		
10	0,31	2282	3,1	73	72	11	72
15	0,31	2279	3,6	75	72	5,3	66
20	0,28	2288	1,9	75	75	5,6	66
25	0,34	2279	2,4	70	68	6,9	69
30	0,34	2292	2,7	79	78	11,5	65
40	0,34	2274	3	75	75	6,8	63
45	0,32	2280	1,4	75	74	5,7	67
55	0,30	2308	3,6	71	70	12,5	69

**Tabelle A 4.1:** Frischbetondruck des Normalbetons NB-I in Abhängigkeit von der Einbauhöhe ( $v = 3,5 \text{ m/h}$ )

Einbauhöhe $h_E$ [m]	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)								
	Druckmessdose DMD								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	11,1	12,7	13,3	0	0	0	0	0	0
	(12,4; 0,9)			(0; 0)			(0; 0)		
1,0	17,2	18,7	19,6	3,8	4,4	4,3	0	0	0
	(18,5; 1,0)			(4,2; 0,3)			(0; 0)		
1,5	31,4	34,6	35,7	18,7	20,6	20,2	5,1	5,1	5,7
	(33,9; 1,8)			(19,8; 0,8)			(5,3; 0,3)		
2,0	34,5	36,8	37,8	23,3	25,2	26	12,1	11,5	17,3
	(36,4; 1,4)			(24,8; 1,1)			(13,6; 2,6)		
2,5	39,8	41,4	42,9	31,5	31,3	33,9	–	–	–
	(41,4; 1,3)			(32,2; 1,2)			(–; –)		
3,0	40,8	43,2	45	37,3	37	41,1	–	–	–
	(43; 1,7)			(38,5; 1,9)			(–; –)		
3,5	42,9	44,3	46	43,6	46	49,1	–	–	–
	(44,4; 1,3)			(46,2; 2,3)			(–; –)		
4,0	42,7	43,9	44,6	47,6	51,7	53,4	–	–	–
	(43,7; 0,8)			(50,9; 2,4)			(–; –)		
4,5	42,4	44	43,9	51,8	57,9	58	–	–	–
	(43,4; 0,7)			(55,9; 2,9)			(–; –)		
5,0	42,4	43,4	42,6	54,7	62,1	61,4	–	–	–
	(42,8; 0,4)			(59,4; 3,3)			(–; –)		
5,5	42,4	43,4	41,7	54	64,8	61,7	–	–	–
	(42,5; 0,7)			(60,2; 4,5)			(–; –)		
6,0	42,2	42,9	40,5	52	65,8	61	–	–	–
	(41,9; 1)			(59,6; 5,7)			(–; –)		
6,5	42,2	42,3	39,8	53,5	68,3	62,9	–	–	–
	(41,4; 1,2)			(61,6; 6,1)			(–; –)		

Anmerkung:

für  $h_E \geq 2,5 \text{ m}$  evtl. Messwertbeeinflussung an DMD 7 bis DMD 9 durch Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1)

**Tabelle A 4.2:** Frischbetondruck des Normalbetons NB-I in Abhängigkeit von der Einbauhöhe ( $v = 14 \text{ m/h}$ )

Einbauhöhe $h_E$ [m]	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)								
	Druckmessdose DMD								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	10,6	10,6	10,9	0	0	0	0	0	0
	(10,7; 0,1)			(0; 0)			(0; 0)		
1	22,8	23	22,8	8,3	8,6	10,5	0	0	0
	(22,9; 0,1)			(9,1; 1)			(0; 0)		
1,5	34,8	34,9	35,8	18,9	20,8	20,6	5,6	5,6	6,2
	(35,2; 0,4)			(20,1; 0,9)			(5,8; 0,3)		
2	42	42,1	43,4	27,2	30,1	30	15,8	14,2	18,2
	(42,5; 0,6)			(29,1; 1,3)			(16,1; 1,6)		
2,5	48,3	49,9	51,7	35,2	39,3	39,5	25,2	22	29,3
	(50; 1,4)			(38; 2)			(25,5; 3)		
3	55,5	58,7	60,7	44,3	49,1	49,4	35,4	33	40,4
	(58,3; 2,1)			(47,6; 2,3)			(36,3; 3,1)		
3,5	62,1	66,9	68,8	53,3	58	58,8	45,3	42,4	52,6
	(65,9; 2,8)			(56,7; 2,4)			(46,8; 4,3)		
4	79,5	78,2	79,2	63,3	66,5	68	–	–	–
	(79; 0,6)			(65,9; 2)			(–; –)		
4,5	80	83	83,6	70,5	74,3	75,8	–	–	–
	(82,2; 1,6)			(73,5; 2,2)			(–; –)		
5	79,4	86	86	75,3	80,2	81,4	–	–	–
	(83,8; 3,1)			(79; 2,6)			(–; –)		
5,5	116,8	113,2	115,9	95,9	103,4	101,5	–	–	–
	(115,3; 1,5)			(100,3; 3,2)			(–; –)		
6	118,9	115,9	118,2	99,9	107,4	105,4	–	–	–
	(117,7; 1,3)			(104,2; 3,2)			(–; –)		
6,5	120	119,9	121	106	113,7	111,4	–	–	–
	(120,3; 0,5)			(110,4; 3,2)			(–; –)		

Anmerkung:

für  $h_E \geq 4 \text{ m}$  evtl. Messwertbeeinflussung an DMD 7 bis DMD 9 durch Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1)

**Tabelle A 4.3:** Frischbetondruck des Normalbetons NB-II in Abhängigkeit von der Einbauhöhe ( $v = 14 \text{ m/h}$ )

Einbauhöhe $h_E$ [m]	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)								
	Druckmessdose DMD								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	5,9	10,2	10,2	0	0	0	0	0	0
	(8,8; 2)			(0; 0)			(0; 0)		
1	18,8	30,2	21,6	4,7	7	7,5	0	0	0
	(23,5; 4,9)			(6,4; 1,2)			(0; 0)		
1,5	32,3	33,9	35,5	18,8	20,7	20,4	5	5,1	5,6
	(33,9; 1,3)			(20; 0,8)			(5,2; 0,3)		
2	39,2	41,4	43,3	27	30	29,5	14,6	15	18
	(41,3; 1,7)			(28,8; 1,3)			(15,9; 1,5)		
2,5	50	51,8	53,2	37,2	40,8	40,1	25,7	24,7	29,9
	(51,7; 1,3)			(39,4; 1,6)			(26,8; 2,3)		
3	55,4	58,3	58,9	44,8	49,2	48,2	35,1	33,6	40,7
	(57,5; 1,5)			(47,4; 1,9)			(36,5; 3,1)		
3,5	69	71,8	72,5	56,3	61	59,7	45,9	46,2	51,4
	(71,1; 1,5)			(59; 2)			(47,8; 2,5)		
4	75,5	78,9	78,5	63	68,1	66,6	54	53,5	60,3
	(77,6; 1,5)			(65,9; 2,1)			(55,9; 3,1)		
4,5	78,7	83,8	80,5	68,6	74,5	72,9	–	–	–
	(81; 2,1)			(72; 2,5)			(–; –)		
5	79,8	86,3	83,3	73,6	81,4	79,2	–	–	–
	(83,1; 2,7)			(78,1; 3,3)			(–; –)		
5,5	90,3	93,2	88,9	82,8	89	86,9	–	–	–
	(90,8; 1,8)			(86,2; 2,6)			(–; –)		
6	86,9	92,6	89,3	86,7	94,2	91,7	–	–	–
	(89,6; 2,3)			(90,9; 3,1)			(–; –)		
6,5	87,2	93,3	91,3	93	100,5	96,2	–	–	–
	(90,6; 2,5)			(96,6; 3,1)			(–; –)		

Anmerkung:

für  $h_E \geq 4,5 \text{ m}$  evtl. Messwertbeeinflussung an DMD 7 bis DMD 9 durch Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1)

**Tabelle A 4.4:** *Frischbetondruck des Normalbetons NB-III in Abhängigkeit von der Einbauhöhe ( $v = 14 \text{ m/h}$ )*

Einbauhöhe $h_E$ [m]	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)								
	Druckmessdose DMD								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	9,5	9,2	9,6	0	0	0	0	0	0
	(9,4; 0,2)			(0; 0)			(0; 0)		
1	23,4	24,3	25,7	9	10,6	10,7	0	0	0
	(24,5; 0,9)			(10,1; 0,8)			(0; 0)		
1,5	33,3	34	35,6	19	20,5	20,1	5,1	5,1	5,9
	(34,3; 1)			(19,9; 0,6)			(5,4; 0,4)		
2	38	40,4	42,8	26	28,8	29	15,7	15,3	17,7
	(40,4; 2)			(27,9; 1,4)			(16,2; 1)		
2,5	44,1	48,2	51,2	34,7	38,1	38,1	25,2	24,6	28,8
	(47,8; 2,9)			(37; 1,6)			(26,2; 1,9)		
3	52,8	55,7	59,6	43,3	47,5	47,5	35,2	34,9	41,6
	(56; 2,8)			(46,1; 2)			(37,2; 3,1)		
3,5	64,5	70,2	71,9	55	59,1	58,4	–	–	–
	(68,9; 3,2)			(57,5; 1,8)			(–; –)		
4	68,9	74,5	77	61,3	66,7	65,6	–	–	–
	(73,5; 3,4)			(64,5; 2,3)			(–; –)		
4,5	76,2	76,4	80,9	67,6	75,6	73,1	–	–	–
	(77,8; 2,2)			(72,1; 3,3)			(–; –)		
5	76,7	79,3	85	75,5	83,8	81,5	–	–	–
	(80,3; 3,5)			(80,3; 3,5)			(–; –)		
5,5	81,4	81,9	86,9	82	90,5	88,1	–	–	–
	(83,4; 2,5)			(86,9; 3,6)			(–; –)		
6	81,6	82,4	87,4	87,7	96	94	–	–	–
	(83,8; 2,6)			(92,6; 3,5)			(–; –)		
6,5	82	83,6	88,2	93,7	102,2	100	–	–	–
	(84,6; 2,6)			(98,6; 3,6)			(–; –)		

Anmerkung:

für  $h_E \geq 3,5 \text{ m}$  evtl. Messwertbeeinflussung an DMD 7 bis DMD 9 durch Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1)

**Tabelle A 4.5:** *Frischbetondruck des selbstverdichtenden Betons SVB-I in Abhängigkeit von der Einbauhöhe ( $v = 3,5 \text{ m/h}$ )*

Einbau- höhe $h_E$ [m]	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)								
	Druckmessdose DMD								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	9	9,2	9,5	0	0	0	0	0	0
	(9,2; 0,2)			(0; 0)			(0; 0)		
1	20,5	19,8	20,8	6,7	7,3	7,1	0	0	0
	(20,4; 0,4)			(7; 0,2)			(0; 0)		
1,5	28,8	26,8	27,9	15,4	18,2	17,3	1,2	1	1,4
	(27,8; 0,8)			(17; 1,2)			(1,2; 0,2)		
2	35,4	32,4	33,8	20	23,3	22,2	1,5	1,2	1,6
	(33,9; 1,2)			(21,8; 1,4)			(1,4; 0,2)		
2,5	44,8	41	41,9	29,4	33,2	31,4	2,6	1,6	2,5
	(42,6; 1,6)			(31,3; 1,6)			(2,2; 0,4)		
3	51,7	47,4	48	43,2	46,8	43,8	–	–	–
	(49; 1,9)			(44,6; 1,6)			(–; –)		
3,5	60,5	56,5	56,9	55	58,6	56	–	–	–
	(58; 1,8)			(56,5; 1,5)			(–; –)		
4	69,5	66,2	65,8	59,5	65,9	62,6	–	–	–
	(67,2; 1,7)			(62,7; 2,6)			(–; –)		
4,5	70,5	67,8	66,9	70	72,5	69,7	–	–	–
	(68,4; 1,5)			(70,7; 1,3)			(–; –)		
5	70,8	68,9	67,6	72,4	74,6	72,6	–	–	–
	(69,1; 1,3)			(73,2; 1)			(–; –)		
5,5	71,8	70,7	69,1	74,1	76,2	74,5	–	–	–
	(70,5; 1,1)			(74,9; 0,9)			(–; –)		
6	72,7	72,8	70,8	73,9	76,2	76,1	–	–	–
	(72,1; 0,9)			(75,4; 1,1)			(–; –)		
6,5	73,5	74,2	70,8	73,2	76,6	77,1	–	–	–
	(72,8; 1,5)			(75,6; 1,7)			(–; –)		

Anmerkung:

für  $h_E \geq 3 \text{ m}$  evtl. Messwertbeeinflussung an DMD 7 bis DMD 9 durch Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1)

**Tabelle A 4.6:** Frischbetondruck des selbstverdichtenden Betons SVB-I in Abhängigkeit von der Einbauhöhe ( $v = 7 \text{ m/h}$ )

Einbau- höhe $h_E$ [m]	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)								
	Druckmessdose DMD								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	9,7	9,9	10,1	0	0	0	0	0	0
	(9,9; 0,2)			(0; 0)			(0; 0)		
1	20,4	21	21,5	6	6,7	6,5	0	0	0
	(21; 0,4)			(6,4; 0,3)			(0; 0)		
1,5	33,8	34,7	35,3	19	20,6	20,4	5,5	5,3	5,9
	(34,6; 0,6)			(20; 0,7)			(5,6; 0,2)		
2	44,1	45,4	46,3	30,2	33	32,5	17,9	17,6	19,1
	(45,3; 0,9)			(31,9; 1,2)			(18,2; 0,6)		
2,5	52,6	54,6	55,6	40,1	44,1	43,3	29,1	28,7	30,7
	(54,3; 1,2)			(42,5; 1,7)			(29,5; 0,9)		
3	62,2	65,7	66,4	51,7	57,1	56,3	–	–	–
	(64,8; 1,8)			(55; 2,4)			(–; –)		
3,5	69,7	76	75,3	60,8	66,5	65,5	–	–	–
	(73,7; 2,8)			(64,3; 2,5)			(–; –)		
4	75,5	84,6	82,5	70,3	77,2	75,9	–	–	–
	(80,9; 3,9)			(74,5; 3)			(–; –)		
4,5	79,6	91,6	88,2	79	86,9	85,4	–	–	–
	(86,5; 5)			(83,8; 3,4)			(–; –)		
5	95,4	102,1	102,6	84,7	92	90,6	–	–	–
	(100; 3,3)			(89,1; 3,2)			(–; –)		
5,5	101,8	111,8	110,6	92,8	103,4	99,5	–	–	–
	(108,1; 4,5)			(98,6; 4,4)			(–; –)		
6	112,3	115,7	117,3	97,5	104,8	103,4	–	–	–
	(115,1; 2,1)			(101,9; 3,2)			(–; –)		
6,5	115,9	119,9	121,6	101,9	109,7	108,3	–	–	–
	(119,1; 2,4)			(106,6; 3,4)			(–; –)		

Anmerkung:

für  $h_E \geq 3 \text{ m}$  evtl. Messwertbeeinflussung an DMD 7 bis DMD 9 durch Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1)

**Tabelle A 4.7:** Frischbetondruck des selbstverdichtenden Betons SVB-I in Abhängigkeit von der Einbauhöhe ( $v = 14 \text{ m/h}$ )

Einbau- höhe $h_E$ [m]	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)								
	Druckmessdose DMD								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	5,3	6,2	6,4	0	0	0	0	0	0
	(6; 0,5)			(0; 0)			(0; 0)		
1	17,2	18,6	19,1	4	4,7	4,4	0	0	0
	(18,3; 0,8)			(4,4; 0,3)			(0; 0)		
1,5	31,5	33,8	34,5	18,5	20,5	19,8	5,3	5,3	5,8
	(33,3; 1,3)			(19,6; 0,8)			(5,5; 0,2)		
2	43,1	46,3	47,2	27,7	30,6	29,7	12,3	12,4	13,6
	(45,5; 1,8)			(29,3; 1,2)			(12,8; 0,6)		
2,5	44,5	47,2	47,9	32,5	34,8	33,9	20,7	19,8	21,6
	(46,5; 1,5)			(33,7; 0,9)			(20,7; 0,7)		
3	54,3	58,3	59,3	42,4	46,5	45,5	31,6	31,5	34
	(57,3; 2,2)			(44,8; 1,7)			(32,4; 1,2)		
3,5	63,6	68,3	68,8	51,9	56,5	55,1	41,9	41,9	45,8
	(66,9; 2,3)			(54,5; 1,9)			(43,2; 1,8)		
4	73,6	79,2	80	62,5	67,7	66,7	–	–	–
	(77,6; 2,8)			(65,6; 2,3)			(–; –)		
4,5	82,9	89,7	90,4	72,7	78,7	77,7	–	–	–
	(87,7; 3,4)			(76,4; 2,6)			(–; –)		
5	93,1	99,9	100,7	82,3	88,9	87,7	–	–	–
	(97,9; 3,4)			(86,3; 2,9)			(–; –)		
5,5	100,3	107	107,9	88,3	95,6	93,7	–	–	–
	(105,1; 3,4)			(92,5; 3,1)			(–; –)		
6	113,2	120,6	121,9	101,5	109,6	107,9	–	–	–
	(118,6; 3,8)			(106,3; 3,5)			(–; –)		
6,5	123,1	130,9	132,1	111,4	120,3	118,3	–	–	–
	(128,7; 4)			(116,7; 3,8)			(–; –)		

Anmerkung:

für  $h_E \geq 4 \text{ m}$  evtl. Messwertbeeinflussung an DMD 7 bis DMD 9 durch Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1)

**Tabelle A 4.8:** Frischbetondruck des selbstverdichtenden Betons SVB-I in Abhängigkeit der Einbauhöhe ( $v = 28 \text{ m/h}$ )

Einbau- höhe $h_E$ [m]	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)								
	Druckmessdose DMD								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	8,7	11	10,4	0	0	0	0	0	0
	(10; 1)			(0; 0)			(0; 0)		
1	20,3	26,1	22,6	8	7,2	8,6	0	0	0
	(23; 2,4)			(7,9; 0,6)			(0; 0)		
1,5	31,6	39,3	35,1	20,3	18,2	21	6	7,9	6,1
	(35,3; 3,1)			(19,8; 1,2)			(6,7; 0,9)		
2	40,8	50,3	45,4	30,6	27,7	31,7	16,2	20,4	16,4
	(45,5; 3,9)			(30; 1,7)			(17,7; 1,9)		
2,5	50,2	60,9	55,8	41	37,3	42,3	26,7	32,4	26,9
	(55,6; 4,4)			(40,2; 2,1)			(28,7; 2,6)		
3	60,8	72,9	67,3	52,3	47,9	54,1	38,1	45,2	38,4
	(67; 4,9)			(51,4; 2,6)			(40,6; 3,3)		
3,5	70,5	83,7	78	62,9	57,8	65	48,7	56,8	49,2
	(77,4; 5,4)			(61,9; 3)			(51,6; 3,7)		
4	79,1	93,1	87,4	72,6	66,9	75	–	–	–
	(86,5; 5,7)			(71,5; 3,4)			(–; –)		
4,5	89,3	104,4	98,6	83,5	77,2	86,3	–	–	–
	(97,4; 6,2)			(82,3; 3,8)			(–; –)		
5	98	113,9	108,1	93,1	86,1	96,1	–	–	–
	(106,7; 6,6)			(91,8; 4,2)			(–; –)		
5,5	106,9	123,9	118,1	103,2	95,6	106,5	–	–	–
	(116,3; 7,1)			(101,8; 4,6)			(–; –)		
6	115,9	133,5	127,8	113,2	105	116,8	–	–	–
	(125,7; 7,3)			(111,7; 4,9)			(–; –)		
6,5	124,4	142,3	136,6	121,5	112,9	125,2	–	–	–
	(134,4; 7,5)			(119,9; 5,2)			(–; –)		

Anmerkung:

für  $h_E \geq 4 \text{ m}$  evtl. Messwertbeeinflussung an DMD 7 bis DMD 9 durch Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1)

**Tabelle A 4.9:** *Frischbetondruck des selbstverdichtenden Betons SVB-I in Abhängigkeit von der Einbauhöhe ( $v = 56$  m/h)*

Einbau- höhe $h_E$ [m]	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)								
	Druckmessdose DMD								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	12,3	13,3	14,1	0	0	0	0	0	0
	(13,2; 0,7)			(0; 0)			(0; 0)		
1	23,8	25	26,1	10,5	11,8	11,9	0	0	0
	(25; 0,9)			(11,4; 0,6)			(0; 0)		
1,5	30,9	32,4	33,6	17,5	19,1	19,3	4,9	5,1	6
	(32,3; 1,1)			(18,6; 0,8)			(5,3; 0,5)		
2	41,2	43,7	45,2	28,4	31,1	31,1	16,4	16,5	18,2
	(43,4; 1,6)			(30,2; 1,3)			(17; 0,8)		
2,5	52,6	55,4	57,1	39,5	42,9	42,8	28,2	28,2	30,8
	(55; 1,9)			(41,7; 1,6)			(29,1; 1,2)		
3	62,7	66,3	68,2	50,1	54,4	54,2	39,7	39,6	42,9
	(65,7; 2,3)			(52,9; 2)			(40,7; 1,5)		
3,5	71,8	75,9	77,8	58,9	63,8	63,5	48,9	48,7	52,4
	(75,2; 2,5)			(62,1; 2,2)			(50; 1,7)		
4	82,4	87,3	89,4	70,1	75,9	75,7	61,5	60,9	65,2
	(86,4; 2,9)			(73,9; 2,7)			(62,5; 1,9)		
4,5	92,9	98,1	100,1	79,9	86,4	85,9	71,3	69,8	75,1
	(97; 3)			(84,1; 3)			(72,1; 2,2)		
5	102,3	108,2	110,3	89,4	96,5	96	81,4	76,7	85,3
	(106,9; 3,4)			(94; 3,2)			(81,1; 3,5)		
5,5	112,9	119,3	121,5	99,9	107,9	107,4	–	–	–
	(117,9; 3,6)			(105,1; 3,7)			(–; –)		
6	121,5	128,6	130,9	108,7	117,3	116,7	–	–	–
	(127; 4)			(114,2; 3,9)			(–; –)		
6,5	130,4	138	140,3	117,7	126,8	126,2	–	–	–
	(136,2; 4,2)			(123,6; 4,2)			(–; –)		

Anmerkung:

für  $h_E \geq 5,5$  m evtl. Messwertbeeinflussung an DMD 7 bis DMD 9 durch Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1)

**Tabelle A 4.10:** Frischbetondruck des selbstverdichtenden Betons SVB-II in Abhängigkeit von der Einbauhöhe ( $v = 7 \text{ m/h}$ )

Einbau- höhe $h_E$ [m]	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)								
	Druckmessdose DMD								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	8,2	10,4	9,1	0	0	0	0	0	0
	(9,2; 0,9)			(0; 0)			(0; 0)		
1	20,7	24,7	22,1	7,7	7,3	8,5	0	0	0
	(22,5; 1,7)			(7,8; 0,5)			(0; 0)		
1,5	32,1	36,9	33,8	19,5	17,6	19,8	4,8	5	4,6
	(34,3; 2)			(19; 1)			(4,8; 0,2)		
2	35,1	40,6	37,3	23,4	21,6	24	9,4	9,9	9,2
	(37,7; 2,3)			(23; 1)			(9,5; 0,3)		
2,5	44,9	50,6	45,3	34,2	31,5	34,9	20	21,4	20,2
	(46,9; 2,6)			(33,5; 1,5)			(20,5; 0,6)		
3	53,3	59,3	54,1	43,1	39,8	43,9	29,3	31,5	30
	(55,6; 2,7)			(42,3; 1,8)			(30,3; 0,9)		
3,5	62,5	69,2	63,4	53	49,2	54,6	39,2	42,5	40,7
	(65; 3)			(52,3; 2,3)			(40,8; 1,3)		
4	69,9	77,4	71,1	61,4	57,9	64,4	48,4	52,3	51
	(72,8; 3,3)			(61,2; 2,7)			(50,6; 1,6)		
4,5	78,2	85,2	78,7	69,5	67,6	73,8	58	62,2	60,6
	(80,7; 3,2)			(70,3; 2,6)			(60,3; 1,7)		
5	83,8	91	84,7	77,4	75,6	81,8	66,5	71,5	70
	(86,5; 3,2)			(78,3; 2,6)			(69,3; 2,1)		
5,5	91,6	99,1	92,8	85,9	85,9	91,9	77,9	86,5	79,9
	(94,5; 3,3)			(87,9; 2,8)			(81,4; 3,7)		
6	99	103,9	96,2	95,3	93,3	99,1	–	–	–
	(99,7; 3,2)			(95,9; 2,4)			(–; –)		
6,5	104,9	111,3	104,8	103,7	100,3	106	–	–	–
	(107; 3)			(103,3; 2,3)			(–; –)		

Anmerkung:

für  $h_E \geq 6 \text{ m}$  evtl. Messwertbeeinflussung an DMD 7 bis DMD 9 durch Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1)

**Tabelle A 4.11:** Frischbetondruck des selbstverdichtenden Betons SVB-III in Abhängigkeit von der Einbauhöhe ( $v = 7 \text{ m/h}$ )

Einbau- höhe $h_E$ [m]	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)								
	Druckmessdose DMD								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	6,6	7,2	7,6	0	0	0	0	0	0
	(7,1; 0,4)			(0; 0)			(0; 0)		
1	18,6	18,9	20,3	5,9	7,2	6,9	0	0	0
	(19,3; 0,7)			(6,7; 0,6)			(0; 0)		
1,5	30,7	31,2	33,2	17,7	19,7	19,1	5	5,3	5,1
	(31,7; 1,1)			(18,8; 0,8)			(5,1; 0,1)		
2	37,9	38,4	40	26,2	29,1	28,2	14,6	15,2	15,3
	(38,8; 0,9)			(27,8; 1,2)			(15; 0,3)		
2,5	47,9	48,2	49,2	36,5	40	39,3	25,9	27,3	27,4
	(48,4; 0,6)			(38,6; 1,5)			(26,9; 0,7)		
3	55,8	56,7	56,8	45,7	49,8	49,3	36,3	38,4	38,4
	(56,4; 0,4)			(48,3; 1,8)			(37,7; 1)		
3,5	63	64,5	63,3	54,4	59,4	58,9	46,6	49,6	49,3
	(63,6; 0,6)			(57,6; 2,2)			(48,5; 1,3)		
4	67,2	70,1	67,1	61,7	67,4	65,8	55,8	58,1	59,9
	(68,1; 1,4)			(65; 2,4)			(57,9; 1,7)		
4,5	71,2	76,2	71,7	70	76,7	74,2	65,3	63,8	73,5
	(73; 2,2)			(73,6; 2,8)			(67,5; 4,3)		
5	70,3	77,8	73,3	75,5	82,7	79,7	–	–	–
	(73,8; 3,1)			(79,3; 3)			(–; –)		
5,5	69,5	80,2	74,8	82,1	89,8	85,3	–	–	–
	(74,8; 4,4)			(85,7; 3,2)			(–; –)		
6	67,2	79,7	74,2	85,6	94,6	88,8	–	–	–
	(73,7; 5,1)			(89,7; 3,7)			(–; –)		
6,5	65	79,2	73,3	89,4	100	93,2	–	–	–
	(72,5; 5,8)			(94,2; 4,4)			(–; –)		

Anmerkung:

für  $h_E \geq 5 \text{ m}$  evtl. Messwertbeeinflussung an DMD 7 bis DMD 9 durch Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1)

**Tabelle A 4.12:** Frischbetondruck des selbstverdichtenden Betons SVB-II in Abhängigkeit von der Einbauhöhe ( $v = 7 \text{ m/h}$ ) zur Reproduzierbarkeit der Modellschalungssystem-Versuche

Einbauhöhe $h_E$ [m]	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)								
	Druckmessdose DMD								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	6,4	8,1	8,8	0	0	0	0	0	0
	(7,8; 1)			(0; 0)			(0; 0)		
1	18,3	19,7	21,6	7,8	10	9,3	0	0	0
	(19,8; 1,3)			(9; 0,9)			(0; 0)		
1,5	25,6	28	32,2	18	20,8	19,7	5,4	5,6	6,1
	(28,6; 2,7)			(19,5; 1,1)			(5,7; 0,3)		
2	26,4	28,8	33,9	23,1	28,6	27,3	–	–	–
	(29,7; 3,1)			(26,3; 2,4)			(–; –)		
2,5	41,8	43,2	39,9	33,6	37,4	35,7	–	–	–
	(41,6; 1,3)			(35,6; 1,6)			(–; –)		
3	57,3	61,2	62,5	46,9	51,4	48,7	–	–	–
	(60,4; 2,2)			(49; 1,9)			(–; –)		
3,5	61,8	66,1	65,7	52,8	56,3	52,1	–	–	–
	(64,5; 2)			(53,7; 1,9)			(–; –)		
4	65,7	70,9	69,3	59,3	62,4	56,7	–	–	–
	(68,6; 2,2)			(59,5; 2,3)			(–; –)		

Anmerkung:

für  $h_E \geq 2 \text{ m}$  evtl. Messwertbeeinflussung an DMD 7 bis DMD 9 durch Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1)

**Tabelle A 4.13:** Schalungsdruck der Mörtel ZM ( $v = 14 \text{ m/h}$ ) und SVZM ( $v = 7 \text{ m/h}$ ) bei einer Einbauhöhe von 6,5 m

Mörtel	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)								
	Druckmessdose DMD								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ZM	41,7	63,8	56,2	50,3	65,2	71,2	–	–	–
	(53,9; 9,18)			(62,2; 8,8)			(–; –)		
SVZM	101,1	116,9	109,9	98,6	90,8	99,6	–	–	–
	(109,3; 6,5)			(96,4; 3,92)			(–; –)		

Anmerkung:

Messwertbeeinflussung evtl. an DMD 7 bis DMD 9 durch Auflastvorrichtung (siehe Abschnitt 3.3.2.1)

**Tabelle A 4.14:** Einbauzeit und -impuls im Rahmen der Untersuchung des Einflusses der Einbaugeschwindigkeit auf den Frischbetondruck an der DMD 5

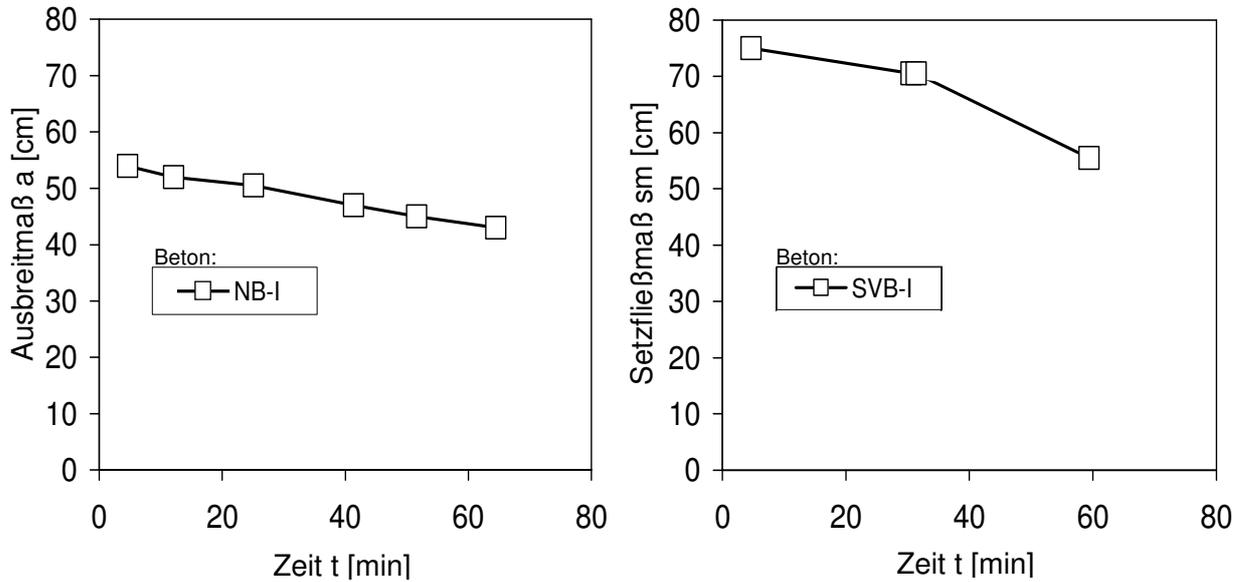
Beton	Einbau- geschwindigkeit v [m/h]	Einbauhöhe h [m]	Einbauzeit t [h]	Impuls $\sigma_{\text{imp}}$ [N/m <sup>2</sup> ]
NB-I	3,5	1	0,29	2,24
		3	0,86	
		6	1,71	
	14	1	0,07	35,82
		3	0,21	
		6	0,43	
SVB-I	3,5	1	0,29	2,21
		3	0,86	
		6	1,71	
	7	1	0,14	8,85
		3	0,43	
		6	0,86	
	14	1	0,07	35,42
		3	0,21	
		6	0,43	
	28	1	0,04	141,68
		3	0,11	
		6	0,22	
	56	1	0,02	566,71
		3	0,05	
		6	0,11	

**Tabelle A 4.15:** Thixotropiekoeffizienten  $C_{thix}$  des Normalbetons NB-I und selbstverdichtenden Betons SVB-I zur Ermittlung der Fließgrenze in Abhängigkeit von der Zeit

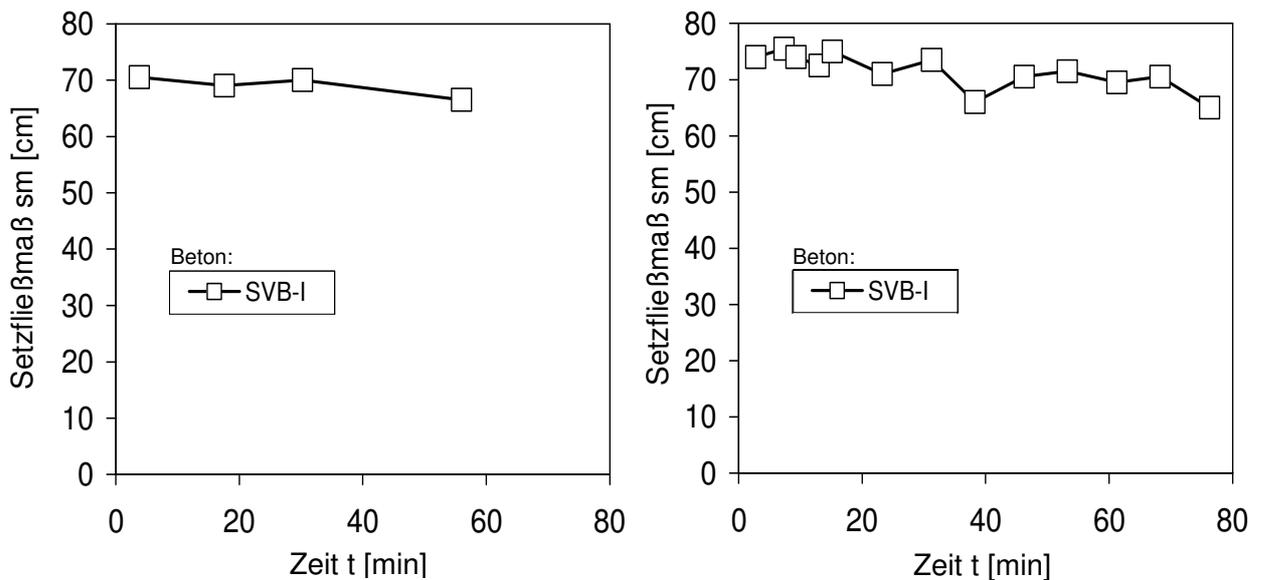
Beton	Einbaugeschwindigkeit $v$ [m/h]	Thixotropiekoeffizient $C_{thix}$ [kN/m <sup>2</sup> ·h]
NB-I	3,5	1,5
	14	1,5
SVB-I	3,5	0,8
	7	0,7
	14	0,9
	28	0,4
	56	1,1

**Tabelle A 4.16:** Frischbetondruck des selbstverdichtenden Betons SVB-IV in Abhängigkeit von der Einbaugeschwindigkeit

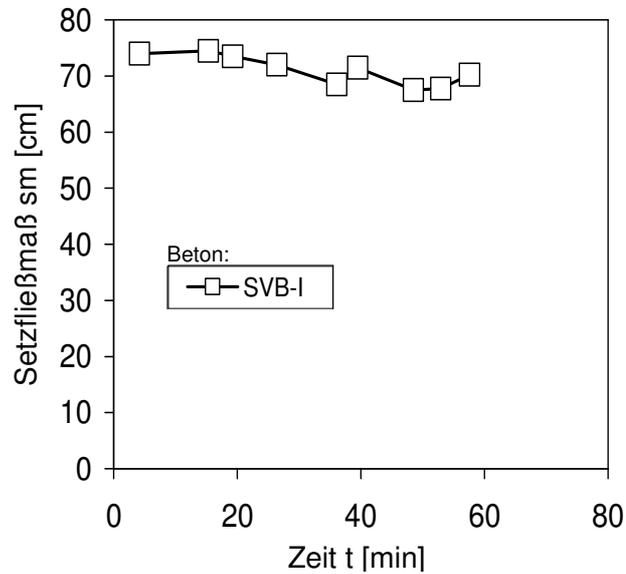
Einbau- geschwindigkeit v [m/h]	Frischbetondruck $\sigma_h$ [kN/m <sup>2</sup> ] (Mittelwert; Standardabweichung)							
	Druckmessdose DMD							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10	76,9	54,1	40,6	43	26,1	24,6	10	10,1
			(41,8; 1,2)		(25,3;0,7)		(10; 0)	
15	61,2	54,8	40,2	42,1	25,9	25	10,4	10,6
			(41,2; 1)		(25,4;0,5)		(10,5;0)	
20	67,4	55,4	40,7	42,8	26	25,2	10,1	10,3
			(41,8;1)		(25,6; 0,4)		(10,2;0,1)	
25	63,5	52,1	37	40,1	22,3	21,2	6,7	6,9
			(38,6; 1,6)		(21,8; 0,6)		(6,8;0,1)	
30	62,8	56,1	41,3	43,1	26,9	25,8	11,3	11,4
			(42,2; 0,9)		(26,4; 0,6)		(11,3;0,1)	
30 (Reproduzierb.)	62,5	55,5	40,6	43,7	26	24,7	10,1	10,3
			(42,5; 1,5)		(25,3; 0,6)		(10,2;0,1)	
40	61	54,3	39,8	41,6	25,8	24,8	10,4	10,6
			(40,7; 0,9)		(25,3; 0,5)		(10,5; 0,1)	
45	63	55,9	40,9	42,5	26,6	25,7	10,8	11
			(41,7; 0,8)		(26,1; 0,4)		(10,9; 0,1)	
55	63,3	56,8	41,5	41,5	27,8	26,7	11,4	11,7
			(41,5; 0)		(27,2; 0,6)		(11,6; 0,1)	



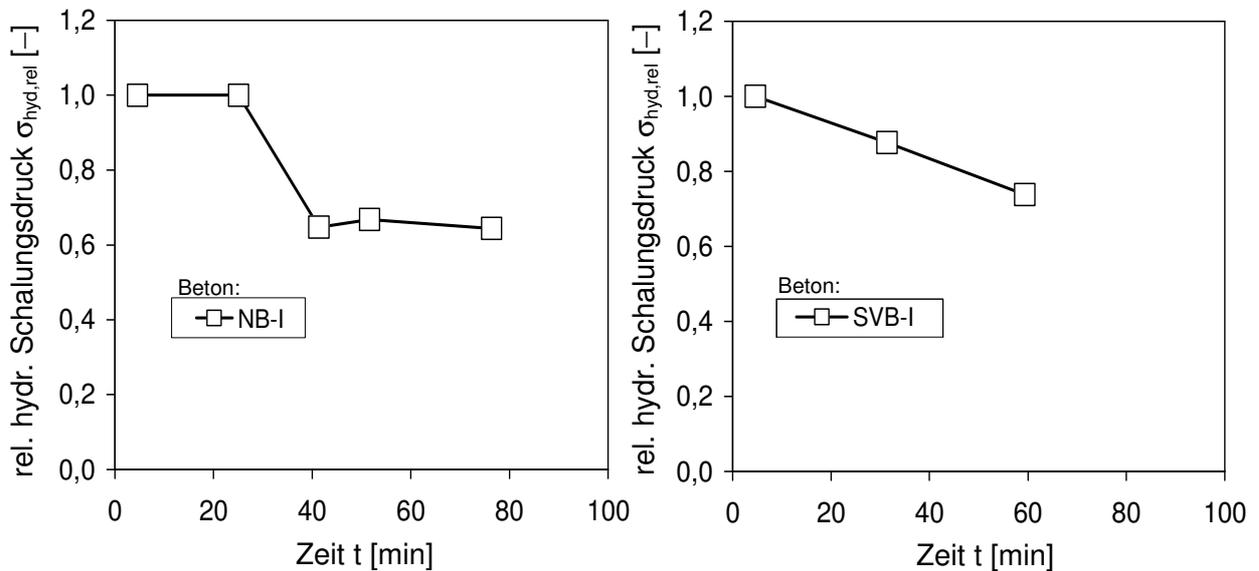
**Bild A 4.1:** Ausbreitmaß  $a$  des Normalbetons NB-I (links) und Setzfließmaß  $sm$  des selbstverdichtenden Betons SVB-I (rechts) in Abhängigkeit von der Ansteif- bzw. Hydratationszeit ( $v = 3,5 \text{ m/h}$ )



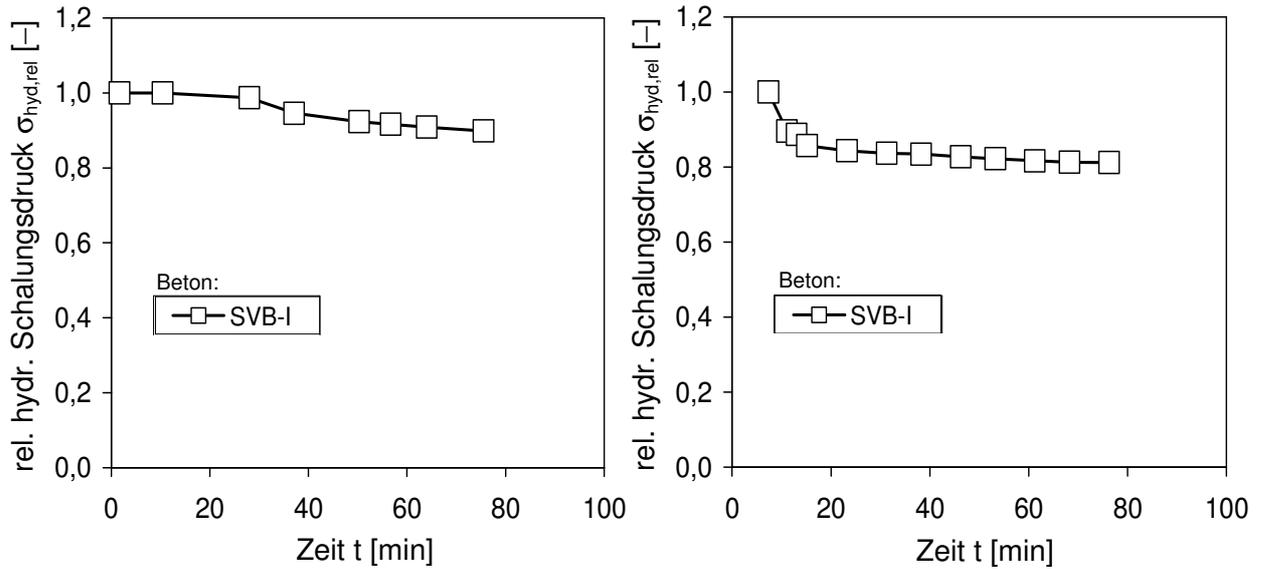
**Bild A 4.2:** Setzfließmaß  $sm$  des selbstverdichtenden Betons SVB-I ( $v = 14 \text{ m/h}$ , links bzw.  $v = 28 \text{ m/h}$ , rechts) in Abhängigkeit von der Ansteif- bzw. Hydratationszeit



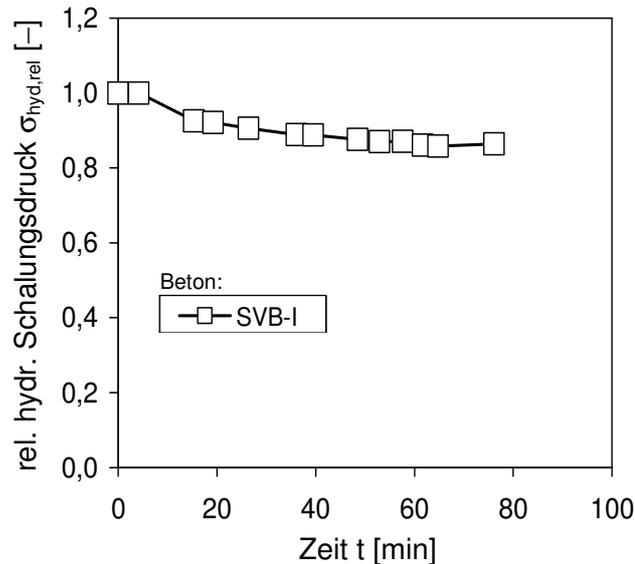
**Bild A 4.3:** *Setzfließmaß  $sm$  des selbstverdichtenden Betons SVB-I in Abhängigkeit von der Ansteif- bzw. Hydratationszeit ( $v = 56$  m/h)*



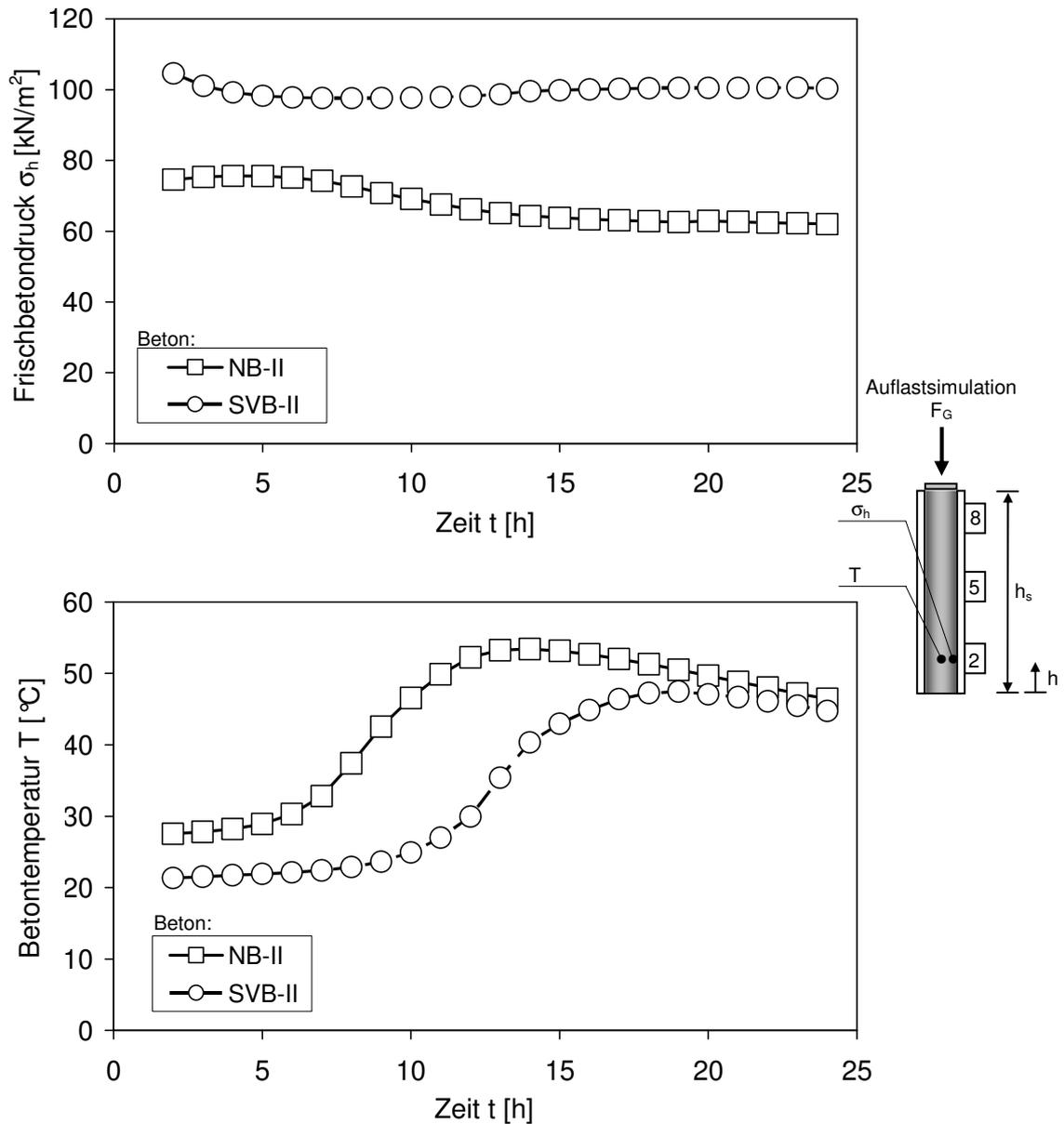
**Bild A 4.4:** *Relativer hydrostatischer Schalungsdruck  $\sigma_{hyd,rel}$  an der Druckmessdose DMD 5 des Normalbetons NB-I ( $v = 3,5$  m/h, links) sowie des selbstverdichtenden Betons SVB-I ( $v = 3,5$  m/h, rechts) in Abhängigkeit von der Ansteif- bzw. Hydratationszeit*



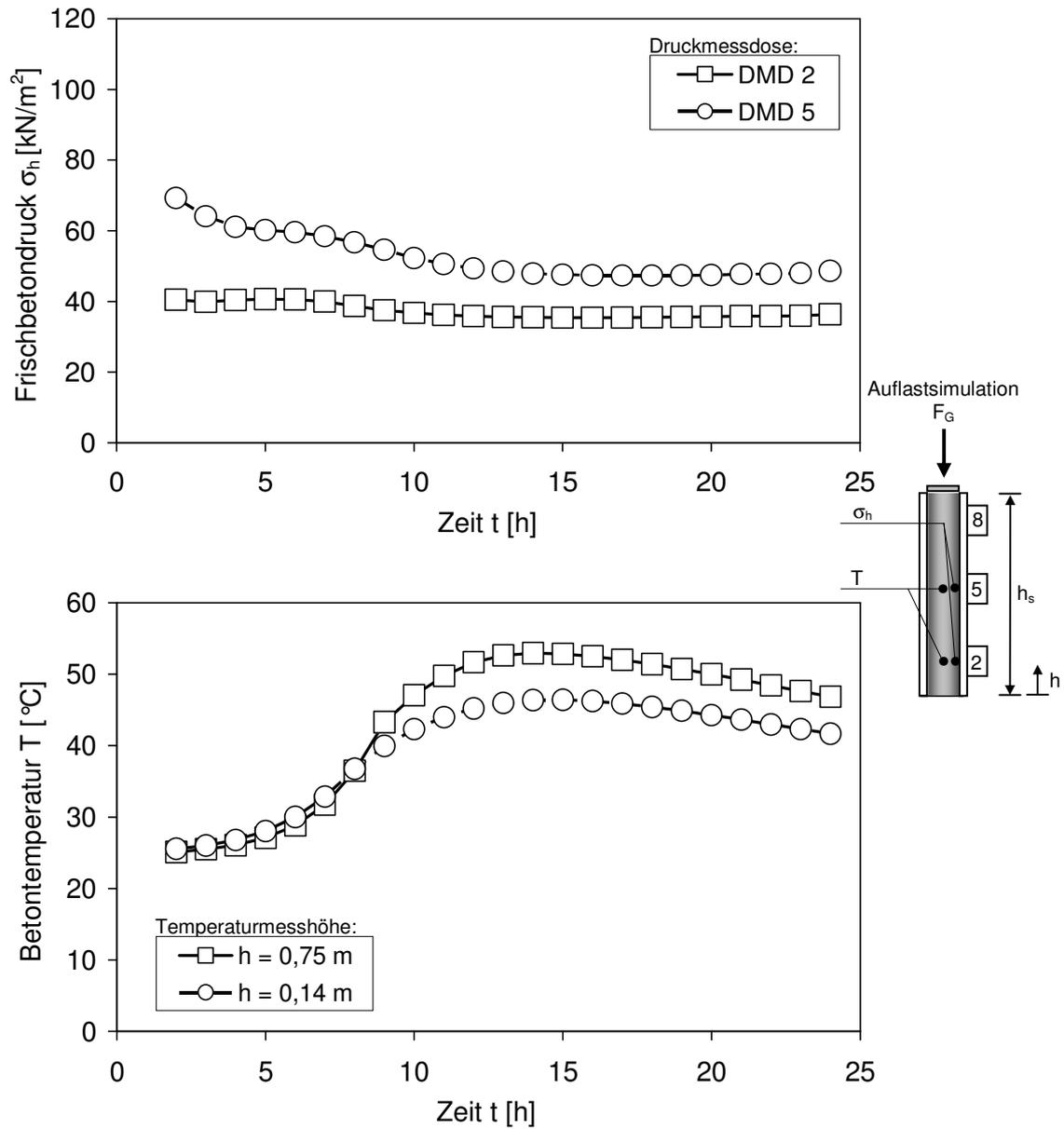
**Bild A 4.5:** *Relativer hydrostatischer Schalungsdruck  $\sigma_{\text{hydr,rel}}$  an der Druckmessdose DMD 5 des selbstverdichtenden Betons SVB-I ( $v = 14$  m/h, links bzw.  $v = 28$  m/h, rechts) in Abhängigkeit von der Ansteif- bzw. Hydratationszeit*



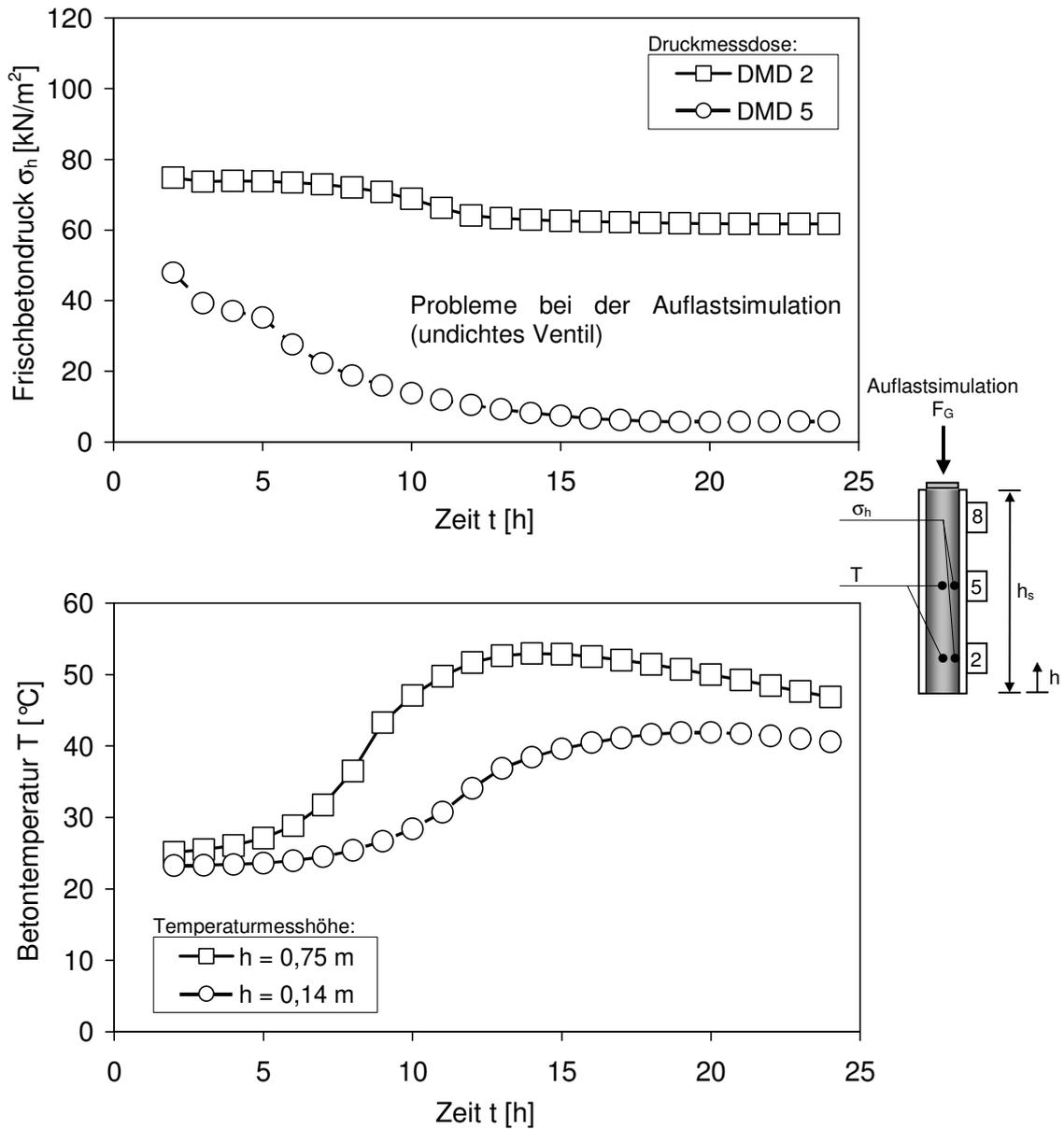
**Bild A 4.6:** *Relativer hydrostatischer Schalungsdruck  $\sigma_{\text{hydr,rel}}$  an der Druckmessdose DMD 5 des selbstverdichtenden Betons SVB-I ( $v = 56$  m/h) in Abhängigkeit von der Ansteif- bzw. Hydratationszeit*



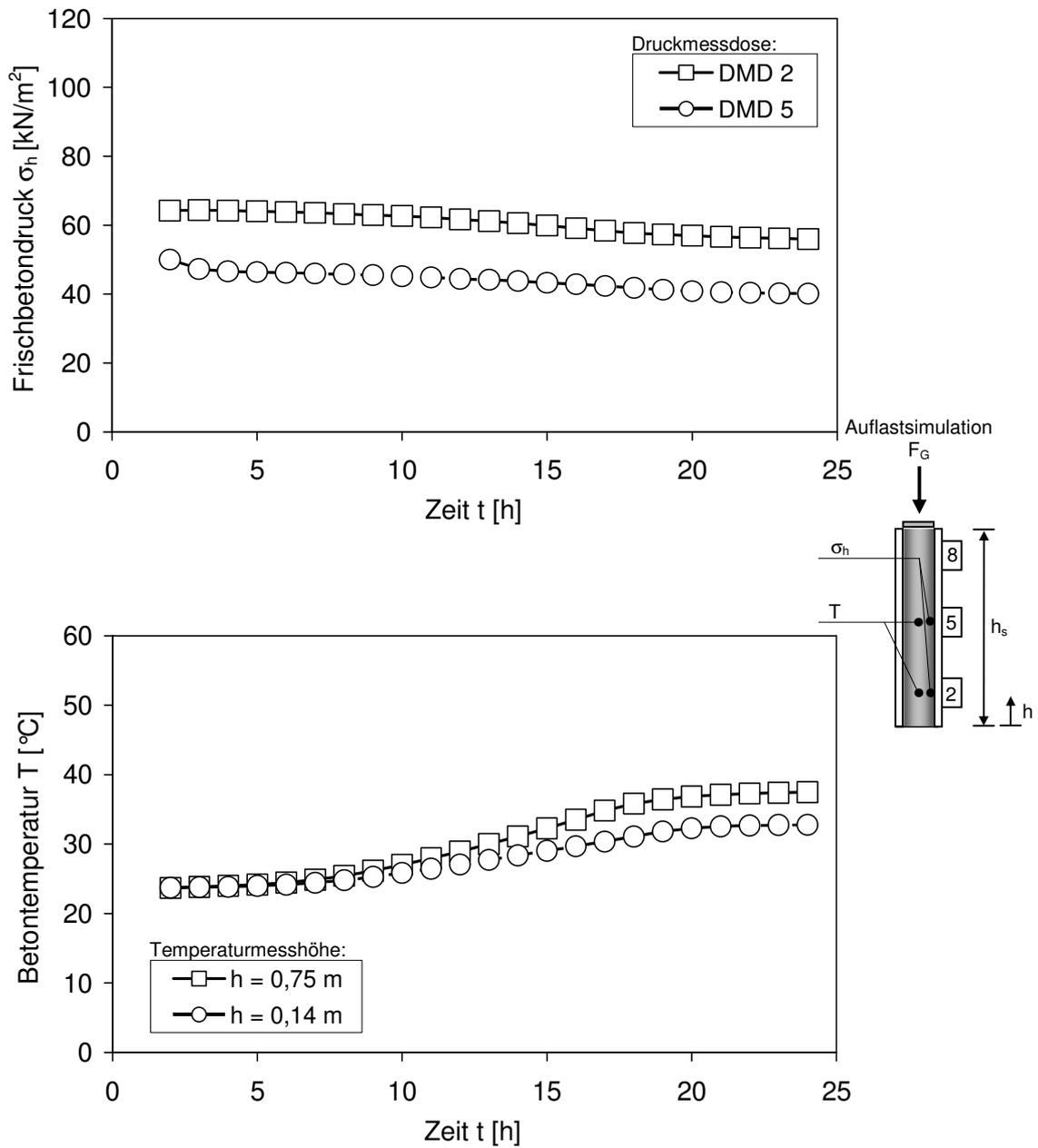
**Bild A 4.7:** Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks (oben) und der Temperatur (unten) des Normalbetons NB-II ( $v = 14$  m/h) und des selbstverdichtenden Betons SVB-II ( $v = 7$  m/h)



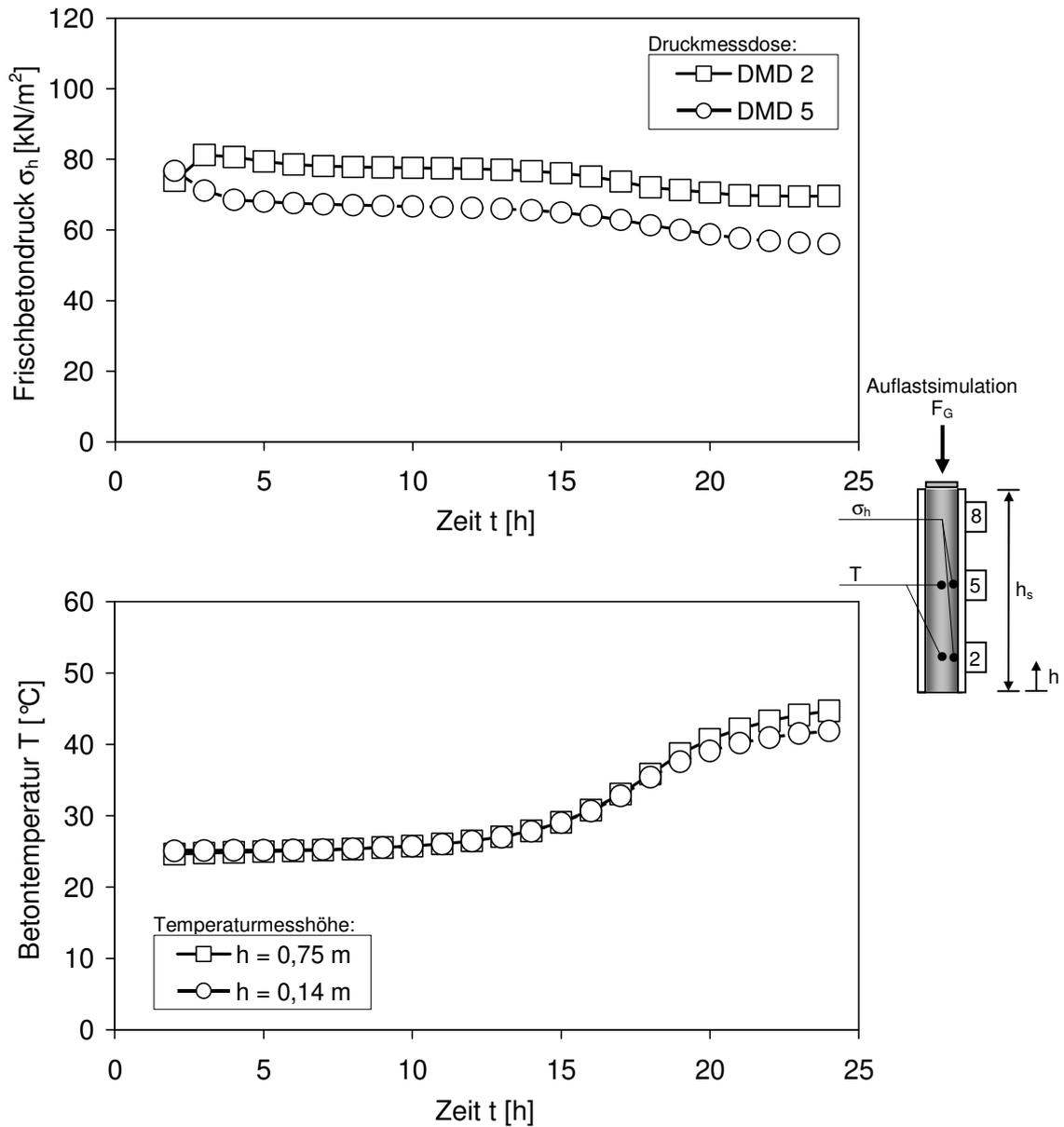
**Bild A 4.8:** Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks (oben) und der Temperatur (unten) des Normalbetons NB-I ( $v = 3,5 \text{ m/h}$ )



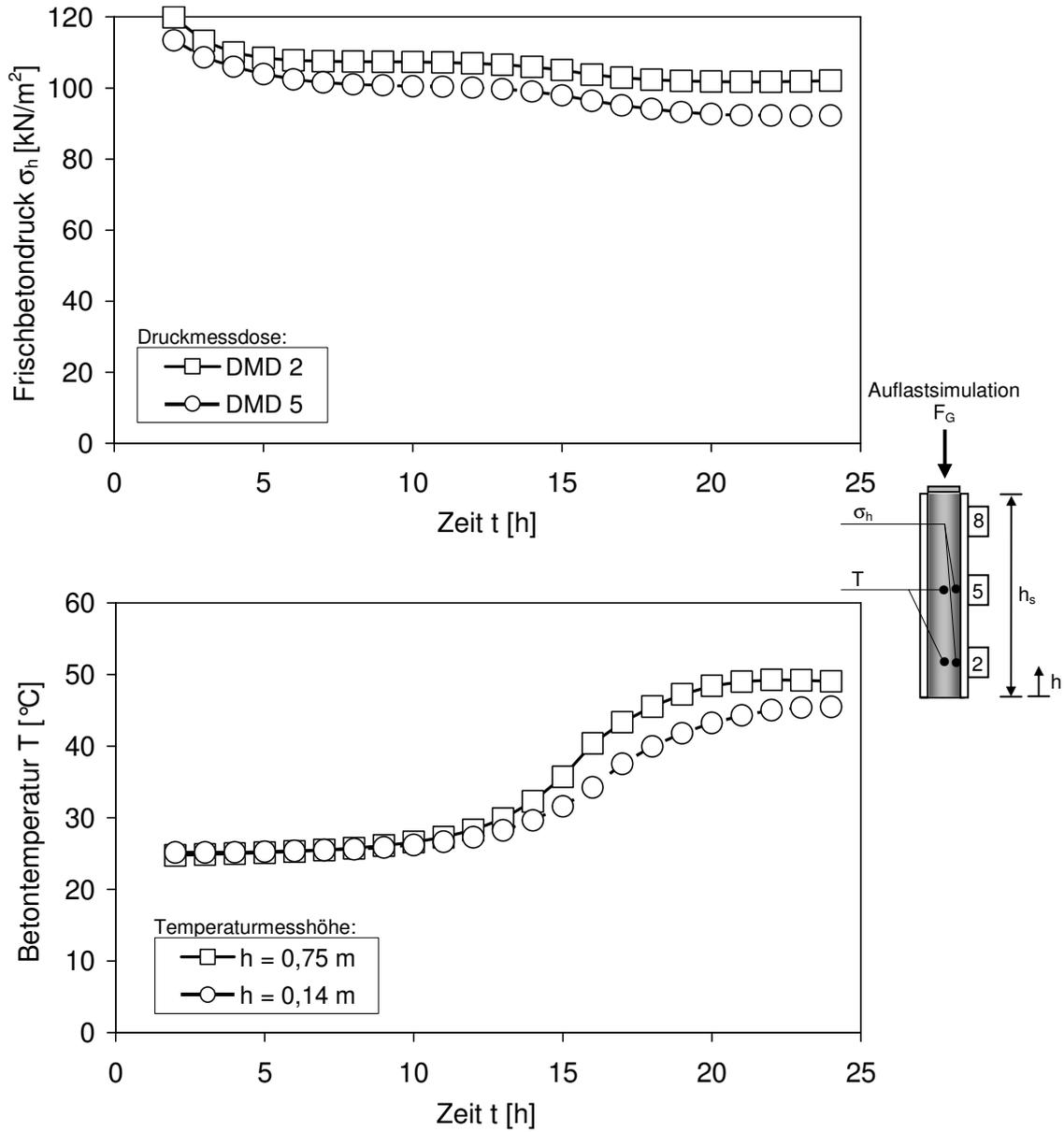
**Bild A 4.9:** Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks (oben) und der Temperatur (unten) des Normalbetons NB-I ( $v = 14$  m/h)



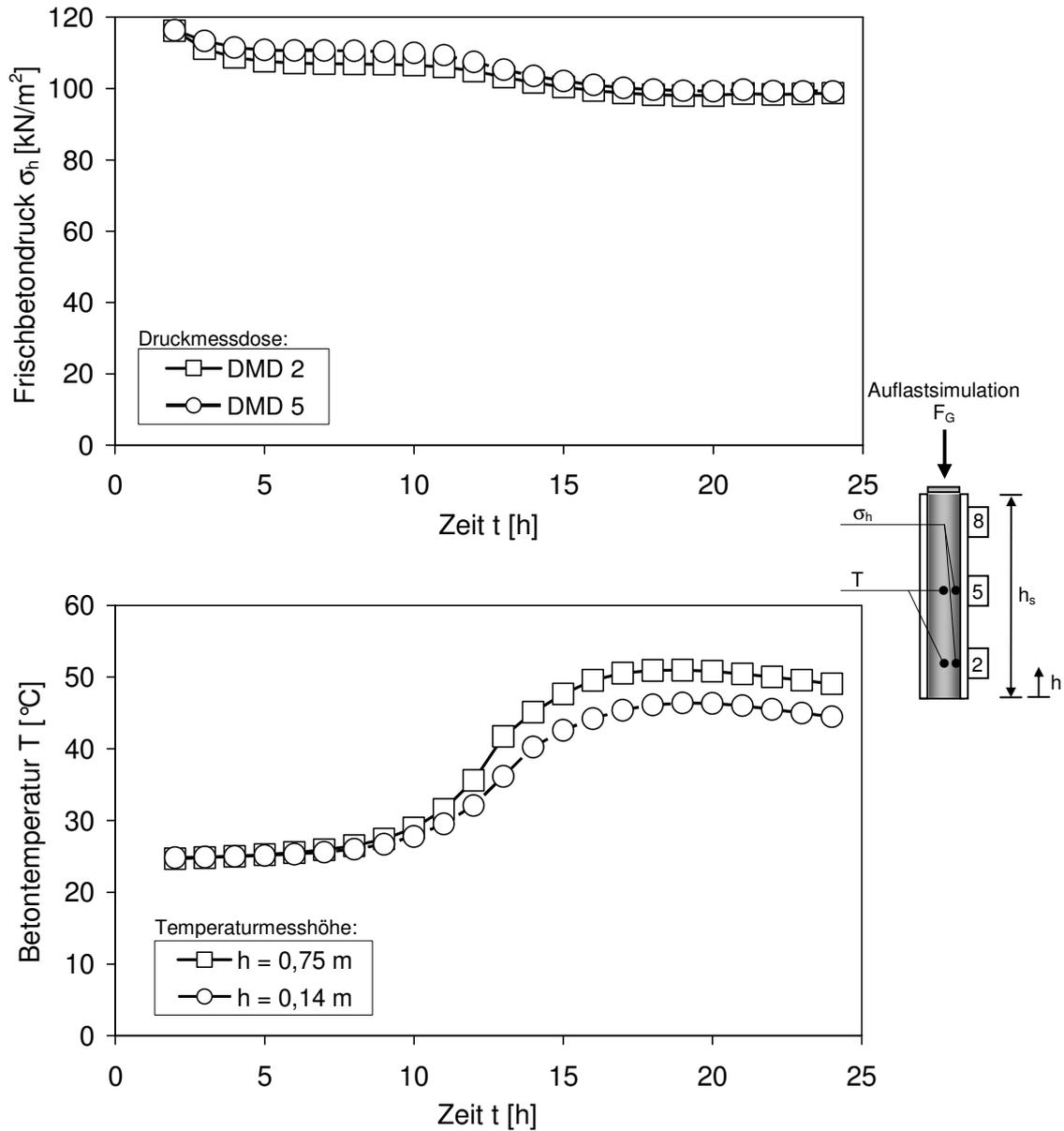
**Bild A 4.10:** Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks (oben) und der Temperatur (unten) des Normalbetons NB-III ( $v = 14$  m/h)



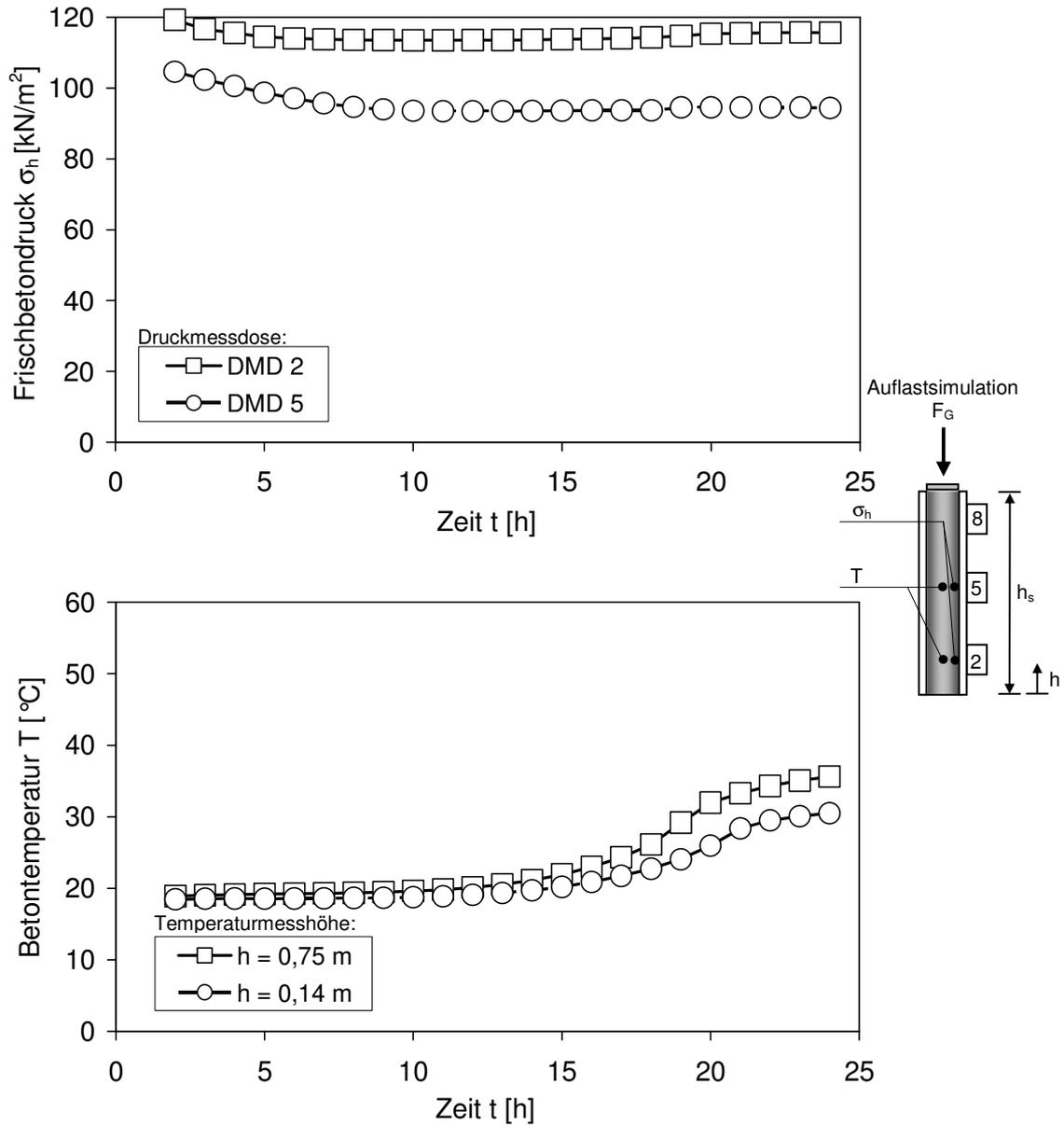
**Bild A 4.11:** Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks (oben) und der Temperatur (unten) des selbstverdichtenden Betons SVB-I ( $v = 3,5$  m/h)



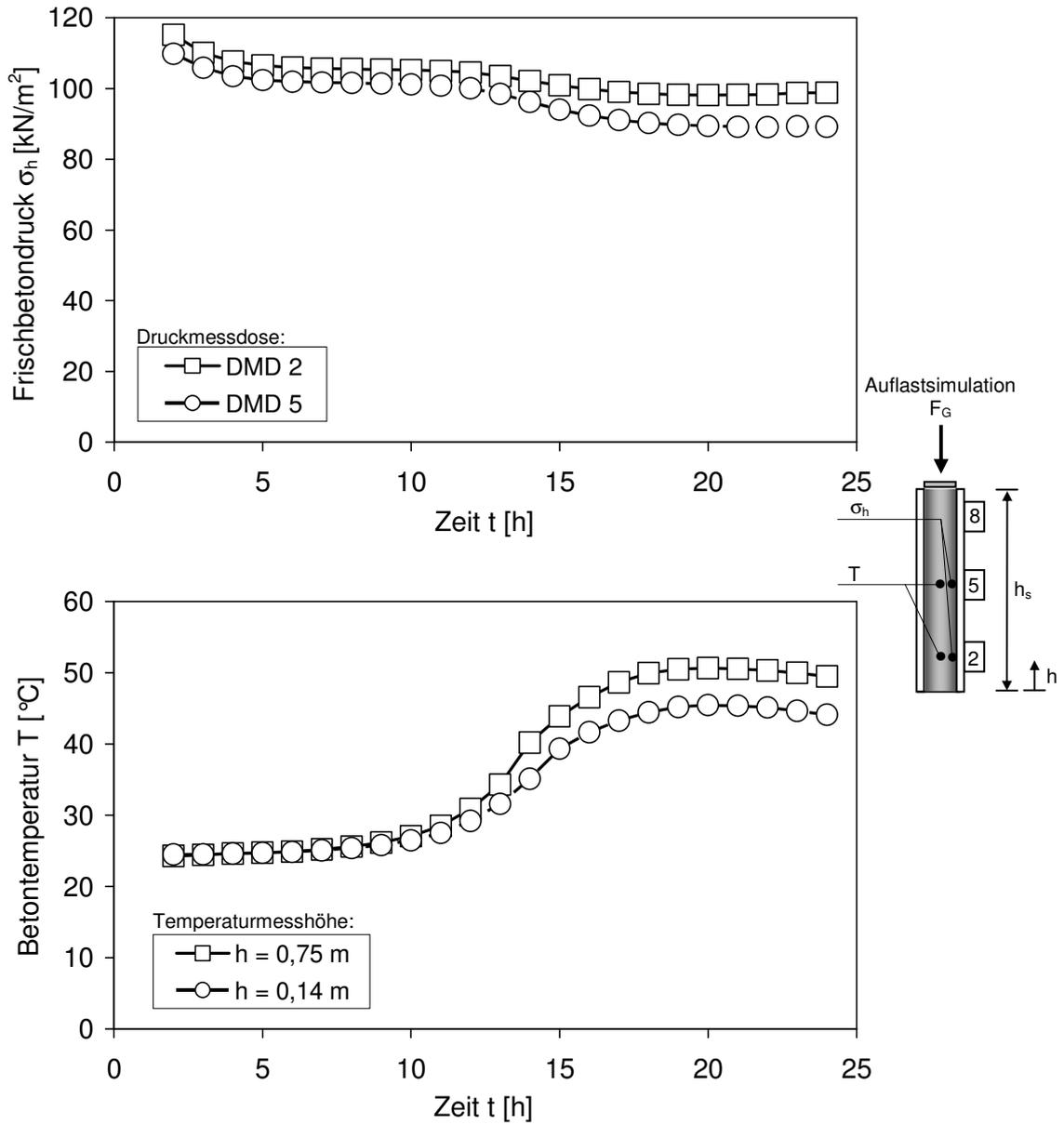
**Bild A 4.12:** Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks (oben) und der Temperatur (unten) des selbstverdichtenden Betons SVB-I ( $v = 7 \text{ m/h}$ )



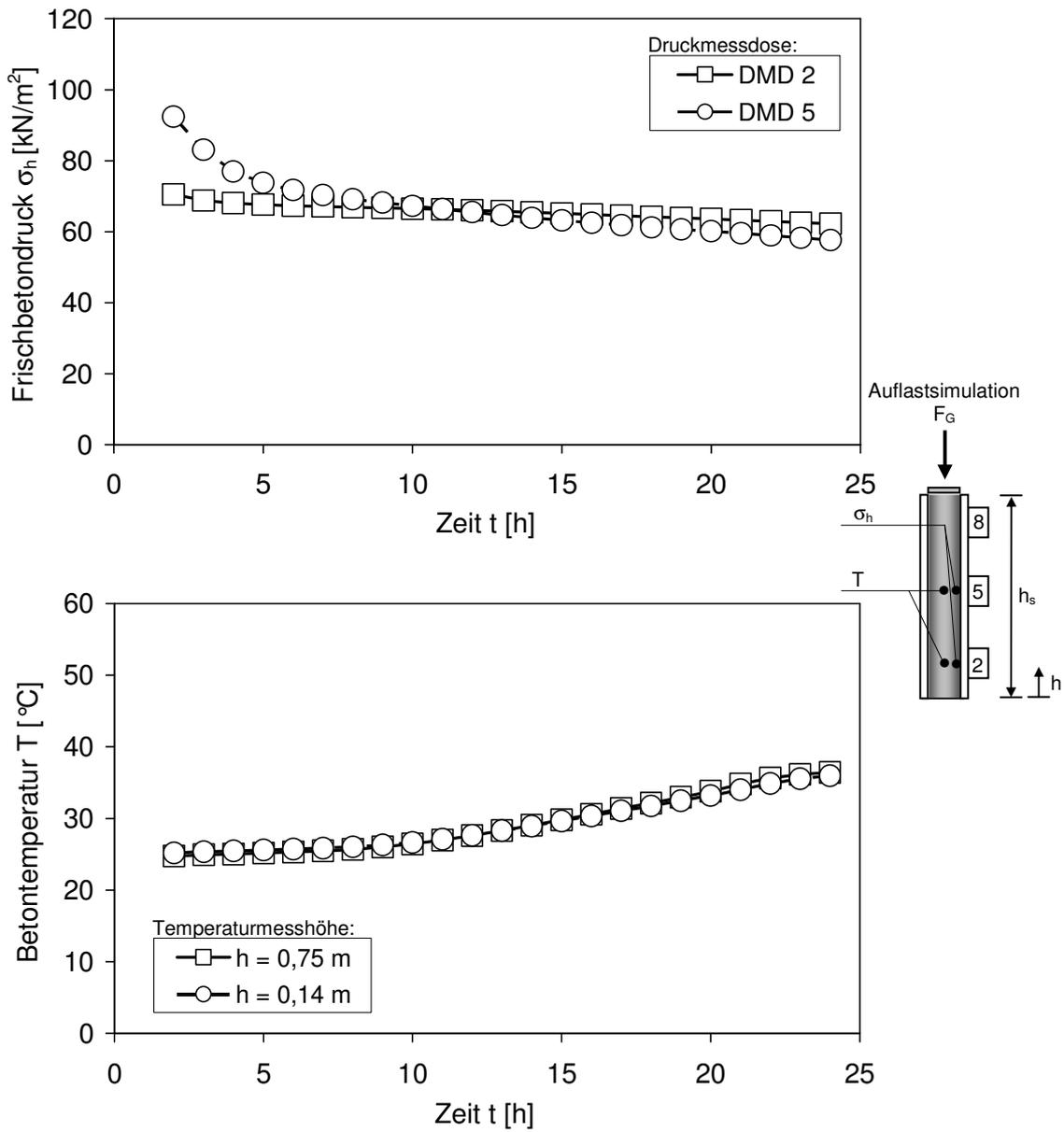
**Bild A 4.13:** Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks (oben) und der Temperatur (unten) des selbstverdichtenden Betons SVB-I ( $v = 14$  m/h)



**Bild A 4.14:** Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks (oben) und der Temperatur (unten) des selbstverdichtenden Betons SVB-I ( $v = 28$  m/h)



**Bild A 4.15:** Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks (oben) und der Temperatur (unten) des selbstverdichtenden Betons SVB-I ( $v = 56$  m/h)



**Bild A 4.16:** Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks (oben) und der Temperatur (unten) des selbstverdichtenden Betons SVB-III ( $v = 7 \text{ m/h}$ )