

**Einfluss der Betoniergeschwindigkeit  
auf das Entlüftungsverhalten sowie  
den entstehenden Schalungsdruck bei  
Verwendung von selbstverdichtendem  
Beton**

**T 3235**

T 3235

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2010

ISBN 978-3-8167-8275-9

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

Forschungsbericht des  
Instituts für Massivbau der  
Technischen Universität Darmstadt

Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf das Entlüftungsverhalten sowie  
den entstehenden Schalungsdruck bei Verwendung von  
selbstverdichtendem Beton

- Abschlussbericht September 2002 -

im Auftrag des  
Deutschen Ausschusses für Stahlbeton – DAfStb

Univ.- Prof. Dr.- Ing. C.-A. Graubner  
Dipl.- Ing. T. Proske

Darmstadt, im September 2002

## Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>2</b>
<b>1. ZIELSETZUNG</b> .....	<b>3</b>
<b>2. ZUM SCHALUNGSDRUCK UND ENTLÜFTUNGSVERHALTEN BEI DER VERWENDUNG VON SELBSTVERDICHTEDEM BETON</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1 Allgemeines</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2 Schalungsdruck</b> .....	<b>5</b>
2.2.1 Allgemeines .....	5
2.2.2 Normen und Vorschriften.....	7
2.2.3 Schalungsdruck bei SVB.....	14
<b>2.3 Entlüftungsverhalten</b> .....	<b>18</b>
2.3.1 Allgemeines .....	18
2.3.2 Entlüftung von SVB.....	18
2.3.3 Oberflächenqualität .....	21
<b>3. VERSUCHSPROGRAMM</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1 Versuchsumfang</b> .....	<b>22</b>
<b>3.2 Mischungszusammensetzung</b> .....	<b>26</b>
<b>3.3 Prüfkörper</b> .....	<b>26</b>
3.3.1 Schalung.....	26
3.3.2 Bewehrung .....	27
<b>3.4 Prüfeinrichtung</b> .....	<b>28</b>
3.4.1 Messmodul.....	28
3.4.2 Sichtmodul .....	28
<b>3.5 Versuchsdurchführung</b> .....	<b>30</b>
<b>4. VERSUCHERERGEBNISSE</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1 Allgemeines</b> .....	<b>31</b>
<b>4.2 Schalungsdruck</b> .....	<b>31</b>
4.2.1 Versuchsreihe I.....	31
4.2.2 Versuchsreihe II .....	36
4.2.3 Versuchsreihe III .....	41
<b>4.3 Ausführungsqualität</b> .....	<b>44</b>
4.3.1 Versuchsreihe I.....	44
4.3.2 Versuchsreihe II .....	52
4.3.3 Versuchsreihe III .....	56
<b>4.4 Zusatzuntersuchungen</b> .....	<b>59</b>
<b>5. BERECHNUNGSANSATZ ZUR ERMITTLUNG DES FRISCHBETONDRUCKS VON SVB AUF LOTRECHTE SCHALUNGEN</b> .....	<b>62</b>
<b>5.1 Vorbemerkung</b> .....	<b>62</b>
<b>5.2 Vorhandene Modelle zur Beschreibung des Frischbetondrucks auf lotrechte Schalungen</b> .....	<b>63</b>
5.2.1 Modell 1 .....	63
5.2.2 Modell 2 .....	64
<b>5.3 Vorschlag für ein vereinfachtes Berechnungsverfahren zur Beschreibung des Schalungsdrucks bei SVB</b> .....	<b>66</b>
<b>5.4 Vergleich des Berechnungsvorschlags mit den Messergebnissen</b> .....	<b>70</b>
<b>6. EMPFEHLUNGEN ZUR SICHERSTELLUNG EINES AUSREICHENDEN ENTLÜFTUNGSVERHALTENS</b> .....	<b>71</b>
<b>7. ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>73</b>
<b>8. LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>75</b>
<b>ANLAGEN</b>	

## 1. Zielsetzung

Grundlegende Voraussetzung für die Anwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) ist, dass die im Zuge des Betoniervorganges eingeschlossene Luft ohne mechanische Verdichtung entweicht. Diese selbsttätige Entlüftung des Betons wird durch die Verwendung spezieller Fließmittel, welche die rheologischen Eigenschaften beeinflussen, erreicht und vollzieht sich in der Regel innerhalb weniger Minuten.

Das Forschungsvorhaben hat zum Ziel, durch experimentelle Untersuchungen Erkenntnisse zur Abhängigkeit des auftretenden Schalungsdrucks von der Betoniergeschwindigkeit zu gewinnen. Es soll eine Empfehlung für den anzusetzenden Frischbetondruck bei der Verwendung von SVB als Grundlage für die Bemessung der Schalungs- und Rüstkonstruktion abgeleitet werden.

Das Forschungsvorhaben beinhaltet ferner Untersuchungen zum Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf die Qualität von Betonbauteilen aus SVB. Es sollte überprüft werden, ob sich ausreichendes Entlüftungsverhalten auch bei hohen Bauteilen, unter Variation der Füllhöhenänderung je Zeiteinheit (Betoniergeschwindigkeit), bestätigen lässt. Darauf aufbauend sollten baupraktische Regeln erarbeitet werden, bei deren Einhaltung eine gleichmäßige Verdichtung und ausreichende Entlüftung gewährleistet ist.

## **2. Zum Schalungsdruck und Entlüftungsverhalten bei der Verwendung von selbstverdichtendem Beton**

### **2.1 Allgemeines**

Im Betonbau wird die Wettbewerbsposition der Marktteilnehmer entscheidend durch die Faktoren Preis und Kosten sowie Produktivität und Qualität beeinflusst. Immer kürzere Bauzeiten und steigende Lohnkosten kennzeichnen die Konkurrenzsituation. Dem verschärften Wettbewerb wird durch eine zunehmende Rationalisierung des Herstellprozesses von Betonbauteilen Rechnung getragen. Dabei gewinnen technologische Entwicklungen und Produktionsverfahren, bei denen die Qualität verbessert und Arbeitsvorgänge eingespart werden können, zunehmend an Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund stellt die in Japan vor ca. 1 Jahrzehnt begonnene Entwicklung eines selbstverdichtenden Betons (SVB) einen Meilenstein mit hohem Innovationspotential dar /2/, /3/. Derartige Betone zeichnen sich dadurch aus, dass sie ohne mechanische Verdichtung lediglich unter dem Einfluss der Schwerkraft entlüften, eine beliebig geformte Schalung hohlraumfrei ausfüllen und die Bewehrung satt umhüllen, ohne dabei zu entmischen. Diese Eigenschaften werden nach gegenwärtigem Stand der Technik durch die Zugabe spezieller Fließmittel, einer Erhöhung des Mehlkorngehalts sowie eine Begrenzung des Größtkorndurchmessers erreicht /4/. Der erhöhte Mehlkorngehalt bzw. das geringe Wasser-Mehlkorn-Verhältnis sowie der vergrößerte Volumenanteil der Mehlkorn-Wasser-Suspension im Zusammenwirken mit der Herabsetzung der Fließgrenze dieser Suspension durch geeignete Fließmitteldosierung bewirkt, dass bei geeigneter Mischungszusammensetzung die grobe Gesteinskörnung in der Suspension "schwimmt" und daher keine Entmischung von Gesteinskörnung und Beton auftritt. Neben der Gewährleistung der Gefügestabilität muss sichergestellt sein, dass der Beton an Hindernissen, wie z. B. der Bewehrung, nicht blockiert.

Das große wirtschaftliche Potenzial von selbstverdichtendem Beton wird durch seine weitreichende Verwendung im Ausland in den Bereichen Hoch-, Tief- und Brückenbau sowie insbesondere für die Herstellung von Betonfertigteilen belegt /5/, /6/, /7/. Auch in Deutschland konnten in den letzten Jahren Erfahrungen mit SVB insbesondere in Verbindung mit der Herstellung von Betonfertigteilen gesammelt werden. Dies ermöglichten Zulassungen im Einzelfall für definierte Mischungen. Aufgrund seiner Bedeutung für die technische Weiterentwicklung im Betonbau wurde von Deutschen Ausschuss für Stahlbeton bereits ein zugehöriger Sachstandbericht /17/ erarbeitet, der die wesentlichen nationalen und internationalen Erfahrungen zusammenfasst.

Aus den bisher gewonnenen Erfahrungen können folgende wesentliche Vorteile für den Einsatz von SVB benannt werden:

- Vereinfachung des Betoniervorgangs, Wegfall des Verdichtungsvorgangs,
- Hohe Einbauleistung und Verringerung des Personaleinsatzes,
- Verbesserung der Arbeitsbedingungen,
- Hohe Betonqualität mit großer Gleichmäßigkeit,
- Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit und Oberflächendichtigkeit,
- Reduzierung der Lärm- und Umweltbelastung durch Wegfall des Rüttelvorganges.

Im Fertigteilbau ergeben sich weitere Rationalisierungspotenziale:

- Verkürzung der Produktionsdauer und bessere Ausnutzung der Schalung,
- Geringere Investitionskosten und höhere Lebensdauer der Schalungselemente.

Die Zusammensetzung eines selbstverdichtenden Betons orientiert sich nach heutiger Entwurfspraxis an den Fließeigenschaften. Dabei werden hochwirksame Betonverflüssiger der neuen Generation eingesetzt. Diese bewirken neben der starken Verflüssigung auch eine teilweise starke Verzögerung des Erhärtungsprozesses, somit bleibt die Fließfähigkeit über einen langen Zeitraum nach dem Mischen erhalten. Der anschließende Festigkeitsanstieg ist mitunter schneller als bei üblichen Betonen.

## 2.2 Schalungsdruck

### 2.2.1 Allgemeines

Der Schalungsdruck wird durch die senkrechte Lastkomponente des Frischbetons auf die Schalungsoberfläche beschrieben. Der Schalungsdruck wirkt vom Zeitpunkt des Einbringens des Betons bis zu seinem Erhärtungsende. Er ist abhängig von dem in der Schalung auftretenden Vertikaldruck und dem Winkel der inneren Reibung und der Schalungsrauigkeit bzw. dem Seitendruckverhältnis  $\lambda$  (Verhältnis Horizontaldruck zu Vertikaldruck, bei SVB annähernd 1.0). Der Schalungsdruck nimmt demnach mit der Betonierhöhe bzw. dem Vertikaldruck zu, der Druckzuwachs im Verlauf des Ansteifens und Erhärtens (Vergrößerung des Winkels der inneren Reibung) ab.

Infolge der vielen den Schalungsdruck beeinflussenden Faktoren ist es bis heute nicht gelungen, selbst für normalen Rüttelbeton die Vorgänge befriedigend zu beschreiben. Etwa 18 Parameter beeinflussen den Frischbetondruck. Dabei hat die Steiggeschwindigkeit im Allgemeinen den bedeutendsten Einfluss /25/. Alle anderen Größen wirken je nach den jeweiligen Bedingungen der Betonierstelle mit unterschiedlichem Gewicht und beeinflussen sich gegenseitig. Zur Abschätzung unter Baustellenbedingungen kann folgende Einteilung vorgenommen werden /25/:

1. Erstrangig:
  - 1.1 Steiggeschwindigkeit
  - 1.2 Betonrohweite
  - 1.3 Art der Verdichtung
  - 1.4 Rüttelart, Rütteltiefe,
  - 1.5 Betonkonsistenz / Winkel der Inneren Reibung
  - 1.6 Frischbetontemperatur

- 2. Zweitrangig:
  - 2.1 Erstarrungszeit
  - 2.2 Betonzusatzmittel
  - 2.3 Porenwasserdruck
  - 2.4 Rütteldauer
  - 2.5 Konstruktion der Schalung
  - 2.6 Dichtigkeit der Schalungshaut
  
- 3. Drittrangig:
  - 3.1 Art des Einbringens
  - 3.2 Zuschlagstoffe und Größtkorn
  - 3.3 Zementart
  - 3.4 Umgebungstemperatur
  - 3.5 Schütthöhe und Gesamthöhe
  - 3.6 Bewehrungsführung

Bei der Verwendung von Selbstverdichtendem Beton entfallen die Punkte 1.3, 1.4, 2.4 als veränderliche Parameter.

Aufgrund der umfangreichen Einflüsse gibt es bis heute nur überschlägige, auf empirischen Werten basierende Rechenverfahren zur Bestimmung des Schalungsdrucks. Es wurden die verschiedensten Modelle entwickelt, um sich den Lastabtrag im Stoffsystem zu erklären (Bogeneffekt, Erhärtung). Der Frischbetondruck wird meist für lotrechte Schalungen ermittelt. Dabei wird in der Literatur auch noch bei einer abweichenden Neigung von 5 bis 10% eine Schalung als lotrecht definiert. Dies wird mit dem inneren Scherwiderstand des Betons sowie der auftretenden Wandreibung begründet. Bei einer Abweichung der Wandneigung von größer  $10^\circ$  müssen hydrostatische Betondrücke angesetzt oder genauere Berechnungen durchgeführt werden. In /27/ wurden dazu praktikable Rechenansätze formuliert.

Gezielte Untersuchungen zum Schalungsdruck von Betonen mit und ohne Vibrationsverdichtung - unter Beachtung der unterschiedlichen den Schalungsdruck beeinflussenden Faktoren - wurden schon vor Jahrzehnten durchgeführt /9/, /10/, /11/. Dabei wurden aber immer Betone untersucht die nicht annähernd die Fließfähigkeit der selbstverdichtenden Betone aufwiesen.



## 2.2.2 Normen und Vorschriften

Die in den einzelnen Ländern gültigen Vorschriften berücksichtigen die Einflussparameter bei der Ermittlung des Schalungsdrucks höchst unterschiedlich. Nachfolgend einige Beispiele:

### Deutschland DIN 18 218 (1980) /12/:

Die in Deutschland zu verwendenden Vorschriften basieren auf Betonen mit Vibrationsverdichtung und den Konsistenzbereichen steif (K1), plastisch (K2), weich (K3) und Fließbeton. Dies führt zu den entsprechenden Bemessungsansätzen. Die Norm behandelt alle in 2.2.1 aufgeführten erstrangigen und die ersten beiden der zweitrangigen Einflussfaktoren auf den Schalungsdruck. Der maximal anzusetzende Schalungsdruck berechnet sich bei Annahme eines Erstarrungsendes  $t_E$  von 5 Stunden nach Mischungsende sowie einer Frischbetontemperatur von 15°C abhängig von der Konsistenz des Frischbetons zu (siehe auch Bild 2.1):

$$\rho_{max} = \gamma_b \cdot C_2 \cdot K_T (0.68 \cdot v + 0.68) \text{ - Fließbeton}$$

$$\rho_{max} = \gamma_b \cdot C_2 \cdot K_T (0.56 \cdot v + 0.72) \text{ - weich}$$

$$\rho_{max} = \gamma_b \cdot C_2 \cdot K_T (0.40 \cdot v + 0.76) \text{ - plastisch}$$

$$\rho_{max} = \gamma_b \cdot C_2 \cdot K_T (0.20 \cdot v + 0.84) \text{ - steif}$$

Für  $v \leq 7$  m/h gilt:

$$\rho_{max} = 100 \text{ kN} / \text{m}^2 \text{ für Stützen}$$

$$\rho_{max} = 80 \text{ kN} / \text{m}^2 \text{ für Wände}$$

$p_{max}$  – maximaler Frischbetondruck [kN/m<sup>2</sup>]

$v$  – Betoniergeschwindigkeit [m/h]

$\gamma_b$  – Frischbetonrohichte [kN/m<sup>3</sup>]

$C_2$  - Zusatzmittelkoeffizient ( $C_2 = 0.08 \cdot t_v + 1$  für Fließbeton)

$t_v$  - Erstarrungsverzögerung [h]

$K_T$  – Temperaturkoeffizient  $K_T = (145 - 3 \cdot T) / 100$

$T$  – Frischbetontemperatur  $5^\circ\text{C} \leq T \leq 30^\circ\text{C}$  [°C]

Der Frischbetondruck wirkt über eine Höhe von  $h = t_E \cdot v$  ( $t_E$  – Erstarrungsende des Betons). Dabei muss von einem hydrostatischen Betondruck bis zum Erreichen des maximalen Wertes ausgegangen werden. Dieser wirkt bis zum Erstarrungsende auf die entsprechenden Schalungsabschnitte, siehe Bild 2.2.

Bei der Verwendung von Außen- bzw. Schalungsvibratoren oder bei dauernder Wirkung von anderweitigen gleichartigen Erschütterungen ist über die gesamte Höhe der hydrostatische Betondruck anzusetzen.

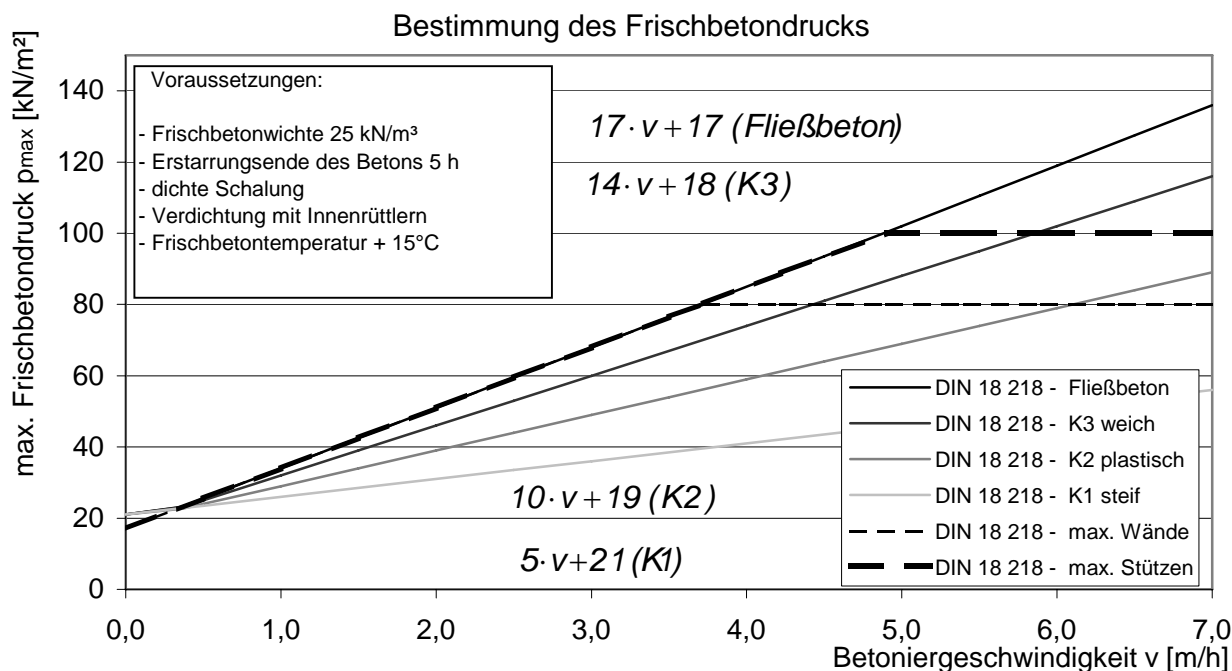


Bild 2.1: Diagramm zur Bestimmung des Frischbetondrucks  $p_{\max}$  in Abhängigkeit von der Steiggeschwindigkeit und der Konsistenz nach DIN 18 218

Die nationale Norm zum Schalungsdruck DIN 18 218 berücksichtigt die druckmindernden Effekte aus der Silowirkung nicht. Allein bei der Definition der lotrechten Schalungswand (zulässige Abweichungen von der Lotrechten bis maximal  $\pm 5^\circ$ ) wird ein gewisser Einfluss der Wandreibung in Ansatz gebracht.

Die dynamische Wirkung moderner Rüttelgeräte hebt den Siloeffekt fast gänzlich auf. Erst durch den Wegfall der Vibrationsverdichtung macht eine Untersuchung der Silowirkung Sinn (siehe Abschnitt 2.2.3).

Da in DIN 18 218 immer von Vibrationsverdichtung ausgegangen wird berechnet sich der Schalungsdruck unabhängig von Art und Größe des Schalungsaufbaus (Querschnitt, Schalungsrauigkeit, Saugfähigkeit) und der Bewehrungsführung. Diese Parameter werden als zweitrangig angesehen und lediglich als Voraussetzung definiert. Bei Vernachlässigung des Siloeffektes ergeben sich höhere Schalungsdrücke und somit auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse.

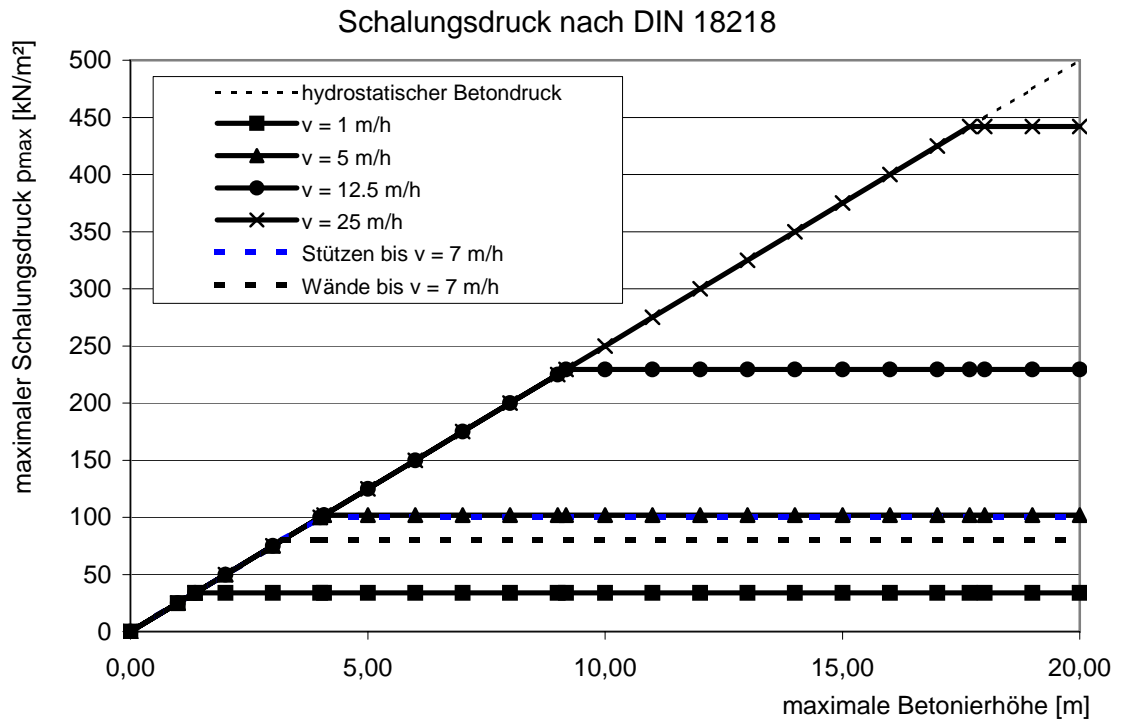


Bild 2.2: Berechnung des Schalungsseitendrucks nach DIN 18 218 für Konsistenz KF;  $\gamma_b = 25$  kN/m<sup>3</sup>; T = 15°; Erstarrungsende = 5h

Frankreich (NFP 93-350) /18/:

Der maximale Schalungsdruck  $p_{max}$  ergibt sich zu

$$p_{max} = g \cdot h \cdot 2.4 \text{ [kN/m}^2\text{]} - \text{für alle Betone}$$

g – Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

h – Betonierhöhe [m]

Der Ansatz des hydrostatischen Drucks soll bis mindestens 3 m Betonierhöhe erfolgen.

Großbritannien:

CIRIA – Report Nr. 1 /19/:

Hier werden zwei Zustände betrachtet. Der kleinere Wert ist als maximaler Schalungsdruck anzusetzen.

$$p_{max} = 14.37 + 0.094 \cdot d + 3.14 \cdot v - \text{„Bogeneffekt“}$$

$$p_{max} = \frac{\gamma_b \cdot v \cdot t}{1 + c \cdot \left(\frac{t}{t_E}\right)^4} + (4.6 - 1.89 \cdot v) - \text{„Betonhärtung“}$$

CIRIA – Report Nr. 108 /20/:

Der kleinere Wert ist als maximaler Schalungsdruck anzusetzen.

$$p_{max} = \gamma_b \cdot (C_1 \cdot \sqrt{v} + C_2 \cdot K_T \cdot \sqrt{h - C_1 \cdot \sqrt{v}}) - 5^\circ C < T < 30^\circ C$$

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

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

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

$p_{max}$  – maximaler Frischbetondruck [kN/m<sup>2</sup>]

v – Betoniergeschwindigkeit [m/h]

$\gamma_b$  - Frischbetonwichte [kN/m<sup>3</sup>]

d - minimale Schalungsbreite [mm]

h – Betonierhöhe [m]

T - Frischbetontemperatur  $\geq 15^\circ C$  [ $^\circ C$ ]

t - Betonierdauer zum betrachteten Zeitpunkt [h]

$t_E$  - Erhärtungszeit (Erhärtungsende) [h]

c – Vibrationskonstante

$C_1$  - Querschnittskoeffizient (1.0 für Wände; 1.5 für Stützen)

$C_2$  - Zusatzmittelkoeffizient (0.30 für Normalbeton, 0.45 mit Erstarrungsverzögerung)

$K_T$  - Temperaturkoeffizient  $(36/(T+16))^2$

Die Betonkonsistenz wird bei der Berechnung nicht berücksichtigt.

USA (ACI 347-78) /26/:

**bei Stützenschalungen:**

$$p_{max} = 7.2 + \frac{785 \cdot v}{T + 17.8}$$

$$p_{max} = 144 \text{ kN/m}^2 \text{ oder } p_{max} = 23.5 \cdot h$$

Der kleinere Wert ist maßgebend.

**bei Wandschalungen:**

$$p_{max} = 7.2 + \frac{785 \cdot v}{T + 17.8} \text{ [kN/m}^2\text{]; für } v \leq 2 \text{ m/h}$$

$$p_{max} = 7.2 + \frac{1156}{T + 17.8} + \frac{244 \cdot v}{T + 17.8}; \text{ für } 2 \text{ m/h} < v \leq 3 \text{ m/h}$$

$$p_{max} = 95.8 \text{ kN/m}^2 \text{ oder } p_{max} = 23.5 \cdot h$$

Der kleinere Wert ist maßgebend.

für  $v > 3 \text{ m/h}$ :

$$p_{max} = 23.5 \cdot h; \text{ hydrostatischer Betondruck!!!}$$

bei nur leichter Vibrationsverdichtung (Gleitschalungen):

$$p_{max} = 4.79 + \frac{524 \cdot v}{T + 17.8}$$

$p_{max}$  – maximaler Frischbetondruck [kN/m<sup>2</sup>]

$v$  – Betoniergeschwindigkeit [m/h]

$T$  – Frischbetontemperatur [°C]

$h$  – Betonierhöhe [m]

Gilt für eine Betonwichte von 23.5 kN/m<sup>3</sup>, Innenvibration und Zement Typ I.

Bei Einsatz von Verzögerern (teils starke verzögernde Wirkung der Fließmittel bei SVB) ist von hydrostatischen Druckverhältnissen über die gesamte Betonierhöhe auszugehen.

Alle erwähnten Bemessungsvorschriften schreiben bei unbegrenzter Betoniergeschwindigkeit zumindest den Ansatz eines hydrostatischen Verhaltens bis zu einer Betonierhöhe von zirka 3 m vor.

Ein anschaulicher Vergleich der normativen Regelungen ist mit Hilfe der Bilder 2.3 und 2.4 möglich. Es wurden für jeweils vier unterschiedliche Betoniergeschwindigkeiten die Druckverläufe über die Betonierhöhe angegeben. Zu erkennen sind die teilweise starken

Unterschiede in den Bemessungsansätzen. Dabei liegen die Werte der DIN 18218 bei hohen Betoniergeschwindigkeiten weit über denen von CIRIA 108. Im Bereich von geringen Betoniergeschwindigkeiten schreibt der CIRIA- Report 108 höhere Druckansätze vor. Dies wird besonders bei Fließbetonen deutlich (Bild 2.3). Da der CIRIA- Report 108 nicht den Einfluss der Frischbetonkonsistenz berücksichtigt, zeigen sich bei einem Vergleich der Betone mit den Konsistenzbereichen Fließbeton und K2 (plastisch) erhebliche Abweichungen (Bild 2.3 und 2.4). Erwartungsgemäß vermindern sich bei plastischer Konsistenz die Schalungsdrücke nach DIN 18218, womit bei den hohen Betoniergeschwindigkeiten (12.5 bis 25.0 m/h) eine recht gute Übereinstimmung erreicht wird.

Die Angaben in der amerikanischen Norm ähneln denen der DIN 18 128, wobei jedoch ebenfalls nicht von einer Unterscheidung in Konsistenzbereiche Gebrauch gemacht wurde. Es wird, wie in der deutschen Vorschrift vorgesehen, der maximale Druckwert ohne Berücksichtigung der Betonierhöhe bestimmt. Dabei ist festzustellen, dass sich die Schalungsdrücke für Betoniergeschwindigkeiten kleiner 2 m/h nur unwesentlich unterscheiden. Bei größeren Steiggeschwindigkeiten überschreiten die Angaben nach ACI 347 die DIN-Werte teils erheblich.

Am konservativsten ist die französische Vorschrift NFP 93-350, welche unabhängig von der Betoniergeschwindigkeit und sonstigen Einflussfaktoren den Ansatz eines hydrostatischen Druckverhaltens empfiehlt.

Durch die Begrenzung des Schalungsdrucks bei Stützen unabhängig von der Betoniergeschwindigkeit ergeben sich für große Betonierhöhen, verbunden mit hohen Betoniergeschwindigkeiten nach CIRIA- Report 108 und ACI 347 extrem kleinere Frischbetondrücke als nach DIN 18 218 und NFP 93-350.

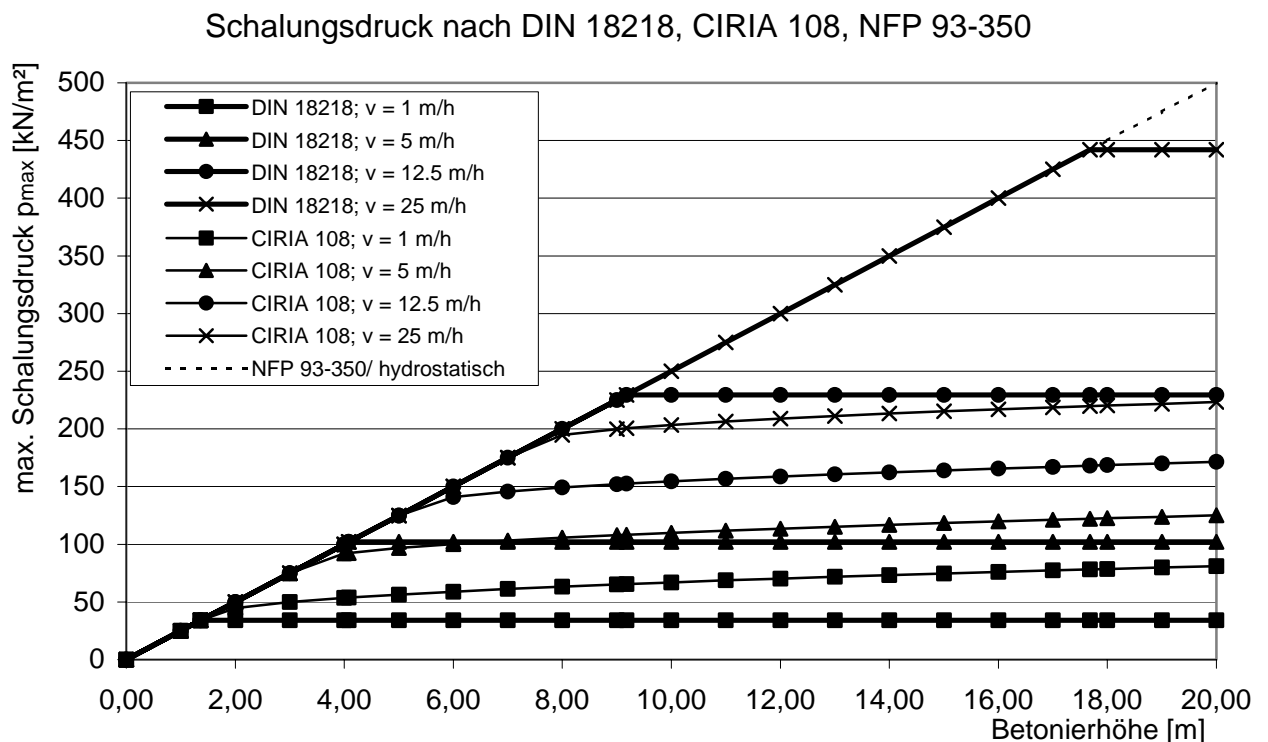


Bild 2.3: Berechnung des Schalungsseitendrucks für **Konsistenz Fließbeton** (DIN 18 218);  $\gamma_b = 25 \text{ KN/m}^3$ ;  $T = 15^\circ$ ; Erstarrungsende = 5h, Stützen

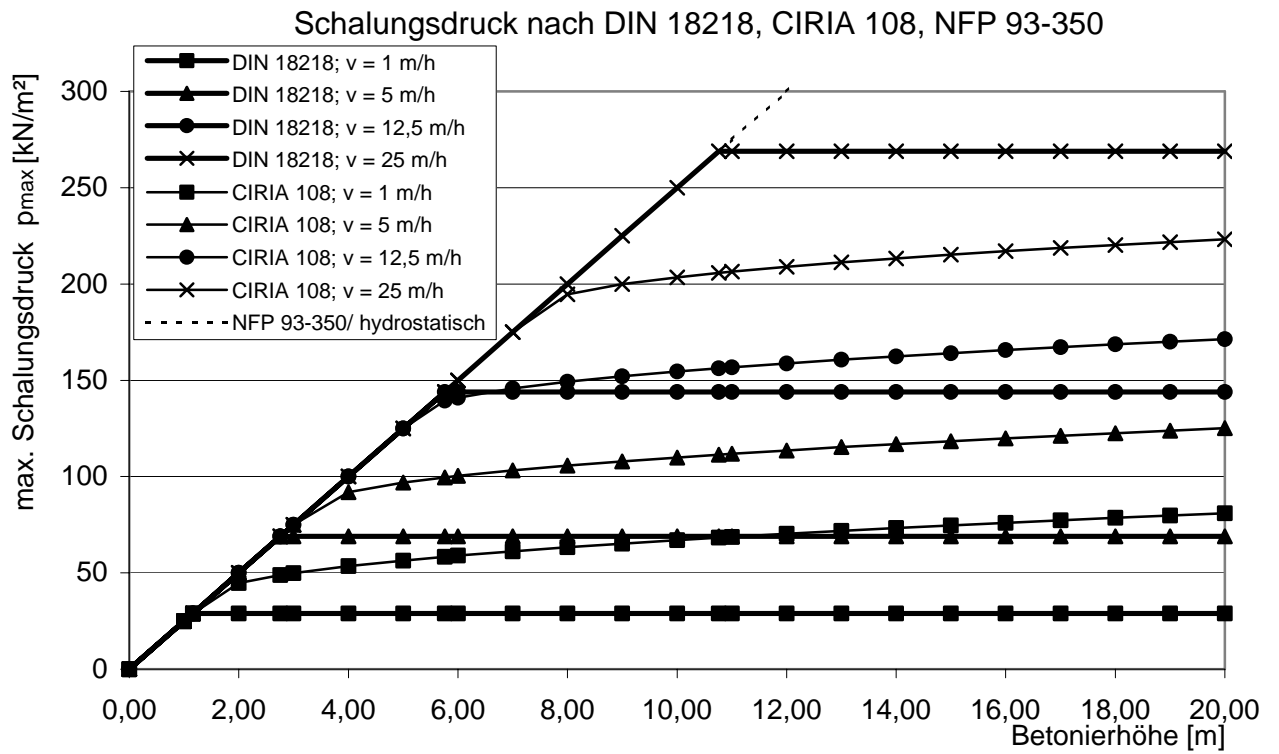


Bild 2.4: Berechnung des Schalungsseitendrucks für **Konsistenz KP (plastisch)** (DIN 18218);  
 $\gamma_b = 25 \text{ KN/m}^3$ ;  $T = 15^\circ$ ; Erstarrungsende = 5h, Stützen

### 2.2.3 Schalungsdruck bei SVB

Für selbstverdichtende Betone können die Bemessungsansätze nicht ohne weiteres übernommen werden. Der Wegfall der Vibrationsverdichtung und die veränderte Konsistenz im Vergleich zu den bisher verwendeten Betonen sollten bei der Bestimmung des Schalungsdruckes Berücksichtigung finden. Es ist zu bemerken, dass der Verzicht auf Vibration druckmindernd, die Verflüssigung jedoch druckerhöhend wirkt.

Einen wesentlicher Punkt neben der veränderten Anfangskonsistenz des Betons stellt auch das Erstarrungsverhalten (Erreichen des Erstarrungsanfangs und Erstarrungsende) dar. Durch den Einsatz hoch wirksamer, im Allgemeinen verzögernder Fließmittel und Stabilisierer wird das Erstarrungsverhalten teilweise stark beeinflusst. Dabei kann es je nach Art und Menge des Fließmittels bzw. Stabilisierers und deren Wirkung zu unterschiedlichen Arten der Erstarrungsverzögerung kommen u.a. Brameshuber in /8/:

- kontinuierliche Erstarrungsverzögerung von Mischungsfertigstellung bis Erstarrungsende
- Erstarrungsverzögerung innerhalb des Erstarrungsprozesses (gleiches Erstarrungsende)
- zeitlicher Versatz der Erstarrung (Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende)

Zum auftretenden Schalungsdruck bei Verwendung von selbstverdichtendem Beton liegen derzeit schon einzelne Untersuchungen vor (Vanhove in /14/, Dehn/Walraven in /15/, /16/). Diese betrachten meist nur einzelne Bauteile auf Grundlage undefinierter Randbedingungen hinsichtlich der Betoniergeschwindigkeit und des Erhärtungsverhaltens. Die Angaben über die anzusetzenden Schalungsdrücke variieren daher erheblich.

In den bekannten Veröffentlichungen wird von Abminderungen gegenüber den hydrostatischen Drücken bzw. den Rüttelbetondrücken je nach Betoniergeschwindigkeit und Betonierhöhe von bis zu 50% berichtet /14/, /21/. Andere Untersuchungen ergaben nur geringe oder keine Abminderungen vom hydrostatischen Druckverhalten Dehn/Walraven in /15/, /16/.

Interessante Berechnungsansätze für die Bestimmung des Schalungsdrucks werden von Vanhove /14/ vorgestellt. Aufbauend auf den Reibbeiwert  $\mu$  (Schalung/Beton) wird hier der Schalungsdruck basierend auf den Grundlagen der Silotheorie nach Jansen /22/ ermittelt.

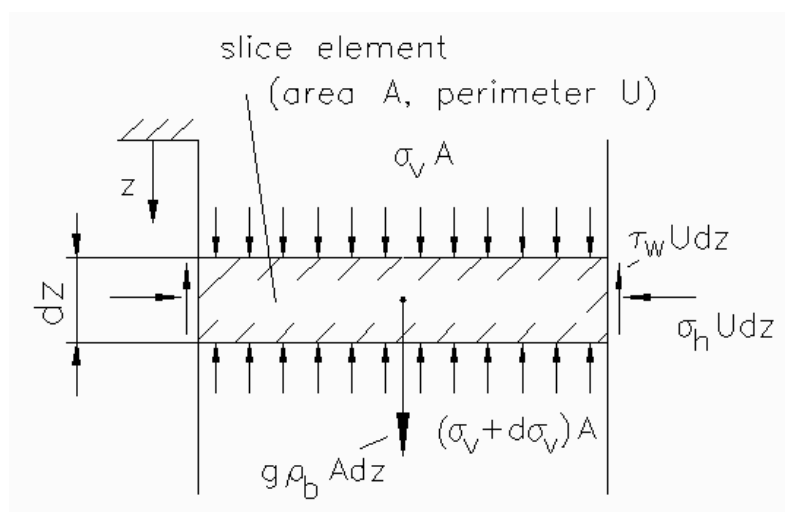


Bild 2.5: Scheibenelement im Silo- bzw. Schalungsschaft nach Jansen /22/



$$\text{Kräftegleichgewicht: } A \cdot \sigma_v + g \cdot \rho_b \cdot A \cdot dz = A \cdot (\sigma_v + d\sigma_v) + \tau_w \cdot U \cdot dz$$

U – Umfang des Schaftes

A – Querschnittsfläche des Schaftes

$$\text{DGL: } \frac{d\sigma_v}{dz} + \sigma_v \cdot \lambda \cdot \frac{U}{A} \cdot \mu = g \cdot \rho_b$$

Der Schalungsdruck errechnet sich für alle Querschnitte, bei Annahme eines Horizontallastverhältnisses  $\lambda = \sigma_H / \sigma_v = 1$  und des Reibbeiwertes  $\mu = \tau_w / \sigma_h$  zu:

$$p = \sigma_h = C_d \frac{\rho_b \cdot g \cdot A}{U \cdot \mu} \left[ 1 - e^{-\frac{U \cdot \mu}{A} z} \right]. \quad \text{Gl. 2.1}$$

Das Verfahren entspricht im wesentlichen den Annahmen nach DIN 1055 T6 /23/ bzw. E DIN 1055 T6 /24/, Lastannahmen in Silozellen. Es wird hier hingewiesen, dass der Wandreibungskoeffizient  $\mu$  (zwischen Schalungswand und Schüttgut), sowie das Verhältnis des horizontalen zum vertikalen Druck gegebenenfalls experimentell ermittelt werden muss.

Beim Wandreibungswinkel  $\mu$  ist zwischen dem statischen und dynamischen Wert  $\mu_{\text{statisch}}$  bzw.  $\mu_{\text{dynamisch}}$  zu unterscheiden ist. Dabei stellt  $\mu_{\text{statisch}}$  den Anstieg der Scherspannungen abhängig von der wirkenden Normalkraft inklusive des Kohäsionsanteils dar. Bei  $\mu_{\text{dynamisch}}$  ist die Kohäsion überwunden und es erfolgt ein Gleiten. Beim Ansatz von  $\mu_{\text{dynamisch}}$  ergeben sich somit geringere Schubspannungen und folglich höhere Drücke.

Abweichend von der Silotheorie wird von Vanhove in /14/ ein Erhöhungsfaktor  $C_d$  (Gl. 2.1) eingeführt, welcher die dynamischen Einflüsse und die Art der Stoffstruktur berücksichtigen soll. Aufgrund der grob abschätzenden Annahmen für  $C_d$  und dem Vergleich mit den stark streuenden Versuchsergebnissen in /14/ kann nicht von einer Allgemeingültigkeit des Bemessungsansatzes ausgegangen werden. Der Entwurf DIN 1055 T6 /24/ berücksichtigt beispielsweise einen Vergrößerungsfaktor C allein für Wandbelastungen bei gedrungenen Silos (Verhältnis Höhe/Mindestbreite  $\leq 1.5$ ), diese Geometriebedingung liegt bei hohen Schalungen im Regelfall nicht vor.

Damit ergibt sich mit  $C_d = 1.0$ :

$$p = \frac{\rho_b \cdot g \cdot A}{U \cdot \mu} \left[ 1 - e^{-\frac{U \cdot \mu}{A} z} \right]. \quad \text{Gl. 2.2}$$

Bei Stützen mit einer Seitenlänge  $d$  und quadratischem Querschnitt  $\left(\frac{U}{A} = \frac{4}{d}\right)$  errechnet sich der Schalungsdruck zu:

$$p_{\text{Stütze}} = \frac{\rho_b \cdot g \cdot d}{4 \cdot \mu} \left[ 1 - e^{-\frac{4 \cdot \mu}{d} \cdot z} \right]. \quad \text{Gl. 2.3}$$

Für lange Wände  $\left(\frac{U}{A} = \frac{2}{d}\right)$  bestimmt sich der Schalungsdruck zu:

$$p_{\text{Wände}} = \frac{\rho_b \cdot g \cdot d}{2 \cdot \mu} \left[ 1 - e^{-\frac{2 \cdot \mu}{d} \cdot z} \right]. \quad \text{Gl. 2.4}$$

Bei unendlicher Füllhöhe ergeben sich die maximalen Horizontaldrücke zu  $p_{\text{max}} = \frac{\rho_b \cdot g \cdot A}{U \cdot \mu}$ .

Es besteht somit keine Abhängigkeit von der Einfüllhöhe bzw. der Einfüllgeschwindigkeit.

Es ist weiterhin zu erkennen, dass der rechnerische Maximaldruck an einem beliebig hohen Bauteil ( $z \rightarrow \infty$ ) bei einer langen Wand doppelt so hohe Werte annimmt ist wie an einer Stütze mit quadratischem Querschnitt.

Unter Annahme der Gültigkeit der Silotheorie für SVB kann der Reibbeiwert  $\mu_{\text{rech}}$  indirekt bestimmt werden. Bei bekannten Bauteilabmessungen ( $A$ ,  $U$ ,  $d$ ,  $z$ ) und abhängig von der Betonierhöhe festgestellten Frischbetondrücken kann  $\mu$  aus Gleichung 2.2 abgeleitet werden.

Durch Einsetzen von  $\mu_{\text{rech}}$  in Gleichung 2.2, 2.3 und 2.4 ergäbe sich dann der Schalungsdruck für andere Querschnittsformen (z.B. Wände).

### Innere und äußere Reibung

Bei der Betrachtung der zu übertragenden Schubspannungen zwischen Beton- und Schalungsoberfläche ist zu beachten, dass je nach Betonzusammensetzung, Schalungsoberflächenausbildung und Spannungszustand zwischen innerer (Reibung innerhalb des Betons) und äußerer (zwischen Beton und Schalungswand) Reibung zu unterscheiden ist. Sobald die innere Reibung kleiner ist als die Äußere hat die Beschaffenheit der Schalungsoberfläche keinen Einfluss auf die übertragbare Schubspannung  $\tau_w$ .

Die Schubspannungen  $\tau_y$  im selbstverdichtenden Beton (innere Reibung) errechnen sich abhängig von Druckspannungen  $\sigma_n$  senkrecht zur betrachteten Ebene nach Zhuguo in /14/ mit

$$\tau_y = (\sigma_n + N \cdot F) \tan \phi_m \quad \text{Gl 2.5}$$

Dabei ist  $\tan \phi_m$  der Winkel der inneren Reibung und  $N \cdot F$  der Anteil der Adhäsionskräfte, resultierend aus der Spannung zwischen den Oberflächen der Partikel und der Saugfähigkeit des Anmachwassers. Bei verhältnismäßig hohen Druckspannungen, wie in hohen Bauteilen der Fall, kann dieser Anteil vernachlässigt werden. Bei maßgebender innerer Reibung ergibt sich die auf die Schalungswand übertragbare Schubspannung zu  $\tau_w = \tau_y$ . Dies ist jedoch nur bei sehr geringen Normalspannungen der Fall.

Bei Vernachlässigung der Adhäsionsanteile (sowohl zwischen Beton und Schalung als auch im Betongemenge) bei auftretenden Druckkräften ist die äußere Reibung stets kleiner als die innere Reibung, da an der Kontaktfläche Schalung – Beton der Reibbeiwert  $\mu$  niemals größer sein kann als  $\tan \phi_m$ . Mit zunehmender Druckspannung senkrecht zur Schalung nimmt der Einfluss der Oberflächeneigenschaften auf die übertragbaren Schubspannungen zu.

Wie bereits festgestellt ist für die Höhe der übertragbaren Kräfte vor Allem die Größe des Winkels der inneren Reibung (unter geringer Schergeschwindigkeit) entscheidend (Gl. 2.5). Während des zum Teil langen Betoniervorgangs kann es zu einem starken Ansteifen und Erhärten des Betons kommen (bis zum Erreichen des Erhärtungsendes). Damit ergeben sich zeitabhängig Veränderungen von  $\tan \phi_m$  (Vergrößerung bei Ansteifen) und somit von  $\mu$ . Ebenfalls kann infolge des thixotropen Verhaltens des Betons der Winkel der inneren Reibung beeinflusst werden (Bild 2.7).

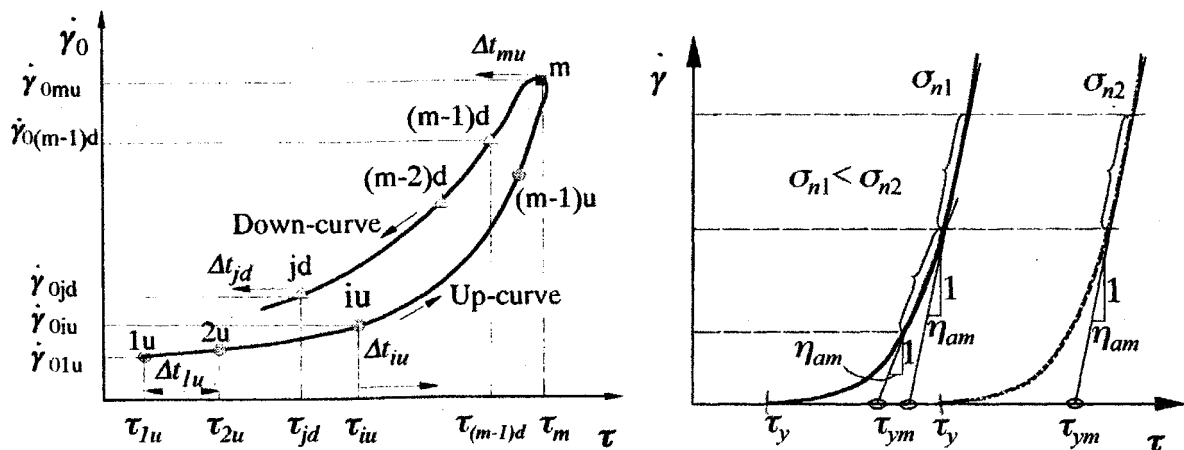


Bild 2.7 (links): Zusammenhang zwischen dem Scherwiderstand  $\tau$ , der Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  und der einwirkenden Kraft senkrecht zur Scherebene nach Zhuguo in /14/

Bild 2.8 (rechts): Zusammenhang zwischen dem Scherwiderstand  $\tau$ , der Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  in Abhängigkeit von der Beanspruchungszeit bei SVB nach Zhuguo in /14/

Um gesicherte Werte zu erhalten sind experimentelle Untersuchungen zur Untersuchung der zwischen Schalungswand und Beton übertragbaren Schubspannungen notwendig. Aus experimentellen Untersuchungen könnte die Schubspannung  $\tau_w$  und aus deren Anstieg der Wandreibungsbeiwert  $\mu$  (Abhängig vom Winkel der inneren Reibung) abgeleitet werden, Vanhove in /14/.

## 2.3 Entlüftungsverhalten

### 2.3.1 Allgemeines

Die Ausführungsqualität von Betonbauteilen wird durch die optische Qualität der hergestellten Betonoberfläche sowie die messbaren Festbetoneigenschaften, wie z.B. Druck- und Zugfestigkeit, E- Modul, Frost- Tausalz- Widerstand bestimmt. Einen entschiedenen Einfluss auf diese Eigenschaften hat dabei die Anzahl, Art und Verteilung der Poren im Betonbauteil.

Allgemein wird zwischen Gelporen  $\varnothing=1$  bis 10 nm, Schrumpfporen  $\varnothing$  ca. 10 nm, Kapillarporen  $\varnothing=10$  nm bis 100  $\mu\text{m}$ , Luftporen  $\varnothing=1$   $\mu\text{m}$  bis 1 mm und Verdichtungsporen  $\varnothing>1$  mm unterschieden. Im Zusammenhang mit dem Entlüftungsverhalten wird immer nur der Anteil der Verdichtungsporen und ein Anteil der großen Luftporen betrachtet.

Um eine ausreichende Entlüftung und Homogenität zu erreichen ist bei den Rüttelbetonen immer eine Vibrationsverdichtung notwendig. Bei filigranen Bauteilen oder hohen Bewehrungsgraden konnten aber auch bei fachgerechter Handhabung oft keine befriedigenden Ergebnisse erzielt werden. Mit dem Einsatz der selbstverdichtenden Betone besteht nun die Möglichkeit den Beton selbst bei diesen schwierigen Randbedingungen ohne Vibrationsverdichtung qualitätsgerecht einzubauen /15/. Um dies zu erreichen ist jedoch auch hier die planmäßige Entlüftung und damit die Begrenzung des eingetragenen Luftvolumens sicherzustellen.

### 2.3.2 Entlüftung von SVB

Beim Mischen des Betons sowie beim Einbringen des Betons in die Schalung nimmt der selbstverdichtende Beton abhängig von seiner Konsistenz ein hohes Luftvolumen auf. Um die gewünschten Luftgehalte im Frischbeton von weniger als 1.0 bis maximal 3.0 Vol- % im eingebauten Zustand zu erreichen, muss der Beton in der Lage sein in der Schalung ausreichend selbständig zu entlüften. Ist dies nicht möglich kann der Beton die oben angeführten Festbetoneigenschaften gegebenenfalls nicht in vollem Umfang erreichen.

Die Auftriebsfähigkeit der Luftblasen hängt vor Allem von ihrer Größe sowie den rheologischen Eigenschaften des Betons ab. Die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons können vereinfacht mit dem Bingham-Modell beschrieben werden (Bild 2.9).

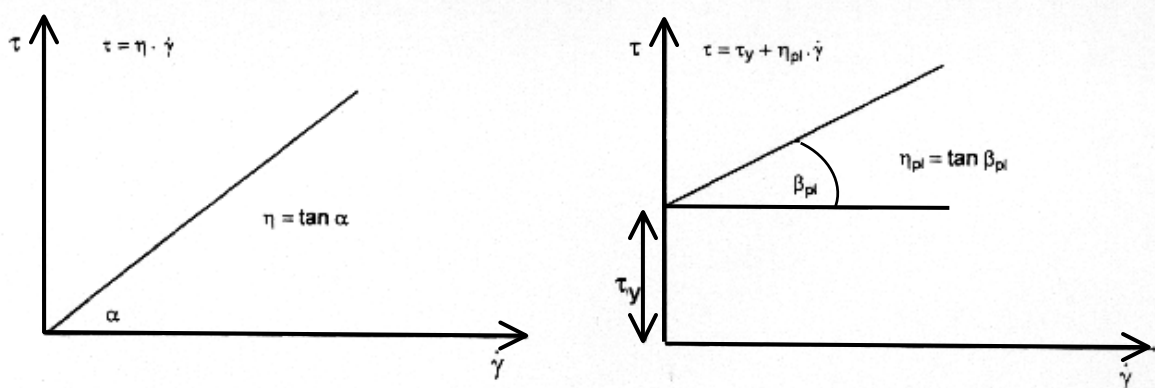


Bild 2.9: Fließkurven einer Newtonschen Flüssigkeit ohne Fließgrenze (links) und eines Bingham- Körpers mit Fließgrenze  $\tau_y$  (rechts) /32/

Die Fließgrenze  $\tau_y$  und die plastische Viskosität  $\eta_{pl}$  beeinflussen ob (Fließgrenze) und wie schnell (Viskosität) entsprechende Luftporen im Beton aufsteigen. Eine niedrige Fließgrenze und eine geringe plastische Viskosität wirken dabei günstig.

Es ist dabei zu beachten, dass insbesondere an den Unterseiten der Gesteinskörnungen der Aufstiegsprozess zum Erliegen kommen kann (die lokale Fließgrenze wird sehr hoch). Vor allem die mittelgroßen Gesteinskörnungen halten einen hohen Anteil an Luft zurück. Sie besitzen sowohl eine ausreichende Partikelgröße als auch eine hohe spezifische Oberfläche /36/, siehe Bild 2.10.

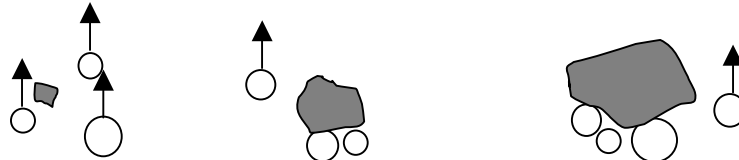


Bild 2.10: Behinderung des Aufstiegs der Luft durch Gesteinskörnungen

Weiterhin ist zu bemerken, dass auch die Eigenschaften des Leimanteils auf die Auftriebsfähigkeit der Luftporen entscheidenden Einfluss haben. Dies gilt zum Einen für die Auftriebsgeschwindigkeit (Viskosität) und zum Anderen für die Grundsätzliche Möglichkeit des Aufstiegs (Fließgrenze u.a. infolge Strukturbildung, Verflockung).

Der Leimanteil wiederum beeinflusst im wesentlichen Maße die rheologischen Eigenschaften der gesamten Frischbetonmischung. Daher können bei Vorliegen von identischen Gesteinskörnungen Schlussfolgerungen von der Rheologie der Gesamtmischung auf die Entlüftungsfähigkeit gezogen werden.

Auch die Länge des Weges, die eine Luftpore bis zum Erreichen der Oberfläche zurücklegen muss (gerade bei hohen Bauteilen zu beachten) hat einen sehr wichtigen Einfluss auf die Entlüftung. Je weiter der Weg ist, um so wahrscheinlicher ist es, dass der Aufstiegsprozess vorzeitig endet. Dies erfolgt wie bereits erläutert entweder durch die Blockade an einem Gesteinskorn oder durch Strukturbildung im Leim infolge chemischer und physikalischer Prozesse (u.a. Bildung von Calciumsulfat, Verflockung; Bild 2.11), und der damit verbundenen Erhöhung der Fließgrenze.

Damit eine in den Beton eingebrachte Luftblase entweichen kann, muss nur eine der folgenden Bedingungen erfüllt sein:

- Die Auftriebsgeschwindigkeit der Luft ist höher als die Betoniergeschwindigkeit.
- Der Auftrieb von der Einbringstelle bis zur endgültigen Oberfläche ist möglich.

Die Fließgrenze  $\tau_y$  eines selbstverdichtenden Betons ist neben den Adhäsionskräften im betrachteten Medium vor allem von den Druckspannungen senkrecht zur Scherfläche abhängig, Zhuguo in /14/. Letzterer Anteil kann gerade bei großen Betonierhöhen sehr hoch sein. Nach Zhuguo /14/ ergibt sich die Fließgrenze bei selbstverdichtendem Beton zu

$$\tau_y = (\sigma_n + N \cdot F) \tan \phi_m. \quad \text{Gl. 2.5}$$

Dabei ist  $\tan \phi_m$  der Winkel der inneren Reibung,  $N \cdot F$  der Anteil der Adhäsionskräfte und  $\sigma_n$  die Druckspannung senkrecht zur Scherfläche. Ein Aufstieg von eingeschlossenen Luftblasen wird somit mit zunehmender Betonierhöhe unwahrscheinlicher.

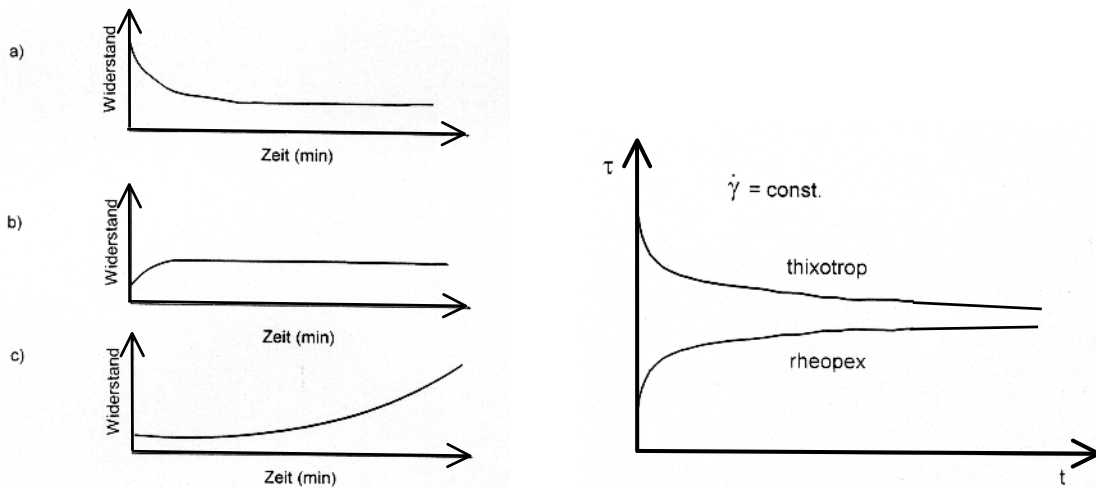


Bild 2.11 (links): Einflüsse von Strukturbruch (a), Verflockung (b) und Hydratation (c) /32/

Bild 2.12 (rechts): Thixotropes und rheopexes Fließverhalten eine Flüssigkeit /32/

Eine bestmögliche Entlüftung wird erreicht, wenn der Beton nach dem Einbringen in die Schalung bis zu seiner endgültigen Position ohne Unterbrechung horizontal oder auch im Gefälle fließen kann. Durch das Fließen und der damit verbundenen Gefügebewegung wird eine andauernde Blockierung des Aufstiegs durch Hindernisse erschwert. Ebenso wird die plastische Viskosität und die Fließgrenze - infolge der strukturviskosen Eigenschaften des Zementleims (Bild 2.7, 2.11 und 2.12) und der geringen Betondrücke - gering gehalten. Dies begünstigt die Entlüftung wesentlich. Es gilt, je kürzer der Fließweg, desto schlechter ist die Selbstentlüftungsfähigkeit des Betons.

In breiten Bauteilen (z.B. Platten, Fundamente) steht meist ein ausreichender Weg für die Entlüftung zur Verfügung. Bei geringen Querschnittsabmessungen (z.B. Stützen, kurze Wände) ist dies meist nicht gegeben. Haben diese Bauteile zusätzlich noch eine große Höhe wird durch die meist hohe Steiggeschwindigkeit sowie den langen Auftriebsweg ein nachträgliches Entlüften in der Schalung schwierig.

Beim Betonieren von schmalen, hohen Bauteilen wird deshalb manchmal dem Einpressen des Betons von der Unterkante der Schalung der Vorzug gegenüber einem Betonieren im freiem Fall gegeben. Die Untersuchung dieser Betoniermethode war aber nicht Teil des Forschungsvorhabens.

### **2.3.3 Oberflächenqualität**

Die Sicherstellung einer porenarmen Betonoberfläche stellt eines der größten derzeitigen Probleme bei der Anwendung von SVB dar. Insbesondere die Vermeidung der Bildung großer Poren nach den Einfüllen des Betons in die Schalung ist sehr problematisch.

Festzustellen ist, dass die Art der verwendeten Schalung /15/ entscheidenden Einfluss auf die Oberflächenqualität hat. Zum einen beschreibt die Betonoberfläche das exakte Abbild der Schalung, zum anderen beeinflusst die Saugfähigkeit der Schalung das Erscheinungsbild und gegebenenfalls die Dichtigkeit. Saugende Schalungen nehmen im Gegensatz zu nichtsaugenden Schalungen Wasser und Lufteinschlüsse an der Kontaktfläche zum Frischbeton auf. Dadurch können die Oberflächenporen reduziert werden. Nichtsaugende Schalungen bewirken eine glatte und glänzende Oberfläche aber auch zahlreiche und größere Oberflächenporen.

### **3. Versuchsprogramm**

#### **3.1 Versuchsumfang**

Hauptziel der Untersuchungen war, den Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf Ausführungsqualität und Schalungsdruck bei Verwendung von SVB, zu untersuchen. Da eine rechnergestützte Simulation des Betoniervorganges bei der Menge der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren und der komplexen Modellbetrachtungen nur bedingt möglich ist, wurden Versuche am tatsächlich hergestellten Bauteilen vorgenommen. Der Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf den Schalungsdruck sollte dabei an hohen Bauteilen überprüft werden.

Als Konsequenz von Vorüberlegungen und einer umfangreichen Literaturrecherche konnten die Parameter festgestellt werden, welche neben der Betoniergeschwindigkeit Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften und den Schalungsdruck haben. Wie schon in Abschnitt 2 dargestellt, sind dies die Rohdichte, die Konsistenz, die Querschnittsabmessungen, die Betonieretechnik, der Bewehrungsgrad das Erhärungsverhalten und somit die Frischbetontemperatur. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten war es notwendig diese Randbedingungen bei der Variation der Betoniergeschwindigkeiten konstant zu halten, um nachfolgend, auf die gewonnenen Ergebnisse aufbauend, weitere signifikante Parameter zu untersuchen. Die Anfangsfallhöhe wurde ebenfalls nicht verändert.

Insgesamt wurden zehn Versuche an bewehrten Betonstützen und ein Versuch an einem unbewehrten Bauteil durchgeführt. Alle Stützen hatten die gleichen Querschnittsabmessungen 30/30 cm sowie eine einheitliche maßgebende Betonierhöhe von 4.0 m.

Zu Grunde lag eine konstante Mischungszusammensetzung wobei lediglich der Wassergehalt (bzw. die Art des Fließmittels bei einer Referenzstütze) variiert wurde. Der Beton wurde mittels eines Betoniertrichters je nach Betonierfortschritt aus einer freien Fallhöhe von bis zu 4.3 m eingebaut.

Das Versuchsprogramm unterteilt sich in 3 Versuchsreihen I, II und III (siehe Tabelle 3.1). In allen Reihen wurden Einflüsse auf den Schalungsdruck sowie die Ausführungsqualität infolge der jeweiligen Einflussparameter untersucht.

I – Untersuchung des Einflusses der Betoniergeschwindigkeit

II – Untersuchung des Einflusses des Setzfließmaßes in Verbindung mit der Betoniergeschwindigkeit

III – Vergleich mit der Vibrationsverdichtung/ Einfluss des Bewehrungsgehaltes

Die Schalungsdrücke wurden mit Hilfe eines am Institut für Massivbau der TU-Darmstadt entwickelten Messmoduls (siehe Abschnitt 3.4, Prüfeinrichtung) bestimmt. Die zeitabhängige Messung der auftretenden Kräfte erfolgte bei allen Stützen an jeweils 4 Messstellen. Diese wurden in einem Abstand von 1, 2, 3 und 4 m ab Oberkante der maximalen Betonierhöhe angeordnet.

Die Beurteilung des Entlüftungsverhaltens konnte durch die Anordnung von drei über die Schalungshöhe verteilt angeordnete Sichtfenster erfolgen.



Tabelle 3.1: Systematik der Versuchsreihen I bis III

Reihe	Nr.:	Betoniergeschwindigkeit [m/h]	Setzfließmaß sm zu Betonierbeginn [cm]	Bezeichnung	Bemerkung
I	1	12.5	ca. 75	1a	SVB
	2	25.0		2a	SVB
	3	40.0		3a	SVB
	4	80.0		4a	SVB
	5	160.0		5a	SVB
II	6	25.0	ca.70	2b	SVB
	7	25.0	ca.60	2c	SVB
	8	40.0	ca.70	3b	SVB
	9	60.0	ca.55	4c	SVB
III	10	25.0	ca.70	2b*	SVB, konstr. Bewehrung
	11	160.0	a = 47 cm (KR)	5r	Rüttelbeton

Für jede Versuchsmischung wurden folgende Frischbetoneigenschaften bestimmt:

- Konsistenz, Setzfließmaß mit Setztrichter nach DIN EN 12382, ohne Blockierung bei Betonierbeginn (Das Setzfließmaßes ermöglicht eine Beurteilung der Verformungsfähigkeit des Frischbetons. Es korrespondiert dabei gut mit der Zugfestigkeit bzw. der Fließgrenze bei Annahme einer Bingham-Flüssigkeit)
- Ausbreitzeit  $t_{500}$  bei der Konsistenzbestimmung (Bei einem konstanten Setzfließmaß kann hier eine begrenzte Aussage zur Viskosität getroffen werden.)
- Frischbetontemperatur nach DIN 1048 T1 /35/
- Sedimentationsneigung bei der Konsistenzbestimmung am Ausbreitkuchen (optisch)
- Luftporenvolumen (mit LP-Topf nach DIN 1048 T1 /35/)
- Rohdichte nach DIN 1048 T1 /35/
- Wassergehalt mit Darrversuch nach DIN 1048 T1 /35/

Außerdem konnte exemplarisch, unter Variation des Anfangssetzfließmaßes, das Ansteifverhalten mittels Setzfließversuch ermittelt werden.

Zur Beschreibung der Ausführungsqualität wurden außer der optischen Begutachtung der hergestellten Betone folgende Untersuchungen zu den Festbetoneigenschaften vorgenommen.

An gesondert hergestellten Probekörpern (Würfel 15/15/15cm):

- Druckfestigkeiten und Festbetonrohndichte nach 56 Tagen (Lagerung und Prüfung nach DIN 1048 /35/)
- Druckfestigkeit nach 56 Tagen (Luftlagerung) exemplarisch

An den von den Versuchskörpern entnommenen Probekörpern (3 Bohrkerne  $\varnothing 10/10\text{cm}$ , jeweils im Abstand von 50 cm, 200 cm, und 400 cm von Oberkante Stütze):

- Druckfestigkeiten und Festbetonrohddichte nach 56 Tagen nach DIN 1048 /35/
- Bestimmung des Gehaltes an offenen Poren mittels Vakuum – Wasseraufnahme nach ca. 56-90 Tagen DAfStb Heft 422 /34/

Es ist zu bemerken, dass absolute Größe der Betondruckfestigkeit für Bewertung des Entlüftungsverhaltens nicht aussagekräftig ist. Interessant ist vor Allem der Vergleich der Festigkeiten einerseits zwischen den extra hergestellten Probekörpern (Würfeln 15 cm) und den Bohrkernen ( $\varnothing 10\text{ cm}$ ) eines Bauteilversuches sowie andererseits der Druckfestigkeiten zwischen den jeweiligen Versuchskörpern und Versuchsreihen. Aus technologischen Gründen wurde der Zeitpunkt für die Druckfestigkeitsuntersuchung auf 56 Tagen nach dem Betoniertermin festgesetzt.

### **Versuchsreihe I**

In der Versuchsreihe I wurden 5 Stützen mit extrem unterschiedlichen Betoniergeschwindigkeiten (Steiggeschwindigkeit) analysiert:

- |                   |                            |
|-------------------|----------------------------|
| 1a - sehr langsam | mit $v = 12,5\text{ m/h}$  |
| 2a - langsam      | mit $v = 25\text{ m/h}$    |
| 3a - mittel       | mit $v = 40\text{ m/h}$ ,  |
| 4a - schnell      | mit $v = 80\text{ m/h}$ ,  |
| 5a - sehr schnell | mit $v = 160\text{ m/h}$ , |

(Index 1 bis 5 beschreibt die unterschiedlichen Betoniergeschwindigkeiten, Index a das Setzfließmaß des Frischbetons von ca. 75 cm.)

Die Bandbreite der gewählten Geschwindigkeiten orientieren sich an den in der Praxis auftretenden Werten für Stützen und Wände. Dabei liegen die üblichen Betoniergeschwindigkeiten für Stützen bei 25 bis 80 m/h und für Wände bei 12.5 bis 40 m/h. Bei sehr massiven Bauteilen, wie z.B. Brückenwiderlager, sind wesentlich niedrigere Betoniergeschwindigkeiten möglich. Diese Bauteile waren aber nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Allen Betonen lag eine identische stoffliche Zusammensetzung zu Grunde. Das für die gewählte Mischung optimale Setzfließmaß  $s_m$  ohne Blockiering nach DIN EN 12382 von ca. 75 cm wurde ca. 10 min nach Mischungsende bestimmt, wobei die Mischzeit 3 Minuten betrug.

## Versuchsreihe II

Aufgrund der in Versuchsreihe I erzielten Ergebnisse wurde ergänzend zum ursprünglich vorgesehenen Versuchsprogramm in Abstimmung mit der Beratergruppe zusätzlich der Einfluss des Setzfließmaßes untersucht.

Bei einer gewählten Betoniergeschwindigkeit von 25 m/h (langsam) wurden 2 Stützen betoniert, bei denen das Setzfließmaß planmäßig auf 71 cm sowie 61 cm abgesenkt wurde. Dabei ist zu bemerken, dass die DAfStb- Richtlinie Selbstverdichtender Beton /17/ ein Setzfließmaß von mindestens 70 cm ohne Blockierring vorschreibt. Die langsamen Geschwindigkeiten wurden gewählt, da hier ein besonders signifikanter Einfluss der Fließeigenschaften auf den Frischbetondruck zu erwarten war:

2b mit  $v = 25$  m/h und  $s_m = 71$  cm

2c mit  $v = 25$  m/h und  $s_m = 61$  cm

(Index b und c beschreiben das Setzfließmaß von ca. 70 bzw. 60 cm.)

Um auch hier Aussagen zum Einfluss der Betoniergeschwindigkeit zu erhalten wurden noch zwei weitere Stützen mit folgenden Parametern untersucht:

3b mit  $v = 40$  m/h und  $s_m = 69$  cm

4c mit  $v = \text{ca. } 80$  m/h und  $s_m = 55$  cm

## Versuchsreihe III

In diesem Abschnitt wurden an einer Stütze Untersuchungen zum Einfluss des Bewehrungsgrades auf den Frischbetondruck vorgenommen. An einem weiteren Bauteil wurde Rüttelbeton eingebaut, um einen Vergleich mit SVB zu ermöglichen.

Die erste Stütze wurde dazu unter Variation des Bewehrungsgrades auf Grundlage der Randbedingungen der Vergleichsstütze 2a ( $s_m = 71$  cm,  $v = 25$  m/h) betoniert. Die rein konstruktiven Stahleinlagen von 4  $\varnothing 12$  (Längsbewehrung), sowie 4 Bügel  $\varnothing 8$  im Abstand von 1,3 m ersetzen die Bewehrung der bisherigen Versuchsstützen.

Für die mit Rüttelbeton hergestellte Referenzstütze, wurde die gleiche SVB- Mischung, jedoch unter Zugabe eines schwächeren Fließmittels, gewählt. Damit ergab sich ein Beton mit der Regelkonsistenz (KR), welcher mittels eines Innenvibrators  $\varnothing 5$  cm verdichtet wurde. Die kontinuierliche Mitführung des Verdichtungsgerätes erfolgte bei gleichmäßiger Betoniergeschwindigkeit (160 m/h). Alle weiteren Randbedingungen entsprachen denen der Stütze 5a.

## 3.2 Mischungszusammensetzung

Für die Versuche wurde ein Beton ausgewählt, welcher am Institut für Massivbau in Darmstadt in Zusammenarbeit mit der Hochtief AG – Spannbetonwerk Stockstadt im Jahr 2000 im Zuge einer Zustimmung im Einzelfall entwickelt wurde.

Der Beton wurde auf eine Mindestgüte von B55 bzw. C50/60 ausgelegt, erreicht aber infolge der Mischungszusammensetzung zum Teil erheblich höhere Druckfestigkeitswerte. Der Mehlkornanteil liegt mit ca. 450 kg/m<sup>3</sup> im Bereich der DIN 1045 (1988). Trotzdem weist der Beton hervorragende Qualitäten bezüglich der Verarbeitbarkeit sowie der Festbetoneigenschaften auf. Außerdem ist er aufgrund des geringen Mehlkorngehaltes sowie des Verzichts von Stabilisierern kostengünstig. Damit wurde ein Beton ausgewählt, der bereits baupraktisch Verwendung findet und im Hinblick auf den Mehlkorngehalt richtungsweisend ist. Als Fließmittel wurde ein leistungsfähiges Polycarboxylatether (PCE) verwendet.

Tabelle 3.2: Mischungszusammensetzung der verwendeten Betone für 1m<sup>3</sup> Beton

	SVB	Referenzbeton
CEM II 52,5R	350 kg	350 kg
SFA	90 kg	90 kg
Wasser	190 l	190 l
FM 1	6 l	-
FM 2	-	6 l
Sand 0/2	834 kg	834 kg
Kies 2/8	420 kg	420 kg
Splitt 8/11	465 kg	465 kg

## 3.3 Prüfkörper

### 3.3.1 Schalung

Alle Stützen wurden mit derselben Schalung betoniert. Die Abmessungen des zu herzustellenden Betonkörpers betragen 30/30/432 cm. Als Schalungsmaterial wurde eine Mehrschichtenplatte mit Deckfurnierholz und Phenolbeschichtung (AGEPAN- Planox N130) mit einer Wandstärke von 2.1 cm gewählt, siehe Bild 3.4.

Die Kennwerte der Oberfläche senkrecht zur Faserrichtung werden beschrieben durch:

- die Rauhtiefe  $R_t$  (Abstand der höchsten Profilspitze vom tiefsten Talpunkt nach Abtrennen der Welligkeit innerhalb der Rauheitsbezugsstrecke), welche 13-14  $\mu\text{m}$  beträgt und
- den Arithmetischen Mittenrauhwert  $R_a$  (arithmetisches Mittel aller Abweichungen des Ist-Profiles von der mittleren Linie, welche durch ideales Einebnen der Rauheitsberge in die Täler innerhalb der Rauheitsbezugsstrecke ermittelt wird, DIN 4762) mit 0.62-0.74  $\mu\text{m}$ .

Um eine Aussage zum Einfluss der Beschaffenheit der Schalungsoberfläche auf die Ausführungsqualität treffen zu können, wurde bei zwei Stützen in Versuchsreihe I eine Seite der Stützenschalung mit rauer Oberfläche (Holz) ausgeführt. Die restlichen Seiten wiesen weiterhin eine glatte Oberfläche (beschichtete Holzschalung) auf.

### 3.3.2 Bewehrung

In alle Versuchsstützen der Reihen I und II sowie in 5r wurde die gleiche Bewehrung (Typ 1) eingebaut. Die Armierung wurde so gewählt, dass sie praxisüblichen Verhältnissen entspricht, siehe Bild 3.1. Durch einen mittleren Bewehrungsgrad sollte dessen Einfluss auf den Schalungsdruck möglichst gering gehalten werden.

Der Längsbewehrungsgrad der Stützen liegt somit im Bereich von ca. 3.0 %. Die Bügelbewehrung bestand aus jeweils  $\varnothing 10$ ,  $s = 20$  cm.

Die Betondeckung beträgt nom  $c = 3.0$  cm.

Aufgrund der gewünschten Parameterminimierung wurde auf Verstärkungen der Bügelbewehrung im oberen bzw. unteren Stützenbereich verzichtet.

Die Stütze 2b\* in Versuchsreihe III wurde unbewehrt ausgeführt (Typ 2).

#### Stütze Typ 1

$b/h = 30/30$  cm

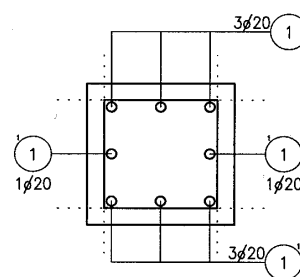
10 x ausgeführt

nom  $c = 3.0$  cm

BSt 500 S

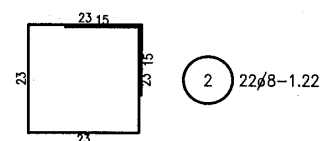
$V = 0,3888$  m<sup>3</sup>

$G = 0.972$  t



#### Stahlliste TYP 1 je Stütze

Pos.	Stk.	D [mm]	l [m]	l ges [m]	Stahl	m [kg]
1	8	20	4.29	34.56	IV S	85.11
2	22	8	1.22	26.84	IV S	10.60
m ges						<b>95.72</b>



Bügelabstand  $s_{BÜ} = 15$  cm

Bild 3.1 : Bewehrung für Stützentyp 1

### 3.4 Prüfeinrichtung

#### 3.4.1 Messmodul

Um eine Aussage zum Verhalten des Schalungsdrucks über die gesamte Stützenhöhe zu erhalten wurden vier Module zur Kraftmessung, in gleichen Abständen über die Höhe verteilt, in die vertikale Schalungswand integriert. Die Messpunkte befanden sich in einer Entfernung von 1.0, 2.0, 3.0 und 4.0 m von der Oberkante des fertigen Elements. Das Messmodul bestand aus jeweils einer entkoppelten Schalplatte mit den Abmessungen von 15/15 cm, welche die Druckkräfte aufnahm und an die Kraftmessdose weiterleitete (Bild 3.3).

Eine Membran - zwischen dem eigentlichen Schalkörper und der Platte angeordnet - bewirkte die Entkopplung der Platte und verhinderte gleichzeitig das Auslaufen des Betons durch die Fuge mit einer Breite von 0.6 cm.

Um die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Messsystems zu überprüfen, wurden vorab Vorversuche zur Bestimmung des hydrostatischen Wasserdruckes bei gleichzeitiger Kalibrierung der Messeinrichtung durchgeführt.

#### 3.4.2 Sichtmodul

Die Beurteilung des Entlüftungsverhaltens wurde durch drei über die Schalungshöhe verteilt angeordnete Sichtfenster ermöglicht. Sie bestanden aus Plexiglas ( $h/b = 16/20\text{cm}$ ) und waren jeweils zwischen den Messmodulen angeordnet. Neben der Möglichkeit das Blockier- und Entlüftungsverhalten zu beschreiben, konnte auch die Einhaltung der festgelegten Betoniergeschwindigkeit kontrolliert werden.

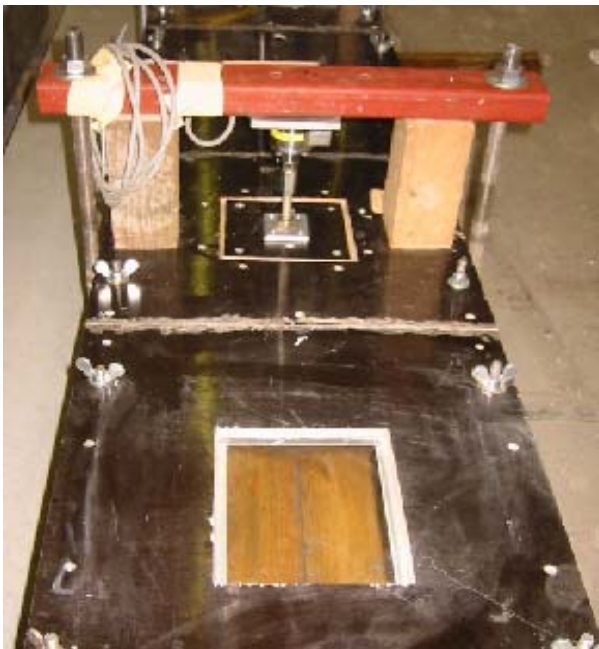


Bild 3.2 (links): Detail Sichtfenster sowie Messmodul

Bild 3.3 (rechts): Detail Messmodul mit eingebauter Kraftmessdose

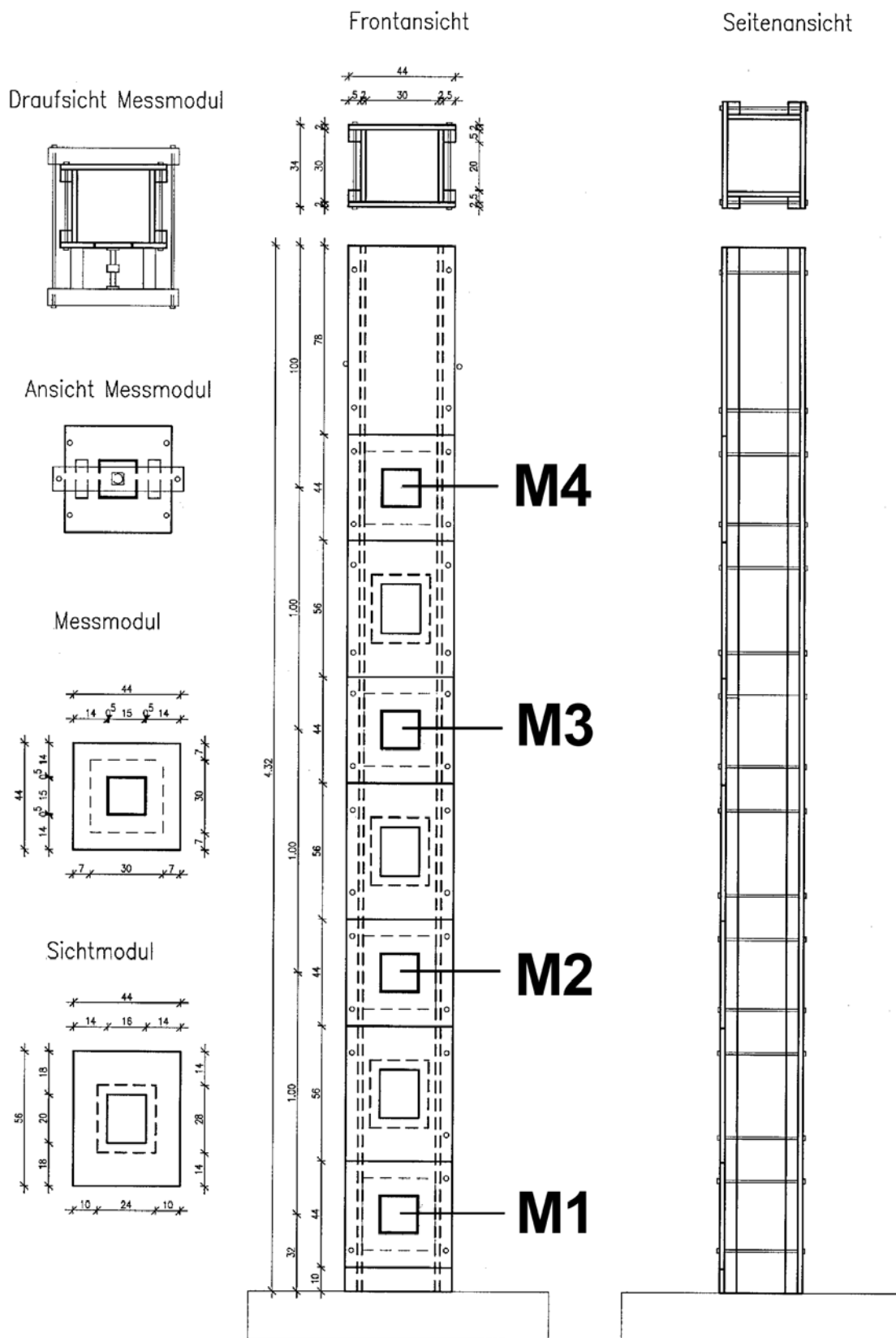


Bild 3.4: Konstruktion der Schalung inklusive Sicht- und Messmodul

### 3.5 Versuchsdurchführung

Jede Betonmischung wurde in einem Zwangsmischer mit einem Gesamtvolumen von 2000 l hergestellt, wobei das für die Stütze benötigte Volumen lediglich 389 l betrug.

Die Mischzeit betrug 3 min nach Zugabe aller Komponenten. Ca. 10 min nach Mischungsende war Betonierbeginn.

Der Beton wurde mittels eines Betonierkübels aus einer freien Fallhöhe von anfänglich 4.3 m eingebaut. Die Steuerung des Auslaufs erfolgte durch einen Schieber. Um eine gleichmäßige Füllgeschwindigkeit zu erreichen musste bei sehr geringeren Betoniergeschwindigkeiten (für Stützen unüblich) auf Grund der geringen Volumenströme ein kleinerer Trichter als Puffer zwischengeschaltet werden

Durch die Anordnung der Messstellen und Sichtfenster über die gesamte Höhe konnte die Geschwindigkeit kontrolliert und gegebenenfalls den vorgegebenen Werten angepasst werden.

Die Messung wurde bei Betonierbeginn gestartet und etwa 1 h nach Betonierende abgebrochen, wobei die Messhäufigkeit 1/s betrug.

Das Ausschalen erfolgte jeweils 24 h nach dem Betonierbeginn, die anschließende Lagerung bei einer Temperatur von ca. 15°C. Die Bauteile wurden liegend gelagert und mit einer Plane lose abgedeckt. Somit konnten die Randbedingungen für die anschließenden Druckfestigkeitsuntersuchungen an den Bohrkernen konstant gehalten werden.



Bild 3.5 (links): Stützenschalung in Betoniergrube



Bild 3.6 (rechts): 800 Liter Einfülltrichter



## 4. Versuchsergebnisse

### 4.1 Allgemeines

In den folgenden Kapiteln werden die Versuchsergebnisse dargestellt und interpretiert. Im Verlauf der Abwicklung mussten gewonnene Ergebnisse überprüft und bei Bedarf ergänzende Versuche durchgeführt werden. Daher entspricht das angegebene Versuchsprogramm nicht exakt der durchgeführten chronologischen Reihenfolge. Die Unterteilung in die Reihen I, II und III ermöglicht eine übersichtliche Auswertung.

### 4.2 Schalungsdruck

#### 4.2.1 Versuchsreihe I

Bei der Herstellung von hohen und schlanken Bauteilen sind im Allgemeinen Betoniergeschwindigkeiten von mehr als 20 m/h zu erwarten. Daher wurden 4 Versuchskörper, mit unterschiedlichen Betoniergeschwindigkeiten (160, 80, 40, 25 m/h), untersucht. Festzustellen waren an allen Messpunkten und für jede Betonierhöhe nahezu hydrostatische Betondruckverläufe (Bild 4.4).

Lediglich bei einer zusätzlich ins Versuchsprogramm aufgenommenen Stütze mit einer vergleichsweise langen Betonierdauer von insgesamt 25 Minuten (12.5 m/h), wurde eine Abminderung des Druckes um ca. 23 Prozent gemessen. Dabei ist festzustellen, dass bei einem Vergleich der Schalungsdrücke zum Zeitpunkt 25 Minuten nach Betonierbeginn (ca. 40 Minuten nach Mischungsbeginn) auch bei den anderen Versuchen eine Abnahme des Schalungsdruckes um bis zu 20 Prozent vorlag. Dieser Effekt kann mit dem rheologischen Verhalten und mit dem Ansteifen der Mischungen erklärt werden (Bild 4.5), was einen entscheidenden Einfluss auf die Schalungsdrücke hat, siehe dazu Abschnitt 4.2.2.

Im folgenden Diagramm (Bild 4.1) sind die gemessenen absoluten Schalungsdrücke in Abhängigkeit von der Betonierzeit an der Messstelle 1 (maximale Betonierhöhe 4 m) abgebildet. Der Verlauf für die 4 höheren Geschwindigkeiten zeigt die konstante Zunahme des Schalungsdruckes bis zum Betonierende bei gleichmäßigem Einbringen des Betons. Bei einer Betoniergeschwindigkeit von 12.5 m/h ist davon abweichend am Messpunkt 1 und 2 (Bild 4.2) ein stufenförmiger Druckverlauf zu erkennen, welcher bereits vor dem Abschluss des Betoniervorgangs (ca. 0.4 m vor OK Stütze) seinen maximalen Wert erreicht.

Der stufenförmige Verlauf ist mit der Stabilisierung der Mischung infolge ihrer thixotropen Eigenschaften, siehe Abschnitt 1, und der damit verbundenen lokalen Stützwirkung (aus Wandreibung und Bogenbildung) zu erklären. Bei Erhöhung des Betonierdrucks gaben diese nach und es erfolgte eine rasche Druckerhöhung. Bei einer Betonierhöhe über 4 m oder auch infolge leichter Erschütterungen (Anstoßen an die Schalung) muss von einem weiteren Nachgeben der Stützstruktur und somit von höheren Drücken ausgegangen werden. Damit ist auch bei einer Betoniergeschwindigkeit von 12.5 m/h und einem Setzfließmaß von 74 cm von annähernd hydrostatischen Druckverhältnissen auszugehen.

Bei der Betoniergeschwindigkeit von 160 m/h (Stütze 5a) ist zu erkennen, dass die Maximalwerte den hydrostatischen Druckverlauf leicht überschreiten. Dieser Effekt kann mit einer erhöhten dynamischen Wirkung infolge der hohen Einfüllgeschwindigkeit in Kombination mit der großen Fallhöhe erklärt werden. Des weiteren ist zu beachten, dass die den Berechnungen zugrunde liegende Frischbetonwichte an den jeweiligen Probewürfeln bestimmt wurde. Aufgrund des Druckverlaufes in der Schalung, und der damit verbundenen Luftporenkomprimierung im Beton, erhöhte sich jedoch teilweise die Frischbetondichte und bewirkte folgerichtig einen höheren Schalungsdruck, (siehe dazu Abschnitt 4.3).

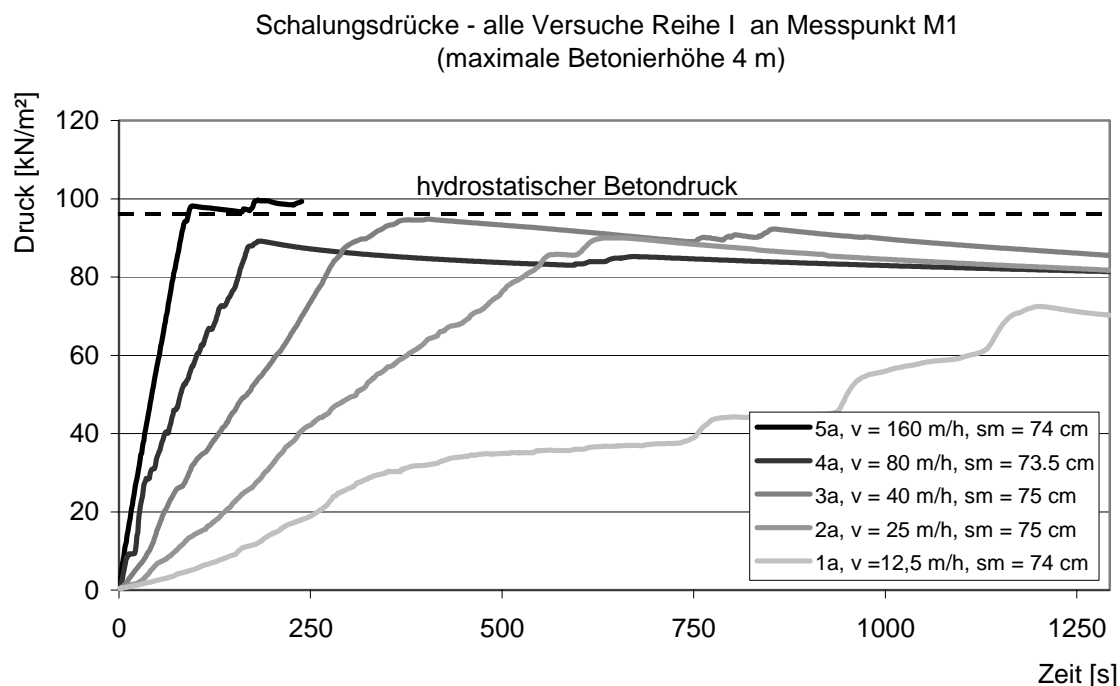


Bild 4.1: Von der Messdose M1 aufgenommene Kräfte, auf den Schalungsdruck umgerechnet, über die Zeit  $t_{\text{mess}} = 25$  min, Versuchsreihe I

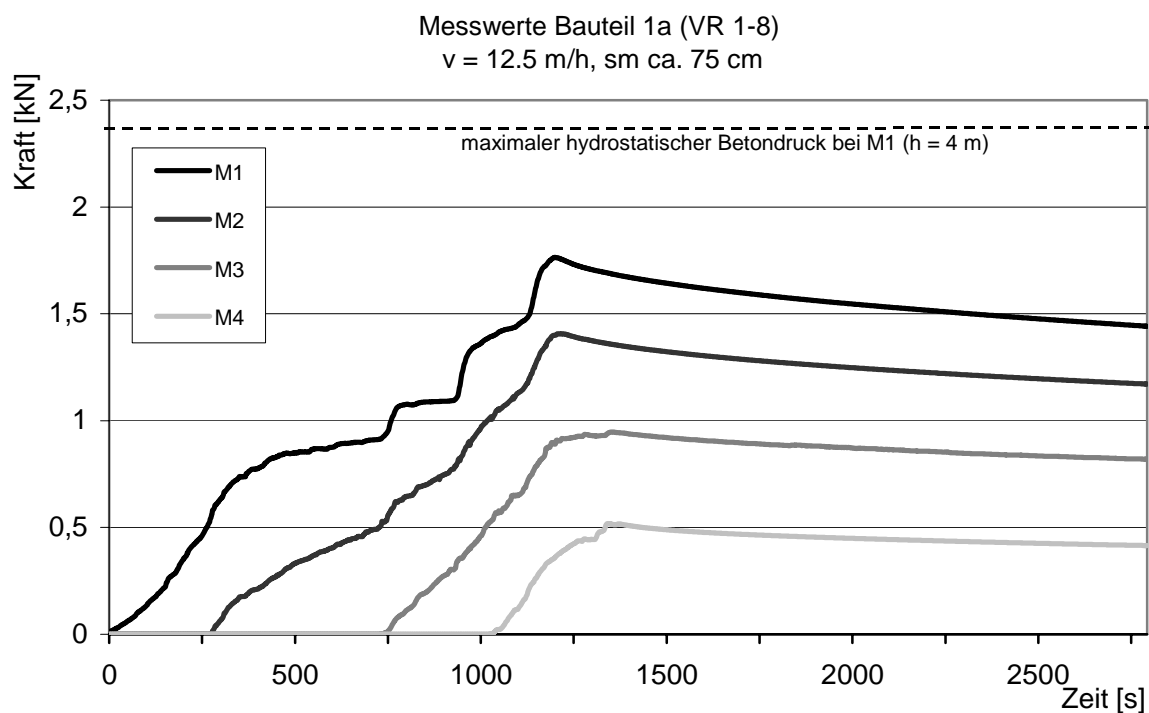


Bild 4.2: Von den Messdosen M1-M4 aufgenommene Kräfte über die Zeit  $t_{\text{mess}} = 50$  min, an der Stütze 1a,  $v = 12.5$  m/h,  $sm = 74$  cm

In Bild 4.3 und 4.4 sind die erreichten Schalungsdrücke abhängig von der Betoniergeschwindigkeit und der maximalen Betonierhöhe dargestellt. Zu erkennen sind die bereits erwähnten nahezu hydrostatischen Druckverläufe für die Betoniergeschwindigkeiten  $v > 12.5$  m/h. Zu beachten sind jedoch die Besonderheiten bei Betrachtung der absoluten Werte. Bei einer Geschwindigkeitsreduzierung von 80 m/h auf 40 m/h ist bei einem Vergleich der maximalen Werte bei allen Betonierhöhen entgegen der Erwartungen ein Anstieg des Maximaldrucks festzustellen. Dieses Verhalten kann durch leicht variierende Frischbetoneigenschaften erklärt werden.

Der Beton wurde mit einer Zielvorgabe für Setzfließmaß von  $s_m$  ca. 74 m hergestellt. Infolge leichter Schwankungen der Sandzusammensetzung veränderten sich die Wasseransprüche der Mischungen und somit das Fließverhalten (Schwankung der Setzfließmaße zwischen 73.5 und 76 cm in Reihe I, siehe Tabelle 4.1). Die Auswertung der Ergebnisse ließ eine Korrelation zwischen Setzfließmaß und Schalungsdruck vermuten. Eine genauere Betrachtung dieser Zusammenhänge erfolgte deshalb in Reihe II des Versuchsprogramms.

Tabelle 4.1: Setzfließmaße in Versuchsreihe I bei Betonierbeginn

Stütze	Betoniergeschwindigkeit [m/h]	Setzfließmaß $s_m$ [cm]
1a	12.5	73.5
2a	25.0	75.5
3a	40.0	75
4a	80.0	73.5
5a	160.0	74

Schalungsdruck für unterschiedliche Betonierhöhen, Versuchsreihe I

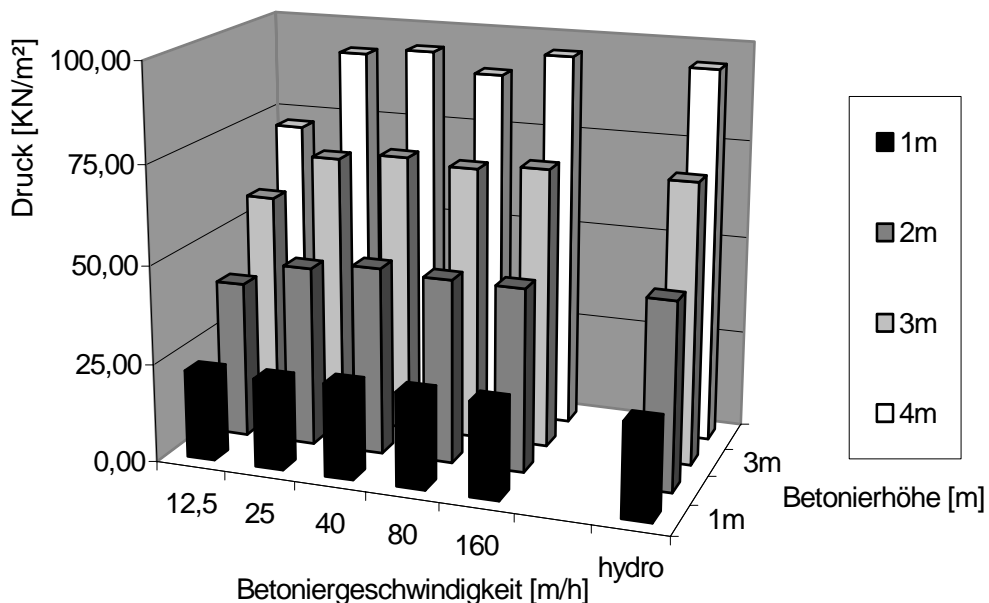


Bild 4.3: Schalungsdruck in Abhängigkeit von der Betoniergeschwindigkeit, Versuchsreihe I, für unterschiedliche Betonierhöhen

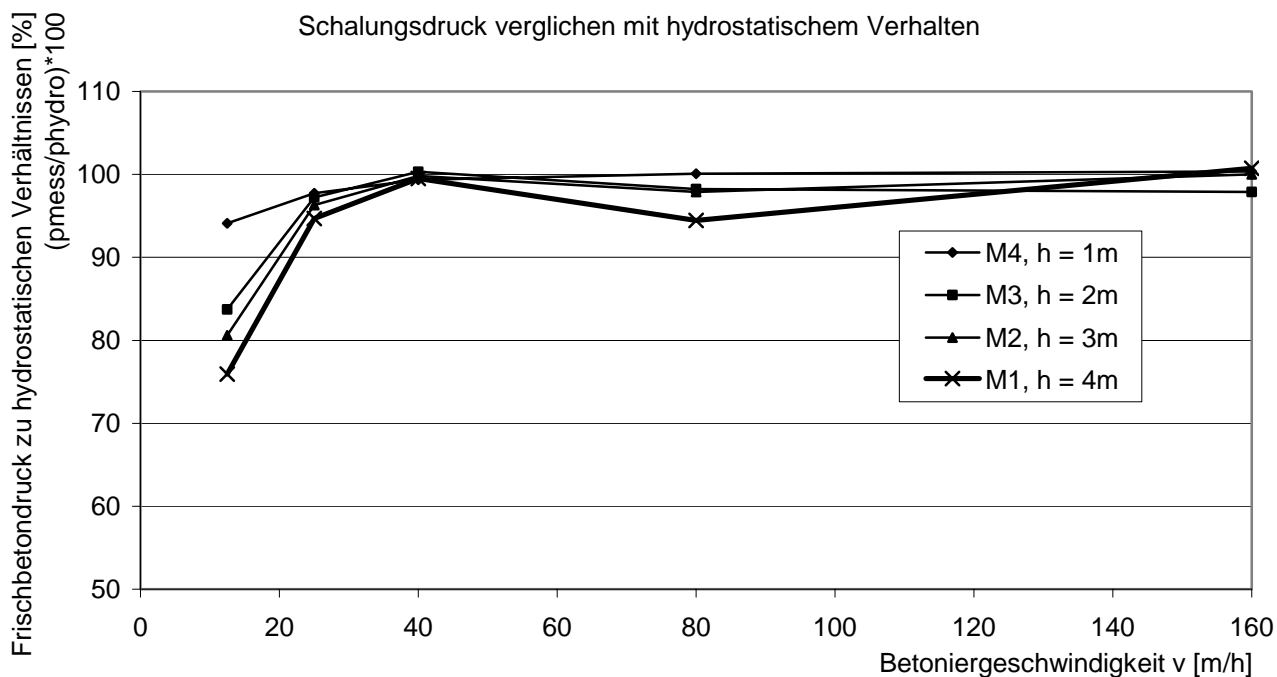


Bild 4.4: Prozentualer Vergleich des gemessenen Schalungsdrucks mit hydrostatischem Verhalten, für unterschiedliche Betonierhöhen, an den Messpunkten M1 bis M4, Versuchsreihe I

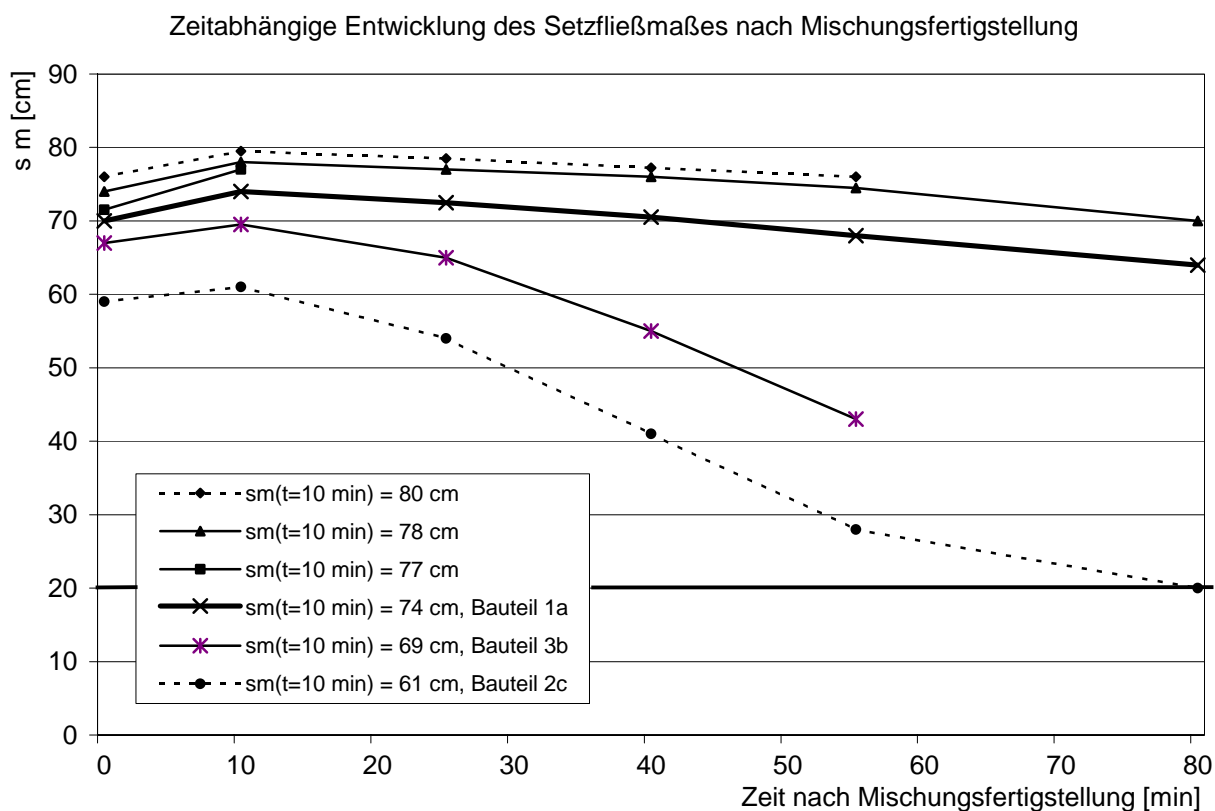


Bild 4.5: Untersuchung der zeitabhängigen Entwicklung des Setzfließmaßes bei einer Frischbetontemperatur von ca. 19°C (3 min Mischdauer)

Aus Bild 4.5 wird die zeitabhängige Entwicklung des Setzfließmaßes (und damit der Fließgrenze) ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass nach dem Mischungsende eine geringe Nachverflüssigung stattfindet. Nach dem Betonierbeginn (13 min nach Mischungsbeginn) ist der Verlust an Verarbeitungsfähigkeit (kleiner werdendes Setzfließmaß) deutlich zu erkennen. Dieser ist bei geringen anfänglichen Setzfließmaßen größer als bei hohen Setzfließmaßen.

Der an der Stütze 1a gemessene Druckverlauf kann mit dem Ansatz nach Jansen /22/ rechnerisch beschrieben werden. Der als konstant angenommene Reibbeiwert  $\mu$  wird dabei indirekt ermittelt und ergibt sich zu  $\mu = 0.01$  (Bild 4.6).

Interessant ist nun der rechnerische Druckzustand, welcher sich unter Beibehaltung der kleinsten Querschnittsbreite für eine Wand einstellt (siehe Kapitel 2.2).

Bei einer Betoniergeschwindigkeit von 12.5 m/h und des bei der Stütze gemessenen Schalungsdrucks von ca. 78% der hydrostatischen Werte, errechnet sich der Betondruck an einer Wandschalung zu 88% des hydrostatischen Drucks (Bild 4.6). Dies bedeutet eine erhebliche Druckzunahme im Vergleich zum Stützenquerschnitt.

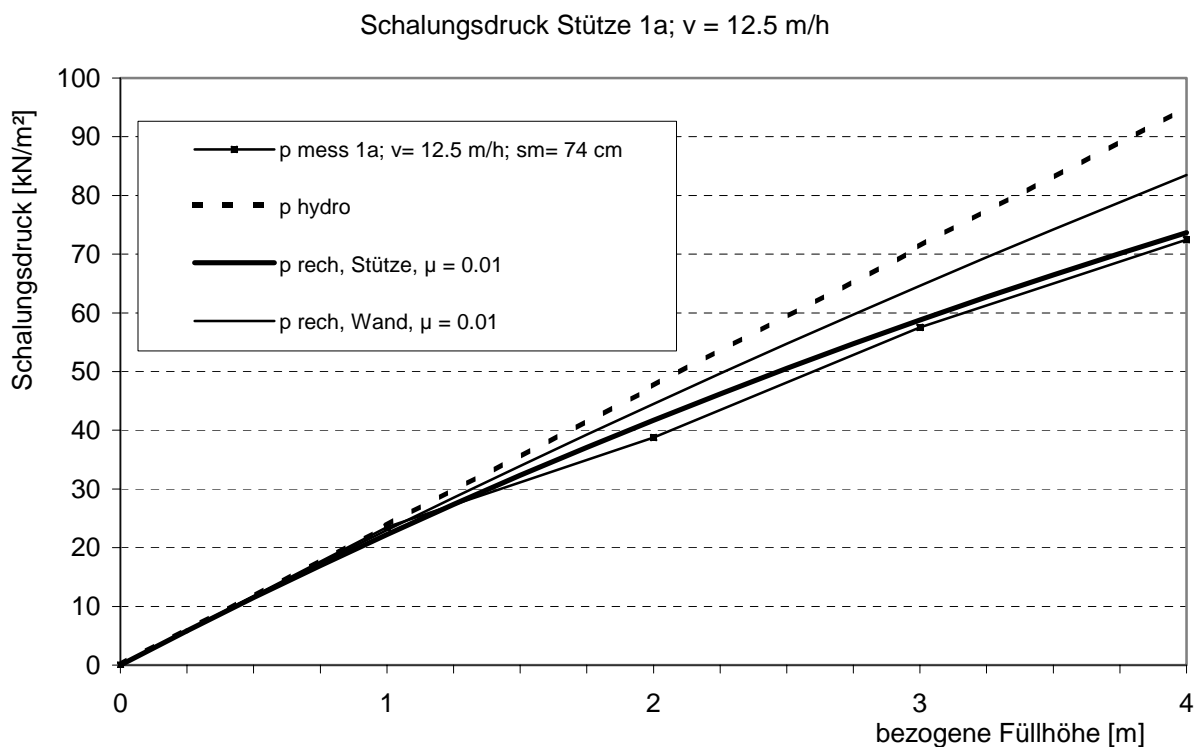


Bild 4.6: Beschreibung gemessenen Schalungsdrucks für die Stütze 1a nach Jansen /22/, und Darstellung des rechnerischen Verlaufs für eine Wand

#### 4.2.2 Versuchsreihe II

Die Versuchskörper in Teil I wurden mit einem weitestgehend konstanten Setzfließmaß von ca. 75 cm hergestellt, wobei schon bei geringer Schwankung der Konsistenz ein gewisser Einfluss auf die Druckverhältnisse in der Schalung zu beobachten war.

Im Teil II wurde bei der Wahl einer einheitlichen Betoniergeschwindigkeit von 25 m/h und einer planmäßigen Verringerung des Setzfließmaßes (sm) von 75.5 cm auf 71 cm sowie 61 cm an allen Messstellen eine starke Verminderung der maximalen Schalungsdrücke festgestellt. Die maximalen Werte verringerten sich bei einer Betonierhöhe von 4 m bei  $sm = 71$  cm um zirka 40 Prozent, bei  $sm = 61$  cm sogar um annähernd 60 Prozent (Bild 4.7). Damit konnte ein in dieser Höhe unerwarteter Einfluss des Fließvermögens auf den Schalungsdruck nachgewiesen werden. Ebenfalls reduzierte sich der Schalungsdruck bei den Betonierhöhen 2 m und 3 m teilweise erheblich. Allein bei 1 m Betonierfortschritt wurde annähernd hydrostatisches Druckverhalten beobachtet (Bild 4.10).

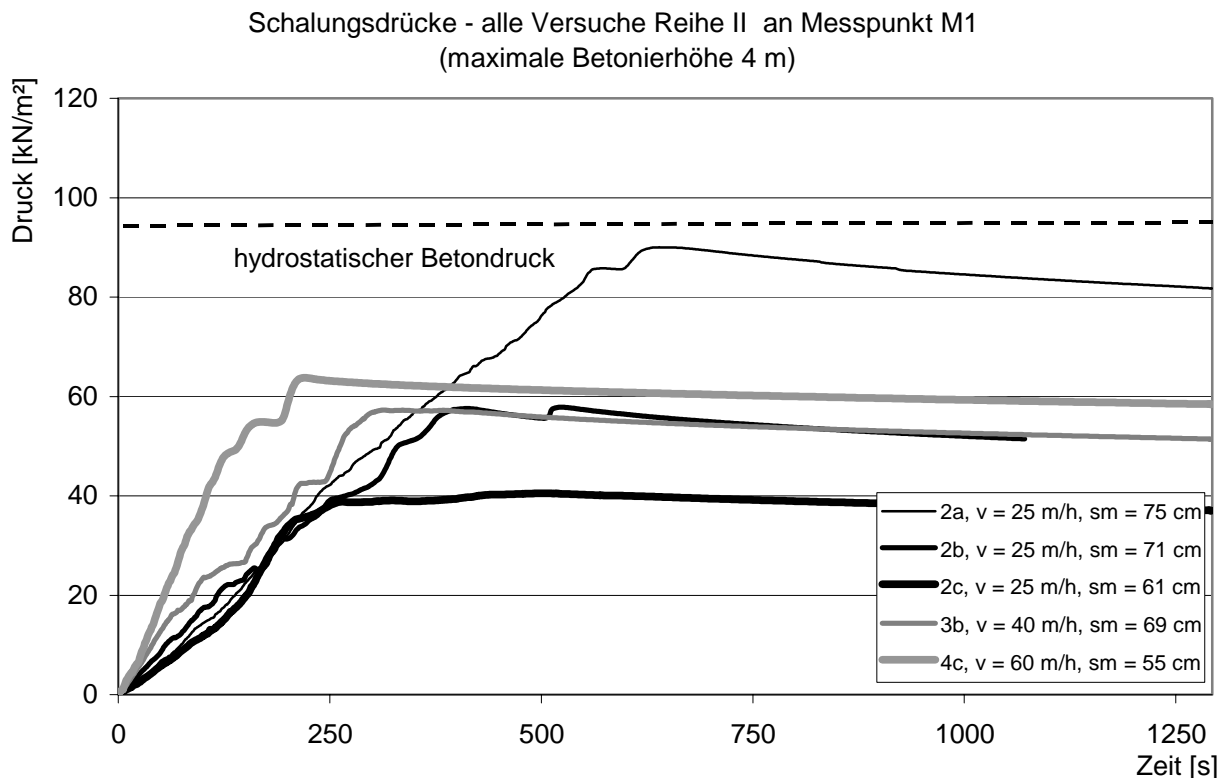


Bild 4.7: Von der Messdose M1 aufgenommene Kräfte, auf den Schalungsdruck umgerechnet, über die Zeit  $t_{\text{mess}} = 25$  min, Versuchsreihe II

Bei genauer Analyse der Messwerte am Bauteil mit den geringsten Druckwerten (Stütze 2c) ist zu erkennen, dass der Schalungsdruck schon bei einer Betonierhöhe von ca. 2 m seinen Maximalwert erreicht (Bild 4.8 und 4.9). Es kann daraus geschlussfolgert werden, dass sich über die Wandreibung und die entsprechende Bogenbildung eine vollkommene Stützwirkung einstellt, die auch durch eine weitere Auflast nicht mehr aufgehoben werden kann. Dieses Phänomen ist ebenso bei den Bauteilen 2b und 3b ( $sm$  ca. 70 cm) zu beobachten, wobei hier die komplette Stabilisierung erst ab 3 m Druckhöhe erfolgt.

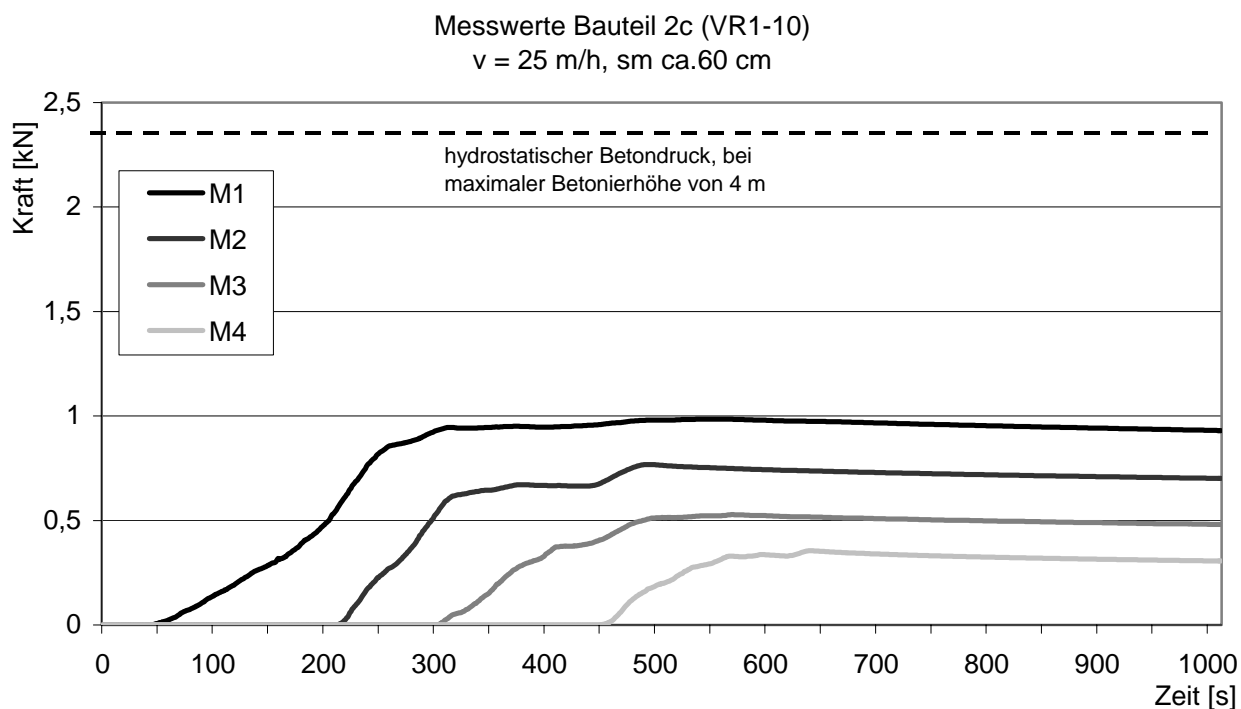


Bild 4.8: Von den Messdose M1-M4 aufgenommene Kräfte über die Zeit  $t_{\text{mess}} = 20 \text{ min}$ , an der Stütze 2c,  $v = 25.0 \text{ m/h}$ ,  $sm = 61 \text{ cm}$

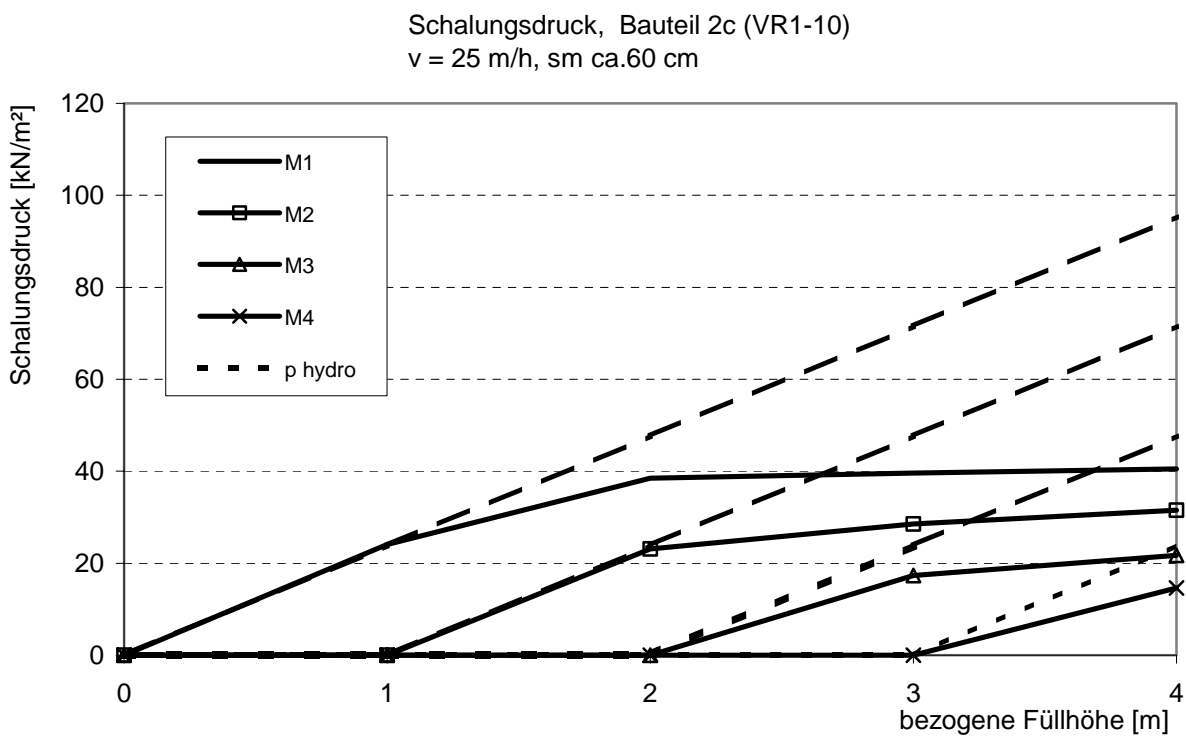


Bild 4.9: Schalungsdrücke an den Messstellen M1-M4 bezogen auf die Füllhöhe, an der Stütze 2c,  $v = 25.0 \text{ m/h}$ ,  $sm = 61 \text{ cm}$

Der Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf den Schalungsdruck bei niedrigem Setzfließmaß wird bei der Betrachtung der Versuchsstützen 3b und 4c deutlich. Bei einer weiteren Absenkung des Ausbreitmaßes einerseits sowie einer deutlichen Geschwindigkeitserhöhung andererseits blieb der maximale Schalungsdruck im Vergleich zur Ausgangsstütze 2b konstant (Bild 4.7 und 4.10). Hierbei ist zu beachten, dass im Vergleich zur Stütze 2c eine Verdopplung der Betoniergeschwindigkeit (von 25 auf ca. 50 m/h) bei annähernden Konsistenzbedingungen bei der Stütze 4c eine maximale Druckzunahme um etwa 50% bewirkte (Bild 4.7).

Wie schon erwähnt, wurden an der Stütze 4c ( $s_m = 55$  cm, und  $v = 60$  m/h) im Vergleich zu 2b und 3b annähernd gleiche Maximalwerte festgestellt. Der Druckaufbau in Abhängigkeit vom Betonierfortschritt zeigt jedoch interessante Abweichungen (Bild 4.10). Die Druckzunahme infolge des niedrigen Setzfließmaßes erfolgt bei Versuch 4c anfangs vergleichsweise langsam. Aufgrund der hohen Betoniergeschwindigkeit tritt im Versuchsverlauf jedoch keine Stabilisierung des Betons in der Schalung auf. Damit wird ein kontinuierlicher Druckanstieg bis zum Erreichen der maximalen Betonierhöhe und am Ende ein etwas höheres Druckpotential, als bei den Versuchen 2b und 3b festgestellt, bewirkt.

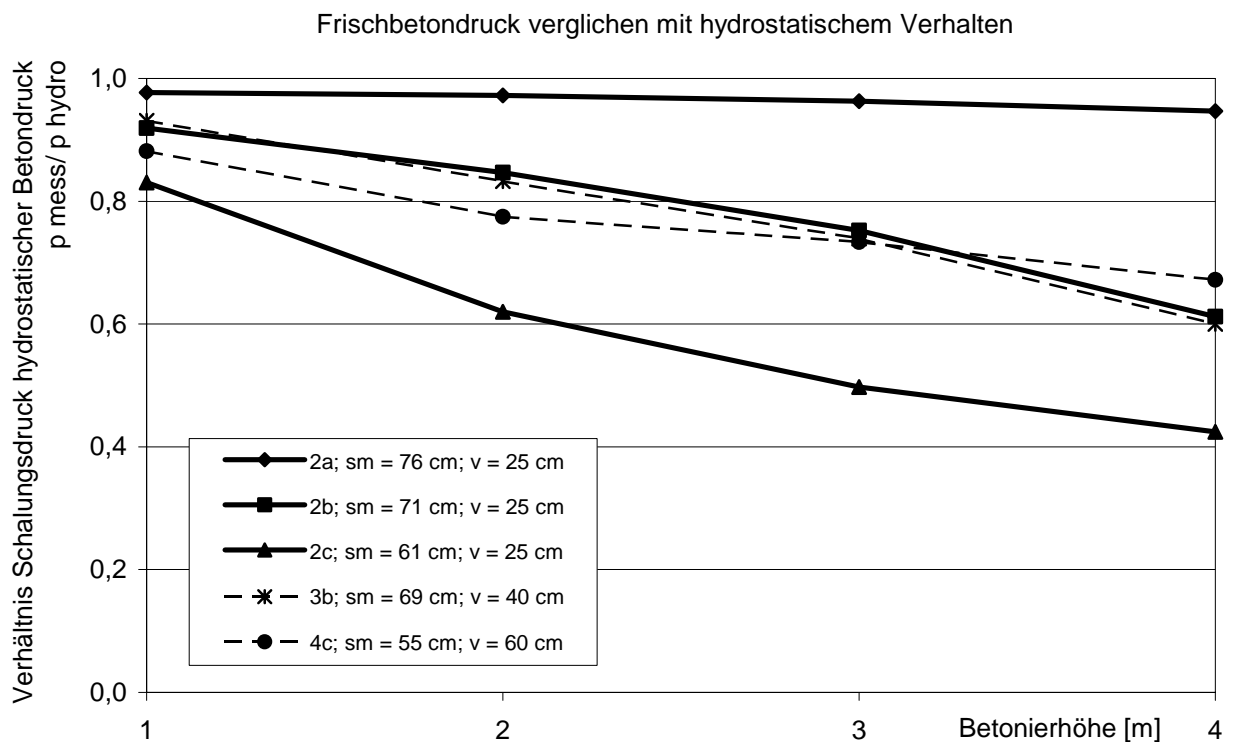


Bild 4.10: Verhältnis des festgestellten Frischbetondrucks mit dem hydrostatischen Betondruck, für unterschiedliche Betonierhöhen, Versuchsreihe II



Eine numerische Auswertung der Druckverläufe für die gewählte Mischung kann mit dem Lastansatz nach Jansen /22/ bzw. nach E DIN 1055 T6 /24/ erfolgen. Die dafür erforderlichen Wandreibungskoeffizienten müssten für den vorliegenden Beton und die Schalungsoberfläche bestimmt werden. Da dies nicht Teil des Versuchsprogramms war, werden für eine überschlägige Berechnung in erster Näherung die erforderlichen Angaben aus den Versuchen von Vanhove /14/ entnommen. Dabei muss beachtet werden, dass die unterschiedlichen Rauigkeiten der Schalungsoberfläche die übertragbaren Schubkräfte beeinflussen (Tabelle 4.2). Bei den Versuchen von Vanhove wurde mit einem Setzfließmaß von 70 cm gearbeitet und eine Betoniergeschwindigkeit von 25 m/h erreicht. Dies entspricht den Bedingungen der Stütze 2b ( $v = 25 \text{ m/h}$ ,  $s_m = 70 \text{ cm}$ ).

Tabelle 4.2: Vergleich der Rauigkeiten der gewählten Schalung mit den Werten aus /14/

	phenolbeschichtete Holzschalung	Stahlschalung /14/
Rauhtiefe $R_t$ :	13.5 $\mu\text{m}$	2.3 $\mu\text{m}$
Arithmetischer Mittenrauhwert $R_a$ :	0.68 $\mu\text{m}$	0.3 $\mu\text{m}$

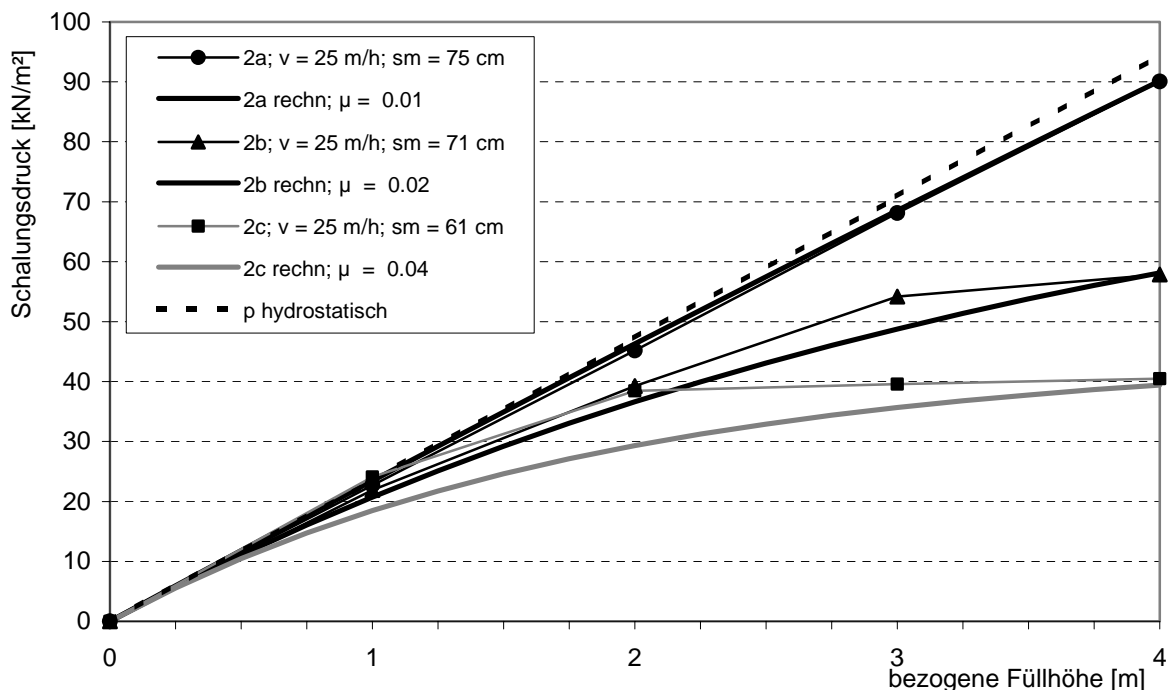


Bild 4.11: Beschreibung der Druckverläufe mit dem Ansatz nach Jansen /22/ und den Reibbeiwerten nach Vanhove /14/

Zu erkennen ist die recht gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit den Rechenwerten. Vor allem bei der Stütze 2b kann der Ansatz des dynamischen Reibbeiwertes von  $\mu = 0.02$  (aus Vanhove /14/) trotz der Rauigkeitsunterschiede als gute Näherung angesehen werden. Im Unterschied zu Vanhove /14/ war bei dem vorliegenden Bauteil kein Korrekturfaktor zur Berücksichtigung von dynamischen Einwirkungen notwendig. Die Abweichungen bei den Betonierhöhen 1m bis 3m sind mit dem thixotropen Verhalten, sowie den dynamischen Einflüssen aus dem Einfüllvorgang zu erklären. Die Einführung eines Korrekturfaktors  $C_d$  könnte eine besser Angleichung an die Messergebnisse ermöglichen. Auf den Einfluss der Bewehrung auf die effektive Reibung wird in Abschnitt 4.2.3 eingegangen.

Die nachfolgenden Betrachtungen ermöglichen einen überschlägigen Vergleich der Versuchsergebnisse mit den normativen Festlegungen zum Fließbeton (mit Innenvibration) nach DIN 18218.

Die DIN 18218 schreibt für Fließbeton bei einer Betoniergeschwindigkeit von 25m/h den Ansatz eines hydrostatischen Druckverlaufs bis zu einer Betonierhöhe von rund 18.0 m (Betonierzeit 45 min) vor (Kapitel 2.2.2).

Für die gewählte SVB- Mischung ergibt sich bei einer Betonierzeit von ca. 45 min und einem Setzfließmaß bei Betonierbeginn von 75 cm ein mittleres Setzfließmaß bei Betonierende (infolge Ansteifen des Betons) von ca. 71 cm und damit ein  $\mu_{\text{rech}}$  von ca. 0.018, vergleiche Bild 4.5. Nach Gl. 2.3 errechnet sich bei dem vorhandenen Querschnitt mit  $z = 18\text{m}$  der maximale Schalungsdruck zu ca. 100 kN/m<sup>2</sup> (entspricht ca. 4 m Betondruck). Der rechnerische maximale Schalungsdruck wird aufgrund zunehmender Wandreibung infolge des Ansteifens des Betons jedoch nicht bei der maximalen Füllhöhe, sondern bei einer Betonierhöhe von  $z$  ca. 8 m erreicht. Zu diesem Zeitpunkt beträgt das Setzfließmaß noch ca. 73.5 cm ( $\mu_{\text{rech}}$  ca. 0.006). Damit ergibt sich  $p_{\text{max}}$  zu ca. 140 kN/m<sup>2</sup> (entspricht ca. 6 m Betondruck).

Die normativen Werte für Fließbeton liegen damit bei den gewählten Randbedingungen weit auf der sicheren Seite. Bei größeren Querschnittsabmessungen vergrößern sich die Schalungsdrücke jedoch wesentlich, womit die Ansätze nach DIN 18218 für Fließbeton sinnvoll, und für SVB nicht mehr anwendbar sind.

Es ist weiterhin zu beachten, dass den oben angeführten Berechnungen die Annahme der Verwendung lediglich einer MischungschARGE für das gesamte Bauteil zu Grunde lag.

### 4.2.3 Versuchsreihe III

Bei der Betrachtung der erreichten Schalungsdrücke (Bild 4.12 und 4.13) ist festzustellen, dass sich die Schalungsdrücke durch den Wegfall der Bewehrung an allen Messpunkten erhöhen (Tabelle 4.3).

Tabelle 4.3: prozentualer Schalungsdruck bezogen auf den hydrostatischen Druckverlauf

Betonierhöhe [m]	Schalungsdruck bezogen auf den hydrostatischen Druckverlauf, in [%], v = 25 m/h, sm = 71cm	
	Stütze 2b* (unbewehrt)	Stütze 2b (bewehrt)
1	98.11	91.92
2	96.08	84.69
2	89.00	75.23
4	75.46	61.21

Die maximale Druckdifferenz von ca. 15 % wurde bei einer Betonierhöhe von 4 m festgestellt. Dies bedeutet, dass bei Annahme eines Horizontallastverhältnisses von  $\sigma_H / \sigma_V = 1$  und einer gleichmäßigen Wandreibung in beiden Versuchskörpern, die Schalung ca. 25 % und die Bewehrung ca. 15 % der vertikalen Last über Reibung aufnimmt. Dies entspricht einem absoluten Vertikallasteintrag über Reibung an Schalung und Bewehrung von

$$b \cdot d \cdot h \cdot \gamma_b \cdot \% / 100 = 0.3 \cdot 0.3 \cdot 4.0 \cdot 23.63 \cdot 0.2454 = 2.09 \text{ kN} \text{ für die Schalung und } 1,21 \text{ kN} \text{ für die Bewehrung.}$$

Schalungsdrücke - alle Versuche Reihe III an Messpunkt M1

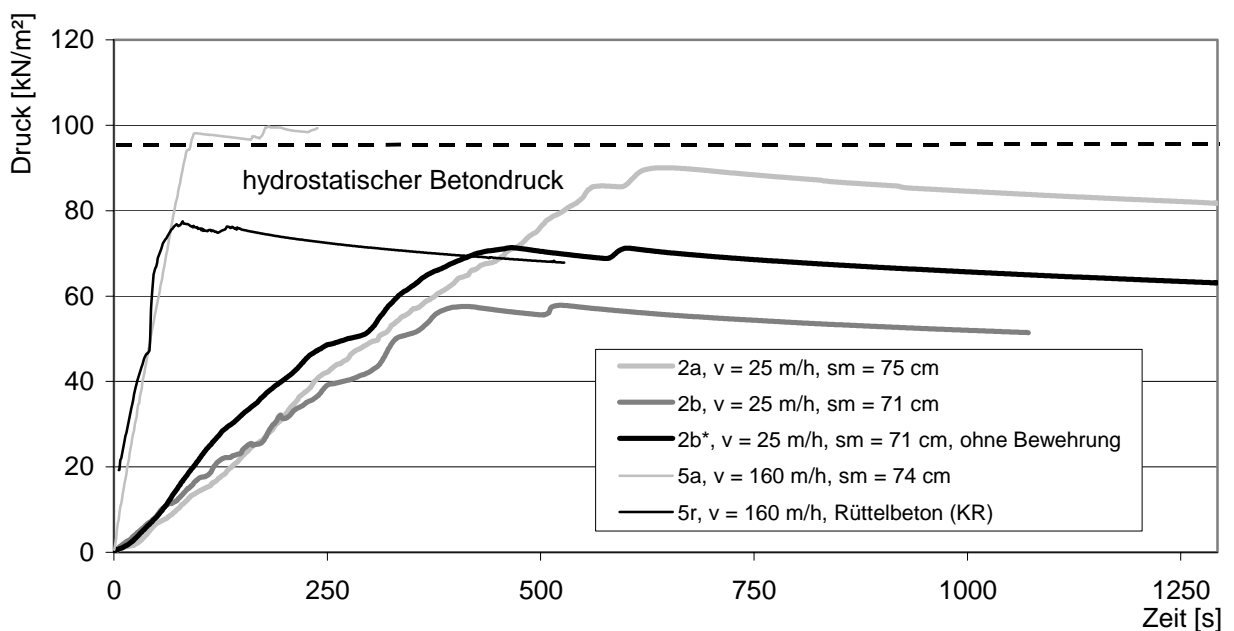


Bild 4.12: Von der Messdose M1 aufgenommene Kräfte, auf den Schalungsdruck umgerechnet, über die Zeit  $t_{\text{mess}} = 25 \text{ min}$ , Versuchsreihe III

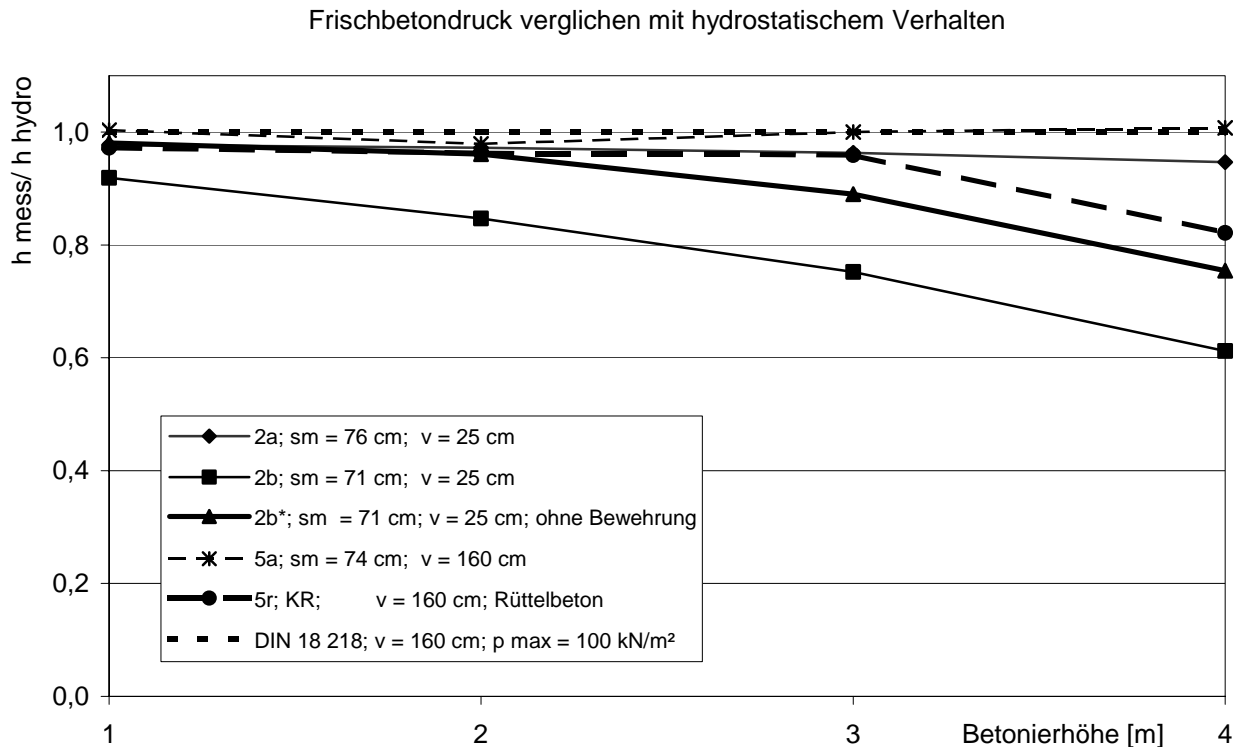


Bild 4.13: Verhältnis des festgestellten Frischbetondrucks mit dem hydrostatischen Betondruck für unterschiedliche Betonierhöhen, Versuchsreihe III

Die rechnerische Beschreibung des Druckverlaufs an Messpunkt M1 erfolgt mit Hilfe der Differenzialgleichung nach Jansen /22/, wobei der Wandreibungskoeffizient  $\mu$  abgeschätzt wird. Bei einer maximalen Betonierhöhe von 4 m ergibt sich bei Versuch 2b\* ein Reibbeiwert  $\mu$  von 0.011, (Bild 4.14). Für die weiteren Füllhöhen sowie für die bewehrte Stütze 2b sind die rechnerischen Reibungskoeffizienten in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Tabelle 4.4: rechnerischer Wandreibungskoeffizienten für die Stützen 2b\* und 2b

Betonierhöhe [m]	rechnerischer Reibungskoeffizient Stütze 2b*, unbewehrt [ $\mu$ ]	rechnerischer Reibungskoeffizient Stütze 2b, bewehrt [ $\mu$ ]
1.0	0.00	0.011
2.0	0.001	0.013
3.0	0.004	0.013
4.0	0.011	0.018

Dabei wird ein konstanter Reibungsbeiwert  $\mu$  über die Schalungshöhe vorausgesetzt. Zu erkennen ist die kontinuierliche Erhöhung von  $\mu$  über die Betonierdauer bzw. Betonierhöhe. Bei geringen Betonierhöhen verhält sich der Beton annähernd wie eine Flüssigkeit. Aufgrund der thixotropen Eigenschaften sowie der dynamischen Wirkung des Einfüllens stellt sich der angegebene rechnerische Winkel der inneren Reibung und damit der Wandreibungswinkel ein. Im weiteren Verlauf stabilisiert sich die Mischung, das Ansteifen setzt sich fort und der

dynamische Einfluss des Einfüllprozesses wird geringer. Es erfolgt eine kontinuierliche Vergrößerung des Reibbeiwertes  $\mu$  (Bild 4.14).

Der von Vanhove /14/ festgestellte Einfluss der Höhe des Betondrucks auf den Wandreibungsbeiwert (kleineres  $\mu$  bei größeren Betondrücken) wirkt sich nicht entscheidend auf die Ergebnisse aus.

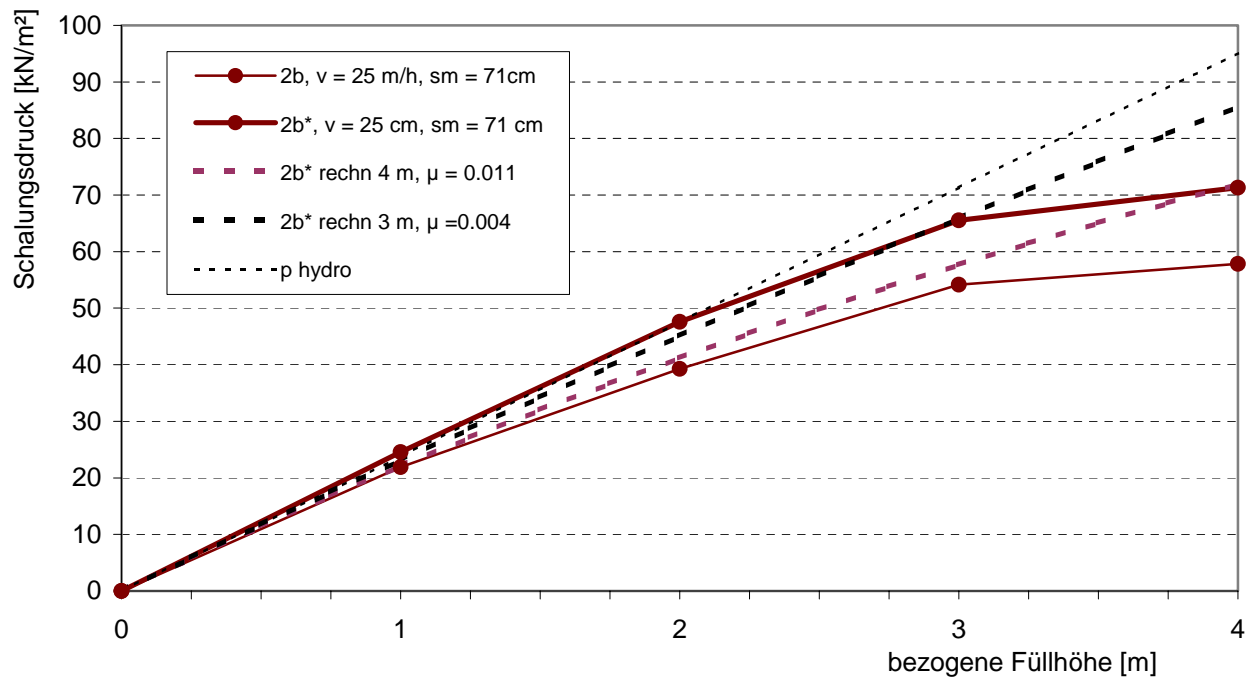


Bild 4.14: indirekte Ermittlung des Reibbeiwertes  $\mu$

Bei der Rüttelbetonstütze 5r ergaben sich bis zu einer Betonierhöhe von 3 m annähernd hydrostatische Drücke. Lediglich 82 Prozent des hydrostatischen Betondrucks wurden bei der maximalen Betonierhöhe von 4 m festgestellt (Bild 4.13).

Nach DIN 18218 sind für den vorliegenden Beton unter Annahme der Konsistenzklasse KR bei einer Betoniergeschwindigkeit von 160 m/h bis zu einer Betonierhöhe von ca. 80 m hydrostatische Werte anzusetzen. Damit liegt die Norm bei den gewählten Querschnittsabmessungen von 30/30 cm weit auf der sicheren Seite. Nach CIRIA- Report 108 ergibt sich dagegen ab 19 m Betonierhöhe eine Abweichung vom hydrostatischen Druck, wobei die Annahmen immer noch weit auf der sicheren Seite liegen.

### 4.3 Ausführungsqualität

#### 4.3.1 Versuchsreihe I

Bezüglich der Ausführungsqualität wurden folgende Untersuchungen vorgenommen:

- optische Begutachtung der Oberflächenqualität der Stützen
- Vergleich der Druckfestigkeiten von Probewürfeln und Bohrkernen
- Vergleich der Rohdichten der Bohrkern
- Bestimmung des Gehalts an offenen Poren (Vakuüm-Wasseraufnahme) an den Bohrkernen

#### **optische Begutachtung:**

Insgesamt ist festzustellen, dass die unterschiedlichen Betoniergeschwindigkeiten nur begrenzten Einfluss auf die Oberflächenqualität der hergestellten Bauteile hatten (Bild 4.16). Bei allen Bauteilen waren bei der Verwendung einer glatten und dichten Schalhaut an der Oberfläche Maximalporen mit einem Durchmesser von 3 bis 9 mm zu erkennen (Bild 4.17). Dabei korrelierte die Größe und Häufigkeit des Auftretens lediglich mit der Höhe des Setzließmaßes, kaum jedoch mit der Betoniergeschwindigkeit (Tabelle 4.4).



Bild 4.15: Stütze 5a, betoniert mit einer Geschwindigkeit von 160 m/h

Bild 4.16: Stützen 5a, 4a, 2b, 3a von oben nach unten

Eine signifikante Abweichung wurde lediglich bei der höchsten Füllgeschwindigkeit (160 m/h) beobachtet. Hier hatten vereinzelte Fehlstellen eine maximale Ausdehnung von 16 mm und lagen damit deutlich über den sonstigen Werten.

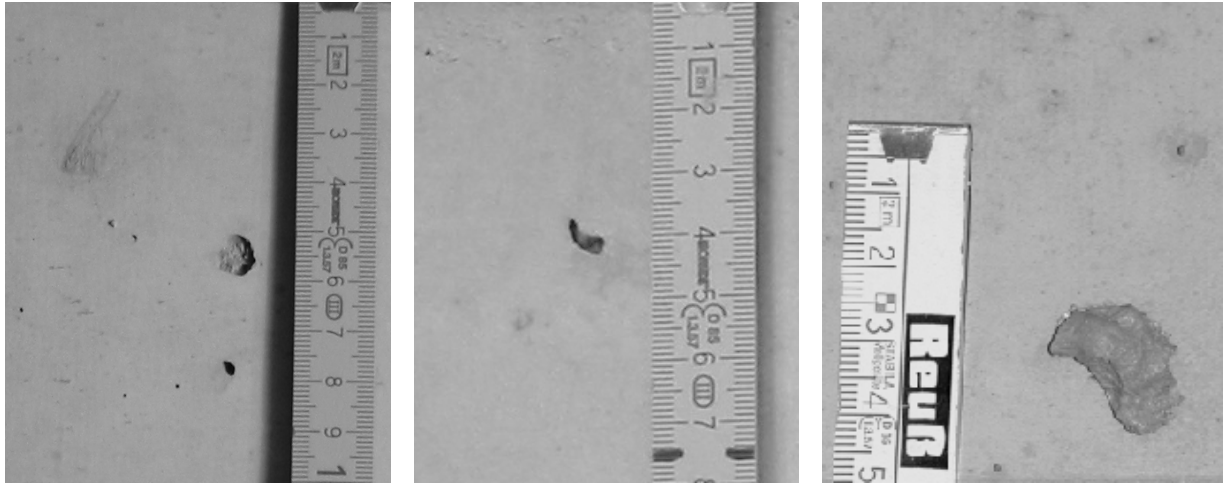


Bild 4.17: größte Oberflächenporen bei nichtsaugender Schalung, Versuchsreihe I, für Stützen 1a ( $v = 12.5$  m/h), 3a ( $v = 40.0$  m/h), 5a ( $v = 160.0$  m/h) v.l.n.r.

Tabelle 4.4: maximale Ausdehnung der Oberflächenporen bei nichtsaugender Schalung

Stütze	Betoniergeschwindigkeit [m/h]	Setzfließmaß [cm]	maximale Oberflächen- porenausdehnung [mm]
1a	12.5	73.5	8
2a	25.0	75.5	3
3a	40.0	75	5
4a	80.0	73.5	9
5a	160.0	74	16

Eine optisch sehr porenarme Oberfläche mit Poren von maximal 1 mm Durchmesser wurde an den selben Bauteilen unter Verwendung einer rauen und saugfähigen Schalungswand erreicht. Wasser und Lufteinschlüsse wurden von der Schalung aufgesaugt (Bild 4.18).

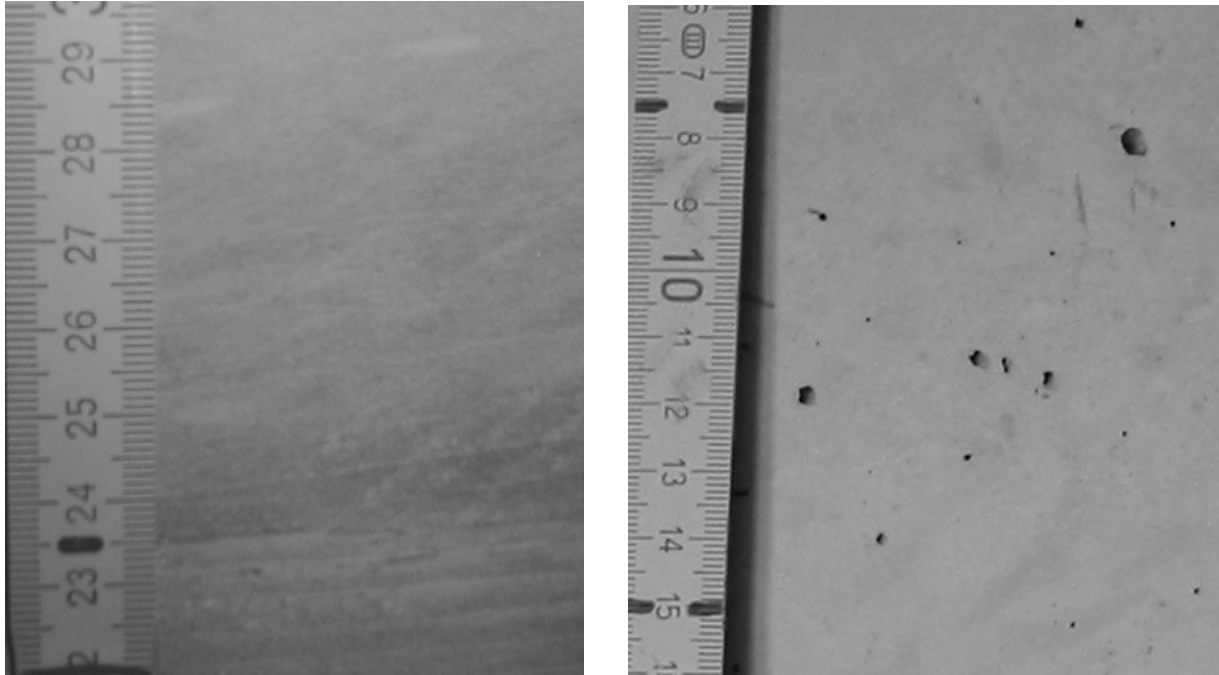


Bild 4.18: Betonoberflächen bei Verwendung einer rauhen und saugenden Schalung (links) und einer glatten und dichten Schalung (rechts), an Stütze 4a

Bei Stütze 2a erfolgte die beste Entlüftung. Infolge des hohen Setzfließmaßes (niedrige Fließgrenze) wurde einerseits ein übermäßiger Lufteinschluss beim Mischen und Einbringen verhindert und andererseits die Entlüftung in der Schalung begünstigt. Ein wesentlicher Nachteil ist die Neigung zum Entmischen, dies wurde an diesem Bauteil im unteren Stützenbereich (Bild 4.19) deutlich sichtbar. Eine Absinken der Gesteinskörnungen in der Schalung erfolgte jedoch nicht.



Bild 4.19 (links): Entmischungen am Stützenfuß bei Stütze 2a

Bild 4.20 (rechts): seltene Fehlstelle infolge unzureichender Entlüftung (Bohrkern  $h = 10$  cm, Stütze 3a, mitte)



Die teilweise starken Entmischungen im unteren Stützenbereich erklären sich mit der Einfülltechnik. Der Beton wurde aus 4 Metern Höhe mittig eingebracht. Aufgrund der geringen Bauteilabmessungen und des langen Fallweges kam er mit der relativ dichten Bewehrung in Berührung. Die Sand- und Leimanteile blieben an der Bewehrung kleben, während die groben Gesteinskörnungen den Schalungsboden erreichten. Durch die angeordneten Sichtfenster konnten die Betoniervorgänge und der geschilderte Sachverhalt unmittelbar verfolgt werden. Es war weiterhin zu beobachten, dass der Beton beim Steigprozess die gesamte Bewehrung umschloss, und dabei nicht blockierte. Die Betonoberfläche wirkte porenarm und homogen. Ein Aufsteigen und Entweichen von Luft war in keinem Fall unmittelbar zu beobachten. Beim Ausschalen nach 24 Stunden zeigten sich jedoch auch an den Stellen der Sichtfenster größere Lunker, was auf eine Bewegung und Sammlung von Lufteinschlüssen in der Schalung und an deren Oberfläche hinweist. Eine verstärkte Konzentration von Fehlstellen trat im Bereich zwischen 3 m und 4 m von Oberkante Stütze auf. Dies ist mit der Fallhöhe und dem Auftriebsweg der Lufteinschlüsse an der Schalungswand zu begründen.

### Druckfestigkeit

Die festgestellten Druckfestigkeiten sind numerisch in Tabelle 4.5 und graphisch in Bild 4.21 dargestellt. Die Bohrkerne wurden im Abstand von 50 cm (oben), 200 cm (mitte) und 400 cm (unten) von Schalungsoberkante entnommen. Aus jeweils 3 Würfeln wurde die mittlere Betondruckfestigkeit ermittelt. Die Druckfestigkeit entspricht der Vergleichsfestigkeit eines Würfels mit 200 mm Kantenlänge ( $f_{c,cube,W200}$ ).

Alle Druckfestigkeiten der Bohrkerne liegen im Vergleich zu den gesondert hergestellten Probekörpern (Würfel) zwischen den Festigkeiten der Luft- und Wasserlagerung, und damit im akzeptablen Bereich. Bei der Stütze 3a handelt es sich um einen Ausreißer. Demnach ist also keine signifikante Korrelation zwischen Betoniergeschwindigkeit und Druckfestigkeit zu erkennen. Selbst bei einer Betoniergeschwindigkeit von 160 m/h wurden vergleichsweise hohe Festigkeiten erzielt, wobei hier der geringere w/z-Wert günstig wirkt.

Tabelle 4.5: 56 Tage-Druckfestigkeiten, Würfel (15 cm) und Bohrkerne ( $\varnothing$  10 cm), bezogen auf Würfel 20 cm

Stütze	$v_{bet}$ [m/h]	äquivalenter w/z – Wert $\frac{m_W}{m_Z + 0.4 \cdot m_{SFA}}$	mittlere Würfeldruckfestigkeit <sup>1</sup> 56 Tage / $f_{c,cube,W200}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zylinderdruckfestigkeit Bohrkerne 56 Tage / $f_{c,cyl,W200}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		
				unten	mitte	oben
1a	12.5	0.52	85.6 (79.1)	85.0	80.0	80.9
2a	25.0	0.51	88.7 (82.0)	87.4	84.8	79.8
3a	40.0	0.50	84.1 (77.7)	75.0	72.9	72.9
4a	80.0	0.51	81.0 (74.8)	84.0	78.6	77.4
5a	160.0	0.48	84.3 (77.9)	84.0	82.0	79.2

<sup>1)</sup> Klammerwerte beziehen sich auf Luftlagerung über kompletten Zeitraum

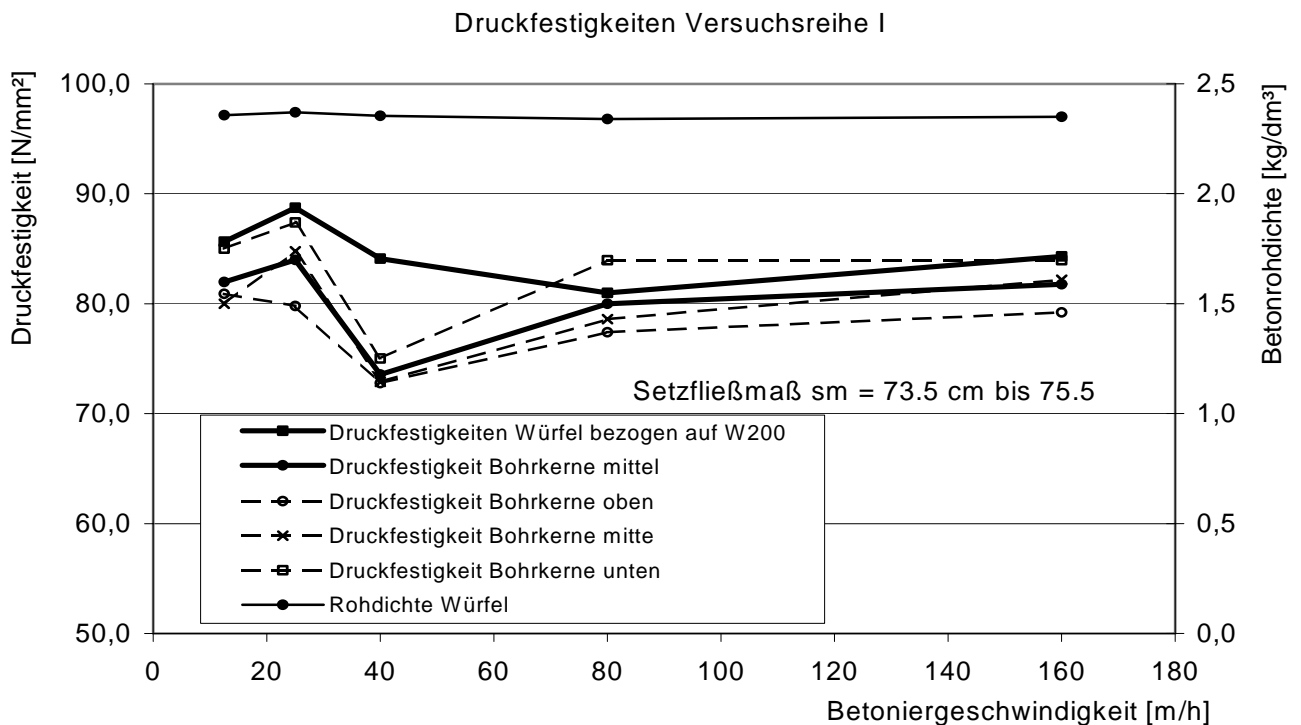


Bild 4.21: 56 Tage-Druckfestigkeiten; Würfel (15 cm) und Bohrkerne (Ø 10 cm), bezogen auf Würfel 20 cm, in Versuchsreihe I

Interessant ist ein Vergleich der Betondruckfestigkeiten über die Stützhöhe. Die Druckfestigkeiten der Bohrkerne scheinen von oben nach unten zuzunehmen.

Eine Erklärung bieten u.a. die Betonrohddichten, welche im Bereich von den hohen Schalungsdrücken größer werden. Die im Frischbeton eingeschlossene Luft wird infolge des zunehmenden Schalungsdrucks komprimiert. Dadurch verringert sich das Luftporenvolumen des Frischbetons. Bei einem hydrostatischen Druckverhalten des Betons beträgt die Druckdifferenz bei einer Betonierhöhe von 4 m ca. 1 bar (100.000 N/m²).

Die Verringerung des Luftporenvolumens allein aus der Druckerhöhung errechnet sich nach der isothermen Zustandsgleichung  $V_a \cdot p_a = V_e \cdot p_e$  mit

$$p_a = 1 \text{ bar} \quad (\text{Luftdruck beim Einbringen des Betons})$$

$$p_e = 2 \text{ bar} \quad (\text{Druckzustand bei einer Betonierhöhe von 4 m}) \text{ zu}$$

$V_e = 0.5 \cdot V_a$  ( $V_e$ - Luftvolumen nach dem Einbringen,  $V_a$ - Luftvolumen bei einer Betonierhöhe von 4m). Dies entspricht einer Volumenreduzierung von 50 %.

Eine weitere Erklärung für die unterschiedlichen Druckfestigkeiten über die Stützhöhe bietet die gesteigerte Homogenität der gesamten Mischung im Bereich großer Betondrücke. Dies bewirkte eine kompaktere Zementsteinmatrix und somit höhere Festigkeiten.

## Porenvolumen

Die Dauerhaftigkeit vom Festbeton gegenüber Umwelteinflüssen hängt maßgebend von der Menge und der Art der im Beton vorhandenen Poren ab.

Der an den Frischbetonproben mittels LP-Topf ermittelte Luftgehalt betrug bei den Betonen mit einem Setzfließmaß von  $s_m = 73.7$  bis  $76$  cm 0.80 bis 1.15 %.

Der mit Hilfe der Vakuum-Wasseraufnahme an den Bohrkernen festgestellte offene Porengehalt umfasst im wesentlichen die Verdichtungsporen, die Luftporen und Kapillarporen im Festbeton. Der Anteil der Kapillar- und Luftporen ist bei allen Proben aufgrund des annähernd gleichen  $w/z$  – Wertes als konstant anzunehmen. Von Interesse ist lediglich die Differenz der Verdichtungsporen, welche eine Aussage über den Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf das Entlüftungsverhalten möglich macht. In Tabelle 4.6 sind die ermittelten Luftporengehalte nach 56- 90 Tagen zusammengestellt. Der Hydratationsgrad nach 56- 90 Tagen beträgt ca. 95%, somit ist eine Vergleichbarkeit gut möglich.

Zu erkennen ist ein gewisser Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf den Verdichtungsporengehalt. Insbesondere bei hohen Betoniergeschwindigkeiten wurde im oberen Stützenbereich auch ein höherer Anteil an Verdichtungsporen festgestellt. Die Differenz von 1- 2 % Luftporengehalt ist jedoch bei der Betrachtung des gesamten Porenvolumens für die Druckfestigkeitseigenschaften nicht signifikant.

Im unteren Stützenbereich konnten keine wesentlichen Abweichungen der Werte festgestellt werden. Durch den starken Druckaufbau während des Betonierens reduzierten sich die eingetragenen Verdichtungsporen um ca. 50 % (siehe oben), so dass nun keine signifikanten Unterschiede (rechnerisch 0.5-1 % Differenz) bei Betrachtung des offenen Porenvolumens festzustellen sind (Tabelle 4.6).

Tabelle 4.6: offene Porosität, ermittelt mit Vakuum- Wasseraufnahme in Vol. %

Stütze	Betoniergeschwindigkeit $v$ [m/h]	Setzfließmaß $s_m$ [cm]	Offene Porosität $\Pi_a$ [%]		
			unten	mitte	oben
1a	12.5	73.5	14.00	14.19	13.42
2a	25.0	75.5	13.94	13.45	14.73
3a	40.0	75	13.41	13.90	14.00
4a	80.0	73.5	14.37	15.46	15.58
5a	160.0	74	14.03	14.63	15.42

Eine Aussage zum Luftporengehalt ist ebenfalls durch einen Vergleich der Festbetonrohddichten möglich, die an den Bohrkernen nach 56 Tagen ermittelt wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.7 dargestellt. Zur besseren Vergleichsmöglichkeit wurden hier die Abweichungen der jeweils festgestellten Frischbetonrohddichten schon berücksichtigt.

Wie bei der Bewertung der Druckfestigkeiten festgestellt liegen bei größerer Betonierhöhe auch tendenziell höheren Dichten vor (Tabelle 4.7).

Eine näherungsweise indirekte Berechnung des absoluten Volumens der Luft- bzw. Verdichtungs-poren kann über die Auswertung der Bohrkerndichten unter Beachtung der gemessenen Schalungsdrücke erfolgen (Tabelle 4.7).

Hierbei wird ein konstanter Luftporeneintrag während des Betoniervorgangs vorausgesetzt ( $V_0 = \text{const.}$ ), sowie die Volumenänderung der Feststoffe vernachlässigt.

Ein Vergleich der sich ergebenden Volumendifferenzen in Tabelle 4.6 und Tabelle 4.7 bestätigt die jeweiligen Ergebnisse.

$$\text{Aus } V_a \cdot p_a = V_e \cdot p_e,$$

$$V_e = V_a - \Delta V \text{ und}$$

$$\Delta V = \frac{\rho_o - \rho_u}{\rho_o}$$

folgt

$$V_a = \frac{\Delta V \cdot p_e}{p_e - p_a} = V_{rechO} \text{ (Luftvolumen beim Ausgangsdruck)} \quad \text{Gl. 4.1}$$

$$V_e = V_a \cdot \frac{p_a}{p_e} = V_{rechU} \text{ (Luftvolumen an der betrachteten Stelle beim Enddruck)} \quad \text{Gl. 4.2}$$

$\Delta V$  – Luftvolumendifferenz abgeleitet aus den Bohrkerndichten oben und unten

$p_a$  - Ausgangsdruck (hier Luftdruck bei 0.5 m Betonierhöhe)

$p_e$  - Druckzustand bei betrachteter Betonierhöhe (hier Luftdruck bei 4 m Betonierhöhe)

$\rho_u$  – Dichte Bohrkerne unten

$\rho_o$  – Dichte Bohrkerne oben

Tabelle 4.7: Dichte der Bohrkerne nach ca. 56 Tagen Luftlagerung, sowie rechnerisches Verdichtungs-porenvolumen

Stütze	Betoniergeschwindigkeit v [m/h]	an den Bohrkerne festgestellte Dichte $\rho_{u,m,o}$ [kg/dm <sup>3</sup> ]			Rechnerisches Verdichtungs-poren- volumen $V_{rechU,O}$ [%]	
		unten	mitte	oben	unten	oben
1a	12.5	2.41	2.40	2.40	0.77	1.19
2a	25.0	2.40	2.39	2.38	1.21	2.05
3a	40.0	2.41	2.38	2.39	1.14	1.97
4a	80.0	2.39	2.38	2.37	1.22	2.06
5a	160.0	2.40	2.38	2.36	2.27	3.96

Insgesamt bewegt sich das Volumen der Verdichtungsporen im üblichen Rahmen für selbstverdichtende Betone, vgl. /15/, wobei im oberen Stützenabschnitt aufgrund des geringen Drucks leicht erhöhte Werte festzustellen sind. Allein bei der höchsten Betoniergeschwindigkeit sind die Werte nicht mehr akzeptabel.

Zusammenfassend ist für die Versuchsreihe I festzustellen, dass der kurze Fließweg im Allgemeinen nicht ausreicht um den SVB bei hohen Betoniergeschwindigkeiten nach dem Einbringen aus bis zu 4 m Höhe, vollständig zu entlüften. Der Aufstieg der eingeschlossenen Luft über längere Strecken ist nur begrenzt möglich und überwiegend von den rheologischen Eigenschaften des jeweiligen SVB und von der Betoniergeschwindigkeit abhängig. Jedoch ermöglichen geringe Betoniergeschwindigkeiten, verbunden mit einem hohen Setzfließmaß und einer Zeit  $t_{500}$  kleiner 3s (geringe Fließgrenze und Viskosität) auch bei geringen Querschnittsabmessungen eine ausreichende Entlüftung und damit eine in allen Belangen zufriedenstellende Ausführungsqualität.

Aufgrund des erhöhten Druckpotentials innerhalb der Schalung kann außerdem das Volumen der eingetragenen Luftporen erheblich reduziert werden.

### 4.3.2 Versuchsreihe II

#### **optische Begutachtung:**

Bei Variation des Setzfließmaßes bei konstanter Betoniergeschwindigkeit konnte eine Korrelation zwischen Setzfließmaß und Oberflächenporen festgestellt werden. Die Anzahl und Größe der Oberflächenporen nahm bei kontinuierlicher Verringerung des Setzfließmaßes (Erhöhung der Viskosität) deutlich zu. Bei einem hohen Setzfließmaß von  $s_m = 75.5$  cm (Stütze 2a) wurde einerseits während des Mischvorgangs weniger Luft eingetragen, andererseits hatten die Luftporen aufgrund einer höheren Auftriebsgeschwindigkeit die Möglichkeit innerhalb der Schalung zu entlüften. Bei einem Fließmaß von 71 cm war dies nur noch begrenzt, bei 61 cm kaum noch möglich.

Interessant war das Ergebnis der Stütze 4c, die bei Wahl des geringsten Fließmaßes  $s_m = 55$  cm und einer relativ hohen Betoniergeschwindigkeit hergestellt wurde. Die maximalen Porendurchmesser betragen lediglich 3 mm, die Oberfläche erschien insgesamt relativ dicht. Eine nähere Betrachtung ergab jedoch, dass viele zunächst nicht direkt sichtbare Poren lediglich mit einer „Haut“ aus Zementleim bedeckt waren, welche bei leichter mechanischer Einwirkung sofort zerfiel. Die Abmessungen dieser versteckten Poren wiesen ebenfalls Durchmesser von bis zu 3 mm auf. Zu erklären sind diese vielen kleinen Verdichtungs-poren mit der hohen Grenzscherspannung und plastischen Viskosität des Betons. Der „SVB“ konnte zwar relativ lunkerfrei in die Schalung eingebracht werden und die Bewehrung umschließen, ein Auftrieb von Luftporen, ein Sammeln und eventuelles Entweichen war jedoch nicht möglich. Diese Feststellungen können durch die Auswertung des Luftporengehaltes bestätigt werden (Tabelle 4.9).

Es ist zu bemerken, dass bei allen Bauteilversuchen (aller Versuchsreihen) direkt nach dem Einfüllen des Betons an den Sichtfenstern weder ein Aufstieg von Luftporen noch statische Lufteinschlüsse mit bloßen Auge auszumachen waren. Erst nach dem Erhärten des Betons zeichneten sich an den Glasfenstern größere Poren als dunkle Punkte auf der helleren Betonoberfläche ab.

Beobachtet wurden bei Setzfließmaßen größer 75 cm Entmischungen im unteren Stützenbereich, bedingt durch Absetzerscheinungen im Einfülltrichter (Mischungszusammensetzung) und infolge der großen Fallhöhe (Einbauverfahren). Schon bei der Frischbetonanalyse waren am Ausbreitkuchen leichte Entmischungen zu beobachten. Es wurden nicht mehr alle Gesteinskörnungen bis an den Rand mitgeführt.

Bei Werten von  $s_m \leq 75$  cm waren keine signifikanten Entmischungen und Sedimentationen zu beobachten. Damit bestätigte sich der in der Zustimmung im Einzelfall festgelegte  $s_m$ -Wert von 74 cm.

## Druckfestigkeit

Die ermittelten Druckfestigkeiten sind numerisch in Tabelle 4.8 und graphisch in Bild 4.22 und Bild 4.23 dargestellt. Die Lage der Bohrkerne entspricht den Angaben aus Versuchsreihe I.

Es ist festzustellen, dass bei Absenkung des Fließmaßes auf bis zu 65 cm alle Druckfestigkeiten der Bohrkerne verglichen mit den in Versuchsreihe I untersuchten Probekörpern annähernd gleiche Werte aufweisen. Erst bei einer Unterschreitung auf  $s_m = 61$  bzw. 55 cm ergeben sich signifikante Minderungen der gewünschten Festigkeiten. Besonders deutlich wird dies bei der Stütze 4c. Der Festigkeitsverlust bei Stütze 2c im oberen Bereich der Stütze ist mit dem Ansteifen der Betons während des Betoniervorgangs und der damit reduzierten Entlüftungsfähigkeit zu erklären.

Die tendenziell höheren Festigkeiten im unteren Bereich der Stützen ergeben sich, wie in Versuchsreihe I ausführlich beschrieben, aus der Verringerung des Verdichtungsporenvolumens aufgrund der Druckzustände innerhalb der Schalung. Beim Vergleich der Festigkeiten von Würfeln und Zylindern ist festzustellen, dass die Werte der Bohrkerne fast ausnahmslos zwischen denen der Luft- und Wasserlagerung liegen. Daraus ist abzuleiten, dass während des Betoniervorgangs, auch aus der großen Betonierhöhe kein unverhältnismäßig hoher Lufteintrag stattfand.

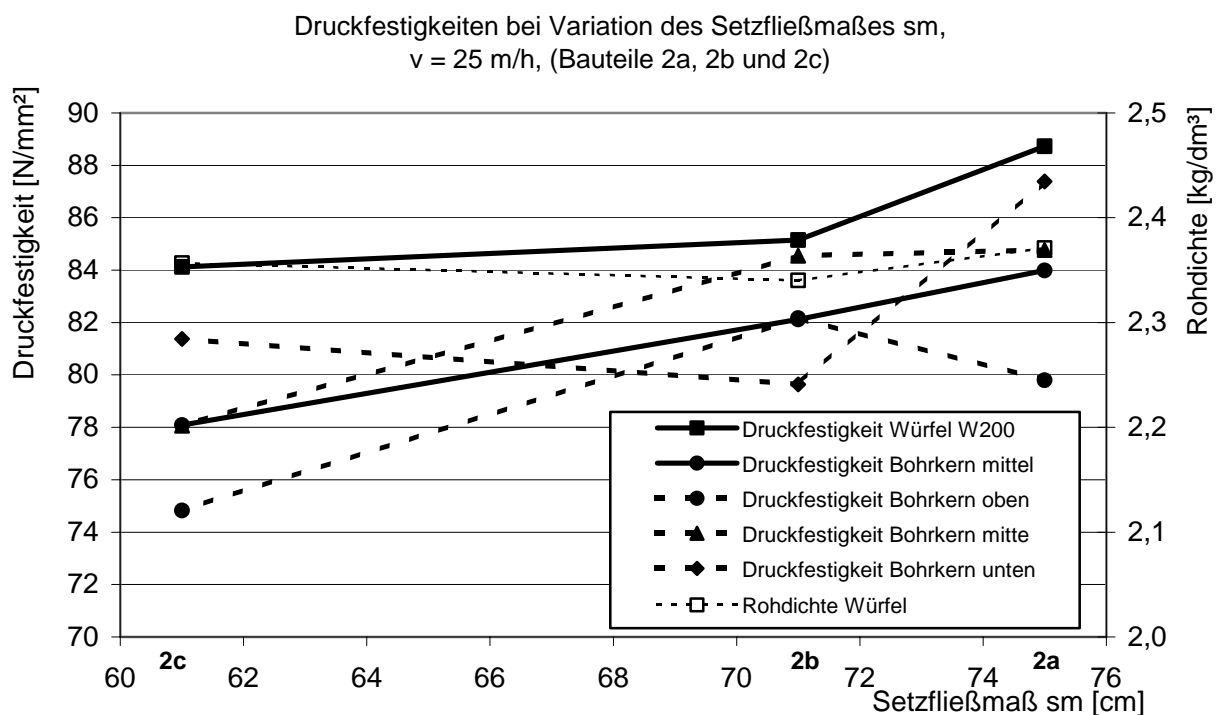


Bild 4.22: 56 Tage-Druckfestigkeiten der Würfel und der Bohrkerne in Abhängigkeit vom Setzfließmaß  $s_m$ , Bauteile 2a (Referenz), 2b und 2c,  $v = 25$  m/h

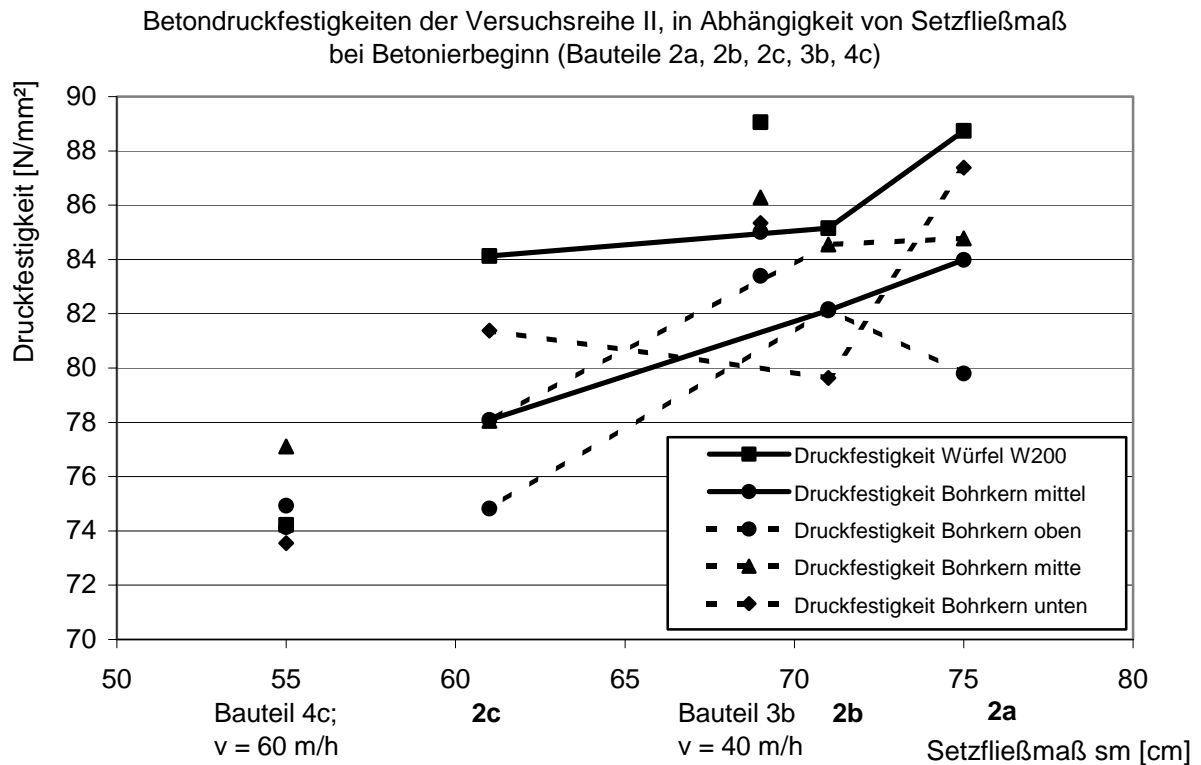


Bild 4.23: 56 Tage-Druckfestigkeiten der Würfel und Bohrkerne der Versuchsreihe II in Abhängigkeit vom Setzfließmaß sm, Bauteile 2a (Referenz), 2b, 2a, 3b und 4c

Tabelle 4.8: 56 Tage-Druckfestigkeiten; Würfel (15 cm) und Bohrkerne (Ø 10 cm), bezogen auf Würfel 20 cm

Stütze	v [m/h]	sm [cm]	äquivalenter w/z – Wert $\frac{m_W}{m_Z + 0.4 \cdot m_{SFA}}$	mittlere Würfeldruckfestigkeit <sup>1</sup> 56 Tage / $f_{c,cube,W200}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zylinderdruckfestigkeit Bohrkerne 56 Tage / $f_{c,cyl,W200}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		
					unten	mitte	oben
2a (Ref.)	25.0	75.5	0.51	88.7 (82.0)	87.4	84.8	79.8
2b	25.0	71.0	0.49	85.1 (78.7)	79.6	84.6	82.2
2c	25.0	61.0	0.49	84.1 (77.7)	81.4	78.1	<b>74.8</b>
3b	40.0	69.0	0.50	89.1 (82.3)	85.3	86.3	83.4
4c	60.0	55.0	0.44	74.2 (68.6)	<b>73.5</b>	<b>77.1</b>	<b>74.1</b>

<sup>1)</sup> Klammerwerte beziehen sich auf Luftlagerung über kompletten Zeitraum



## Porenvolumen

Der an den Frischbetonproben in Versuchsreihe II mittels LP-Topf ermittelte Luftgehalt betrug bei den Betonen mit einem Setzfließmaß von  $s_m = 69.0$  bis  $71.0$  cm 1.5 bis 1.3 %, bei Absinken von  $s_m$  auf 55 cm beachtliche 4.5 %.

In Tabelle 4.9 sind die am Festbeton ermittelten Luftporengehalte nach 56- 90 Tagen zusammengestellt. Zu erkennen ist ein starker Einfluss des Setzfließmaßes auf den Verdichtungs-porengehalt.

Erwartungsgemäß wurden bei kleinen Setzfließmaßen und hier vor allem im oberen Stützenbereich ein höherer Anteil an Verdichtungsporen festgestellt. Die Differenz von 1-2 % Luftporengehalt erscheint jedoch bei der Betrachtung des gesamten offenen Porenvolumens für die Druckfestigkeitseigenschaften nicht signifikant. Dies gilt jedoch nicht für das Bauteil 4c, bei dem die Abweichungen bis zu 3.5 % betragen. Im unteren Stützenbereich traten keine signifikanten Abweichungen der Werte auf. Je nach Druckaufbau während des Betonierens reduzierten sich die eingetragenen Verdichtungsporen um 25-35 %, so dass hier lediglich 0.5-1% Differenz, bei dem Bauteil 4c bis zu 2 %, bei Betrachtung des Gesamtporenvolumens festzustellen sind (Tabelle 4.9).

Tabelle 4.9: offene Porosität, ermittelt mit Vakuum- Wasseraufnahme in Vol. %

Stütze	v [m/h]	Luftporen Frischbeton LP-Topf [%]	Setzfließmaß $s_m$ [cm]	Offene Porosität $\Pi_a$ [%]		
				unten	mitte	oben
2a	25.0	1.0	75.5	13.94	13.45	14.73
<b>2b</b>	<b>25.0</b>	<b>1.3</b>	<b>71.0</b>	<b>13.64</b>	<b>14.23</b>	<b>13.64</b>
<b>2c</b>	<b>25.0</b>	<b>1.8</b>	<b>61.0</b>	<b>14.35</b>	<b>14.69</b>	<b>15.28</b>
3a	40.0	0.8	75.0	13.41	13.90	14.00
<b>3b</b>	<b>40.0</b>	<b>1.4</b>	<b>69.0</b>	<b>13.81</b>	<b>13.94</b>	<b>13.74</b>
<b>4c</b>	<b>60.0</b>	<b>4.5</b>	<b>55.0</b>	<b>15.67</b>	<b>16.64</b>	<b>17.09</b>

Die Ergebnisse, ermittelt durch einen Vergleich der Rohdichten, sind in Tabelle 4.10 dargestellt. Wie schon bei der Bewertung der Druckfestigkeiten festgestellt, liegen bei größerer Betonierhöhe auch tendenziell höhere Dichten vor (Tabelle 4.10).

Die indirekte Berechnung der Luft- bzw. Verdichtungsporen über die Bohrkerndichten (siehe Abschnitt 4.3.1) ist in Tabelle 4.10 zusammengefasst. Die Abweichungen sind aufgrund der Ungenauigkeiten bei den Bohrkerndichten etwas größer als bei der Bestimmung mittels Vakuum-Wasseraufnahme. Es bestätigt sich der bei der Frischbetonuntersuchung und der Vakuum-Wasseraufnahme festgestellte Luftporengehalt bei Stütze 4c. Die hohen rechnerischen Werte bei Stütze 2c resultieren aus dem starken Ansteifen des Betons während des Betoniervorgangs und sind somit nur bedingt aussagekräftig.

Tabelle 4.10: Dichte der Bohrkern nach 56 Tagen Luftlagerung, sowie rechnerisches Verdichtungsporenvolumen

Stütze	v [m/h]	Luftporen Frischbeton LP-Topf [%]	sm [cm]	Dichte Bohrkern $\rho_{u,m,o}$ [kg/dm <sup>3</sup> ]			Verdichtungsporen- volumen $V_{rechU,0}$ [%]	
				unten	mitte	oben	unten	oben
2a	25.0	1.0	75.5	2.41	2.40	2.39	1.21	2.05
<b>2b</b>	<b>25.0</b>	<b>1.3</b>	<b>71.0</b>	<b>2.39</b>	<b>2.37</b>	<b>2.38</b>	<b>2.04</b>	<b>2.88</b>
<b>2c</b>	<b>25.0</b>	<b>1.8</b>	<b>61.0</b>	<b>2.38</b>	<b>2.37</b>	<b>2.34</b>	<b>(6.76)</b>	<b>(8.47)</b>
3a	40.0	0.8	75.0	2.41	2.38	2.39	1.14	1.97
<b>3b</b>	<b>40.0</b>	<b>1.4</b>	<b>69.0</b>	<b>2.39</b>	<b>2.38</b>	<b>2.39</b>	<b>1.04</b>	<b>1.46</b>
<b>4c</b>	<b>60.0</b>	<b>4.5</b>	<b>55.0</b>	<b>2.32</b>	<b>2.29</b>	<b>2.28</b>	<b>3.79</b>	<b>5.54</b>

### 4.3.3 Versuchsreihe III

Die Betonstütze 5r, wurde bei gleicher Mischungszusammensetzung unter Variation des Fließmittels mit der Betonkonsistenz KR bzw. K3 hergestellt. Die Verdichtung erfolgte mit Hilfe von Innenvibratoren, welche beim Betoneinbau kontinuierlich mitgeführt wurden.

Das Bauteil 2b\* wurde lediglich konstruktiv bewehrt. Ansonsten galten die Versuchsbedingungen aus Bauteilversuch 2b.

#### Optische Begutachtung

Bei der **Rüttelbetonstütze 5r** wiesen die Betonoberflächen im unteren und mittleren Bereich keine größeren Poren oder Lunker auf (maximale Ausdehnung 3 mm; Bild 4.24). Im oberen Bereich waren aber infolge unzureichender Verdichtung Fehlstellen mit bis zu 2.3 cm Durchmesser zu verzeichnen. Diese Werten lagen damit weit über denen, die bei den SVB - Stützen gemessen wurden (Bild 4.25).

Am Bauteil 2b\* (nur konstruktiv bewehrt) konnten keine signifikanten Qualitätsunterschiede zur Referenzstütze 2b festgestellt werden.

Allein infolge der Undichtigkeit einer Schalungsfuge traten in einigen Eckbereichen starke Entmischungen auf, was auf Leimabfluss zurückzuführen ist (Bilder 4.26 und 4.27).



Bild 4.24 (links): Betonoberfläche der Rüttelbetonstütze 5r auf halber Stützhöhe

Bild 4.25 (rechts): Betonoberfläche der Rüttelbetonstütze 5r im oberen Stützenbereich

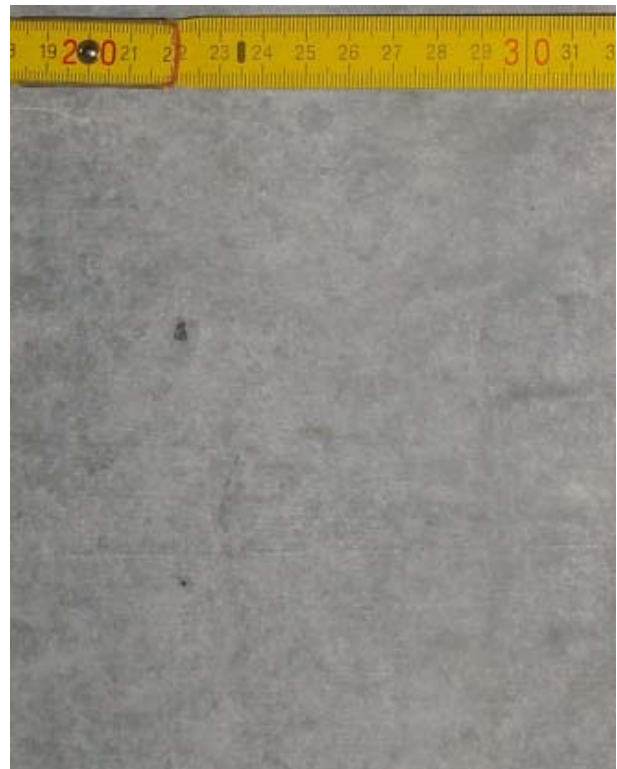


Bild 4.26 (links): Leimabsonderung infolge undichter Schalung bei Stütze 2b\*

Bild 4.27 (rechts): Betonoberfläche der Stütze 2b\* im unteren Stützenbereich

## Druckfestigkeit

Die Festigkeitswerte des Bauteils 5r können Tabelle 4.11 entnommen werden. Zu erkennen sind die starken Festigkeitsunterschiede im Vergleich zur Referenzstütze 5a. Es ist festzustellen, dass bei gleicher Betoniergeschwindigkeit infolge der Selbstentlüftung eine höhere Packungsdichte und Homogenität der Mischung und damit auch eine höhere Druckfestigkeit beim SVB erreicht wurde.

Tabelle 4.11: 56 Tage-Druckfestigkeiten, Würfel (15 cm) und Bohrkerne (Ø 10 cm), bezogen auf Würfel 20 cm

Stütze	v [m/h]	sm bzw. a [cm]	äquivalenter w/z – Wert $\frac{m_w}{m_z + 0.4 \cdot m_{SFA}}$	mittlere Würfeldruckfestigkeit <sup>1)</sup> 56 Tage / $f_{c,cube,W200}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zylinderdruckfestigkeit Bohrkerne 56 Tage / $f_{c,cyl,W200}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		
					unten	mitte	oben
5a (Ref.)	160.0	74.0	0.48	84.30 (77.9)	84.0	82.2	79.2
<b>5r</b>	<b>160.0</b>	<b>47.5</b>	<b>0.49</b>	<b>71.1 (65.7)</b>	<b>78.3</b>	<b>75.3</b>	<b>74.7</b>

<sup>1)</sup> Klammerwerte beziehen sich auf Luftlagerung über kompletten Zeitraum

## Porenvolumen

Der mittels Vakuum-Wasseraufnahme ermittelte Luftgehalt der Stütze 5r sowie der Referenzstütze 5a ist in Tabelle 4.12 dargestellt. Zu erkennen sind Volumenunterschiede von bis zu 1 % über die gesamte Stützhöhe. Die bei der optischen Begutachtung festgestellte unzureichende Verdichtung im Kopfbereich bestätigte sich nicht. Es handelt sich somit nur um lokale Störungen. Auch die Bohrkerne wiesen keine extrem großen Fehlstellen auf (maximaler Porendurchmesser 4 mm).

Tabelle 4.12: offene Porosität, ermittelt mit Vakuum- Wasseraufnahme in Vol. %

Stütze	v [m/h]	Luftporen Frischbeton LP-Topf [%]	Setzfließmaß sm/ Ausbreitmaß a [cm]	Offene Porosität $\Pi_a$ [%]		
				unten	mitte	oben
5a	160.0	1.0	74.0	14.03	14.63	15.42
<b>5r</b>	<b>160.0</b>	<b>1.4</b>	<b>47.5</b>	<b>15.05</b>	<b>15.63</b>	<b>16.08</b>

#### 4.4 Zusatzuntersuchungen

Zur numerischen Beschreibung des Frischbetondrucks, zur Entwicklung eines Berechnungsansatzes (Kapitel 5) und für vergleichende Betrachtungen war es notwendig einige Zusatzuntersuchungen durchzuführen.

Dabei lag der Schwerpunkt bei der Ermittlung des Erstarrungsverhaltens der gewählten Betonmischung sowie des verwendeten Zementes (Einflussgruppe 2.1, siehe Kapitel 2.2.1) bei Variation der Frischbetontemperatur (Einflussgruppe 1.6).

Der Reibbeiwert zwischen Schalhaut und Beton wurde lediglich für den Festbeton bestimmt (Einflussgruppe 2.5).

#### Erstarrungsverhalten

Eine besondere Schwierigkeit besteht in der Festlegung des Erstarrungsendes  $t_E$  des Betons. Das Erstarrungsende gibt den Zeitpunkt nach Mischungsbeginn an, bei dem von Beton eine ausreichende Vertikalbelastung ohne zusätzliche horizontale Stützwirkungen (durch z.B. die Schalung) aufgenommen werden. Auf den Zeitpunkt haben die Art des Zements, der Wassergehalt, die Mischungstemperatur und gegebenenfalls die verzögernde Art der verwendeten Fließmittel einen wesentlichen Einfluss auf den Erstarrungsbeginn und das Erstarrungsende.

Nach /27/ kann als grobe Abschätzung des Rechenwertes  $t_E$  ( $\lambda_{(t=t_E)} = 0$ ) für normale Rezepturen der doppelte Wert des Erstarrungsendes des Zementes verwendet werden.

$$t_{E, \text{Beton}} = t_{E, \text{Zement}} \times 2 \quad \text{Gl. 4.3}$$

Für den vorliegenden selbstverdichtenden Beton unter Einsatz eines hochwertigen Fließmittels wurden die Angaben aus /27/ überprüft.

#### Versuchsdurchführung:

Die Bestimmung der Normsteife und der Erhärungszeiten des Zementes wurde nach DIN 196-3 /31/ durchgeführt. Für den Beton wurde das gleiche Prüfverfahren am Mörtel mit einem Größtkorn von 1 mm (aus der Frischbetonmischung abgesiebt) durchgeführt. Damit ist eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Die Wasserlagerung der Proben erfolgte jeweils bei einer Temperatur von 15°C, 20°C sowie 25°C. Die gemessenen mittleren Frischbetontemperaturen wichen etwas von der Lagerungstemperatur ab (Tabelle 4.13).

#### Versuchsauswertung:

Der Wasseranspruch des Deuna-Zementes CEM II/A-S 52,5 R bei Normsteife wurde mit 32.7 % festgestellt. Demgegenüber lag der w/z-Wert für den Beton bei 0.49.

Die Ergebnisse (Bild 4.28 und Tabelle 4.13) rechtfertigen die Annahmen nach /27/ und damit Gleichung 4.3. Die Werte für den Erstarrungsbeginn des Betons sind zirka doppelt so hoch wie die des Zementes. Das Erstarrungsende des Betons scheint jedoch weitaus früher als in Gleichung 4.3 angegeben erreicht.

Einen gewissen Einfluss hat die Wahl des Größtkorns von 1 mm bei der Betonmischung, da das Gesteinskorn das Eindringen erschwert. Eine vergleichbare Druckfestigkeit bzw. das tatsächliche Erstarrungsende des Betons wird daher je nach Frischbetontemperatur etwa 15 bis 25 min nach dem mit der VICAT-Nadel festgestellten Wert erreicht. Selbst bei Berücksichtigung dieses Sachverhaltes genügen die Versuchsergebnisse zu den Erstarrungszeiten den Angaben der Gleichung 4.3.

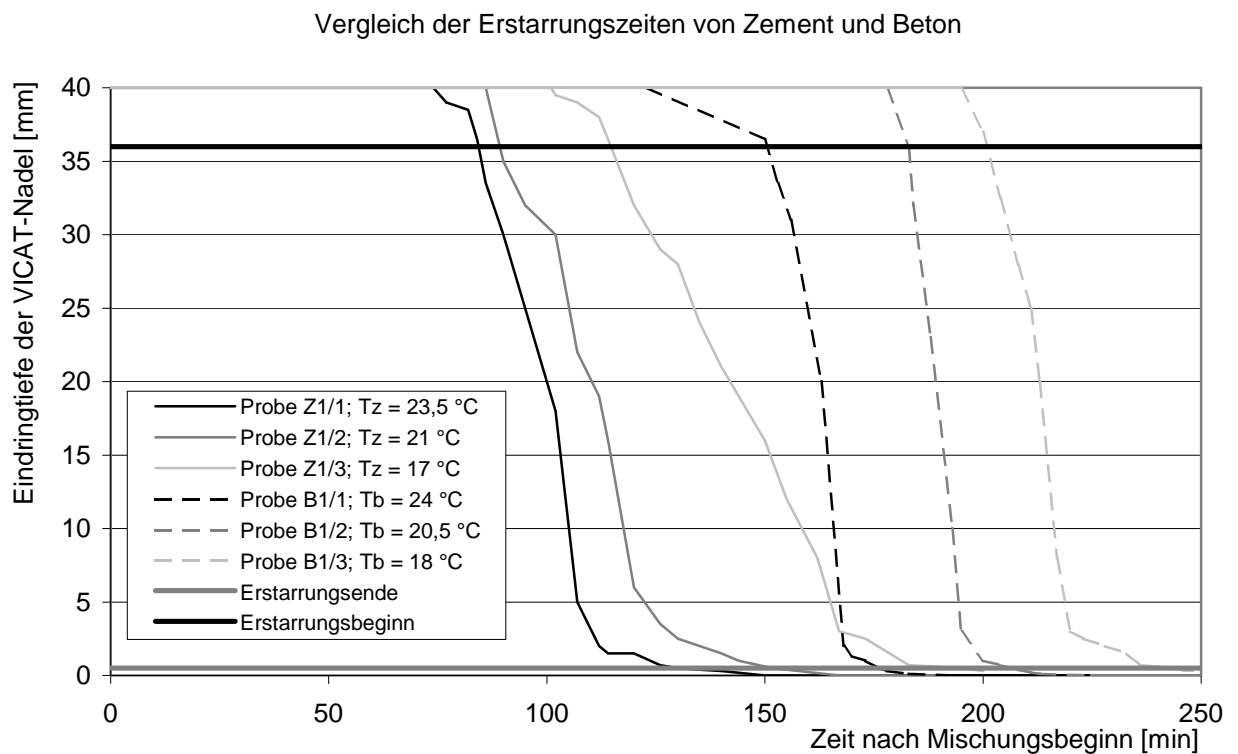


Bild 4.28: Bestimmung der Erstarrungszeiten am Zement und Beton mit dem VICAT-Gerät für verschiedene Frischbetontemperaturen.

Tabelle 4.13: Vergleich der Erstarrungszeiten von Zement und Beton

	Probe	durchschnittliche Betontemperatur [°C]	Erstarrungsbeginn [min]	Erstarrungsende [min]
Zement	Z 1/1	23.5	84	130
	Z 1/2	21.0	90	152
	Z 1/3	17.0	114	195
Beton	B 1/1	24.0	150	176
	B 1/2	20.5	183	208
	B 1/3	18.0	200	243

Das Verhalten des Betons während des Erstarrungsprozesses lässt mit den Angaben aus /27/ auf die erforderlichen Angaben zum Seitendruckbeiwert und den Reibbeiwert schlussfolgern (Bild 4.29).

## Wandreibung

Beispielhaft wurden für die gegebene Mischung die Reibbeiwerte  $\mu_E$  zwischen Festbeton und der phenolbeschichteten Schalungsoberfläche (glatt,  $R_t = 13.5 \mu\text{m}$ ,  $R_a = 0.68 \mu\text{m}$ ) ermittelt (Tabelle 4.14).

Tabelle 4.14: ermittelte Reibbeiwerte zwischen Schalung und Festbeton

Sperrholzoberfläche mit Phenolbeschichtung	$\mu_E$ statisch	$\mu_E$ dynamisch
glatt (ungebraucht)	0.30	<b>0.29</b>
rau (gebraucht)	0.44	0.32

Das Erstarrungsverhalten inklusive der zeitlichen Änderung des Seitendruck- und des dynamischen Reibbeiwertes konnte für die Probe B1/1 anhand der Versuchsergebnisse (Setzfließmaß, Ausbreitmaß) und der Angaben aus /25/ und /27/ beschrieben werden.

Für den Seitendruckbeiwert  $\lambda$  wurden die gewonnenen Ergebnisse mit den Ansätzen nach DIN 18 218 verglichen (Bild 4.29).

Eine lineare Beschreibung erfolgte ebenfalls für den Wandreibungskoeffizienten  $\mu$ .

Es ist zu bemerken, dass die Rechenansätze nur eine grobe Abschätzung der tatsächlichen Verläufe darstellen. Für eine genauere Beschreibung mit Hilfe entsprechender Funktionen und zur Absicherung der Ergebnisse wären umfangreichere Versuche zur Bestimmung des Seitendruckverhältnisses und der Reibbeiwerte notwendig.

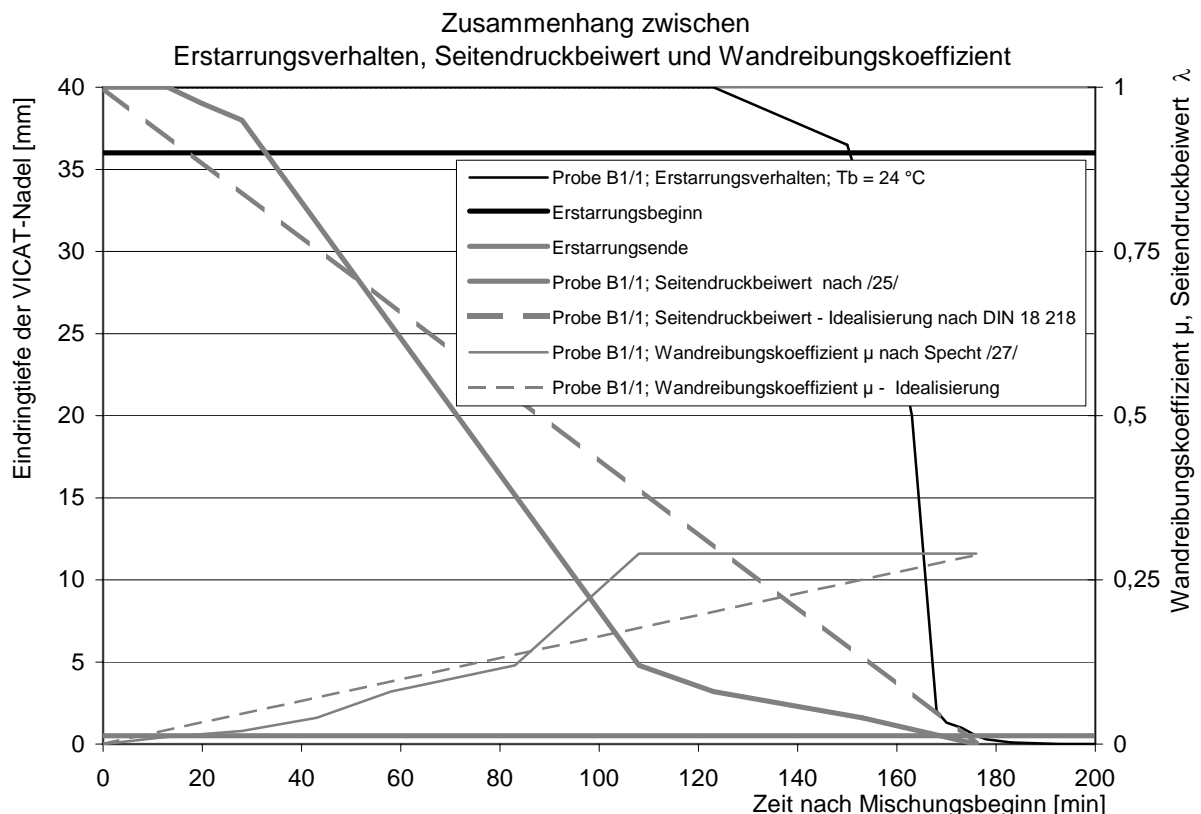


Bild 4.29: Zusammenhang zwischen Erstarrungszeiten, Seitendruckbeiwert und Wandreibungskoeffizient der Frischbetonprobe B1/1

## **5. Berechnungsansatz zur Ermittlung des Frischbetondrucks von SVB auf lotrechte Schalungen**

### **5.1 Vorbemerkung**

Aus den vorangegangenen Kapiteln wird deutlich, dass die Berechnungsansätze für den Schalungsdruck sowohl nach DIN 18 218 als auch nach den international geltenden Regeln bei Einsatz von selbstverdichtendem Beton nicht angewendet werden können.

Um die Höhe des Frischbetondrucks für SVB für die Bemessung der Schalungskonstruktionen wirklichkeitsnah angeben zu können, sollten in der DIN 18 218 die Konsistenzklassen K1, K2, K3 sowie Fließbeton um die Konsistenz „selbstverdichtend / selbstnivellierend“ erweitert werden.

Dabei muss eine für die praktische Anwendung gut handhabbare Anweisung entwickelt werden. Günstig wäre ein auf den theoretischen Grundlagen der DIN 18 218 /25/ basierender und auf die Erfordernisse des SVB abgestimmter Bemessungsansatz. Dieser sollte mit möglichst wenigen Parametern eine schnelle und einfache Berechnung ermöglichen.

Aus diesen Gründen wird in Abschnitt 5.2 und 5.3 ein einfaches Verfahren für die praktische Anwendung vorgestellt. Dieses berücksichtigt unter anderem aber nicht die günstigen Einflüsse aus der Silowirkung. Die Ergebnisse liegen daher diesbezüglich immer auf der sicheren Seite.

Ein ausführlicheres Rechenmodell könnte unter Einbeziehung weiterer Faktoren eine bessere Einschätzung der tatsächlichen Druckverhältnisse und somit eine Optimierung der Schalungssysteme auf Grundlage spezieller Randbedingungen ermöglichen.

Letzteres gilt insbesondere für die Berücksichtigung des Siloeffektes unter besonderer Beachtung der Schalungseigenschaften wie Querschnittswerte, Dichtheit, Saugfähigkeit, Rauigkeit aber auch der Bewehrungswahl sowie der Beton- und Zementeigenschaften. Durch die Vielzahl der zu beachtenden Parameter erhöht sich jedoch der Aufwand zur Bestimmung aller Einflussgrößen sowie die Fehleranfälligkeit bei der Berechnung.

Die Berechnung auf der Grundlage der Silotheorie kann sowohl ohne, als auch unter Berücksichtigung des Erhärtungsverlaufes durchgeführt werden. Ein diesbezügliches Rechenverfahren zur Beschreibung des Schalungsdrucks wird aufgrund der bisher unzureichenden Erkenntnisse zu den maßgebenden Parametern (u.a. zeitlicher Verlauf des Wandreibungs- und Seitendruckbeiwerts, Bewehrungswahl) nicht vorgestellt.

In Verbindung mit einem weiteren Forschungsvorhaben könnten bereits gefundene Ansätze weiterentwickelt, auf ihre Allgemeingültigkeit hin überprüft und Hilfsmittel zur einfachen Abschätzung des Schalungsdrucks angefertigt werden.



## 5.2 Vorhandene Modelle zur Beschreibung des Frischbetondrucks auf lotrechte Schalungen

Nachfolgend sollen zwei verschiedene Modellansätze zur Beschreibung des Frischbetondrucks unter Berücksichtigung der speziellen Randbedingungen bei SVB vorgestellt werden. Die Silowirkung wird hierbei nicht berücksichtigt.

Auf den gewonnenen Erkenntnissen aufbauend leitet sich ein einfacher Berechnungsvorschlag ab.

### 5.2.1 Modell 1

Auf dem Modell 1 basieren die Angaben zum Frischbetondruck nach DIN 18 218.

Es wird davon ausgegangen, dass bei Erreichen der Erstarrungszeit  $t_E$  nicht der Betondruck selbst, sondern lediglich der Seitendruckbeiwert  $\lambda(t=t_E)$  die Größe Null annimmt. Jede zusätzliche Auflast, die durch Ansteigen des Betonspiegels entsteht, erzeugt auch bis zur Tiefe  $h_E$  eine zusätzliche Drucksteigerung. Der Höchstdruck wird daher in Höhe  $h = h_E$  oder nach Ablauf der Zeit  $t = t_E$  erreicht (Bild 5.1).

Mit einem Seitendruckbeiwert  $\lambda$  von

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{t_E}\right), \quad \text{Gl. 5.1}$$

$\lambda_0$  - Seitendruckbeiwert bei Betonierbeginn

ergibt sich der Frischbetondruck  $p$  durch Integration der Druckzuwächse über die Bauteilhöhe zu

$$p = \int_0^{t_E} \gamma_b \cdot \lambda_0 \cdot v \cdot \left(1 - \frac{t}{t_E}\right) \cdot dt. \quad \text{Gl. 5.2}$$

Dabei ist  $t$  der betrachtete Zeitpunkt nach Mischungsbeginn,  $\gamma_b$  die Betonwichte und  $v_b$  die Steiggeschwindigkeit.

Mit der Randbedingung  $p(t=0) = 0$  (Fehlen einer Auflast bei  $t = 0$ ) ergibt sich:

$$p = \gamma_b \cdot \lambda_0 \cdot v \cdot \left(t - \frac{t^2}{2 \cdot t_E}\right) \quad \text{Gl. 5.3}$$

und der maximale Druck bei  $t = t_E$  zu

$$p_{max} = \frac{\gamma_b \cdot \lambda_0 \cdot v \cdot t_E}{2}. \quad \text{Gl. 5.4}$$

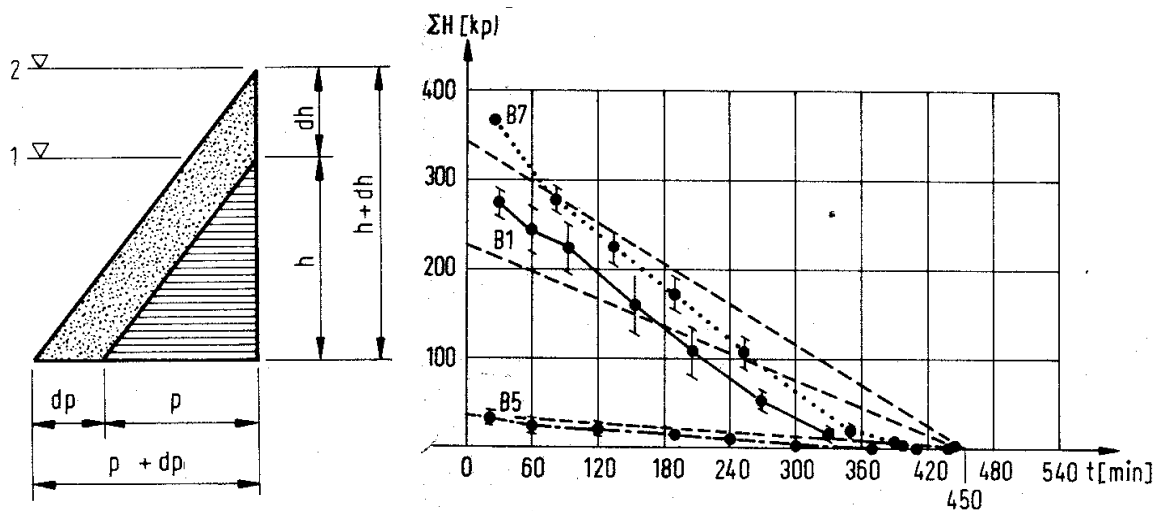


Bild 5.1 (rechts): Differentieller Druckzuwachs Modell 1

Bild 5.2 (links): Zusammenhang zwischen dem Seitendruckbeiwert und  $\lambda(t)$  bzw. dem Horizontaldruck bei konstanter Vertikallast und der Zeit  $t$ , für drei Betonsorten bei rauer Schalung /28/

## 5.2.2 Modell 2

Diese weitere Möglichkeit zur Berechnung des Frischbetondrucks wurde bei der Entwicklung der DIN 18 218 ebenfalls in Betracht gezogen, letztendlich aber verworfen (Begründung siehe Kapitel 5.3).

Hierbei wird ebenfalls ein kontinuierlich aufsteigender Frischbetonspiegel vorausgesetzt. Der Druck gegen die Schalung wird unter der Voraussetzung ermittelt, dass keinerlei Störungen der vollkommen ruhend gedachten Belastungssituation auftritt. Dabei wird im Gegensatz zu Modell 1 davon ausgegangen, dass bei Erreichen der Erstarrungszeit  $t_E$  sowohl der Seitendruckbeiwert  $\lambda(t=t_E)$  als auch der Betondruck selbst die Größe Null annimmt. Unter der angenommenen Funktion für  $\lambda$  ergibt sich:

$$p = \gamma_b \cdot \lambda_0 \cdot v \cdot \left( t - \frac{t^2}{t_E} \right). \quad \text{Gl. 5.5}$$

Somit tritt der Maximaldruck nicht bei  $t_E$  (Modell 1) sondern zwischen  $t_0$  und  $t_E$  und mit der angenommenen Funktion für  $\lambda$  zum Zeitpunkt  $t = t_E/2$  bzw. an der Stelle  $h = h_E/2$  auf:

$$p_{max} = \frac{\gamma_b \cdot \lambda_0 \cdot v \cdot t_E}{4}. \quad \text{Gl. 5.6}$$

Das heißt, der Maximaldruck nach Modell 2 ist 50 % geringer als der Druck nach Modell 1.

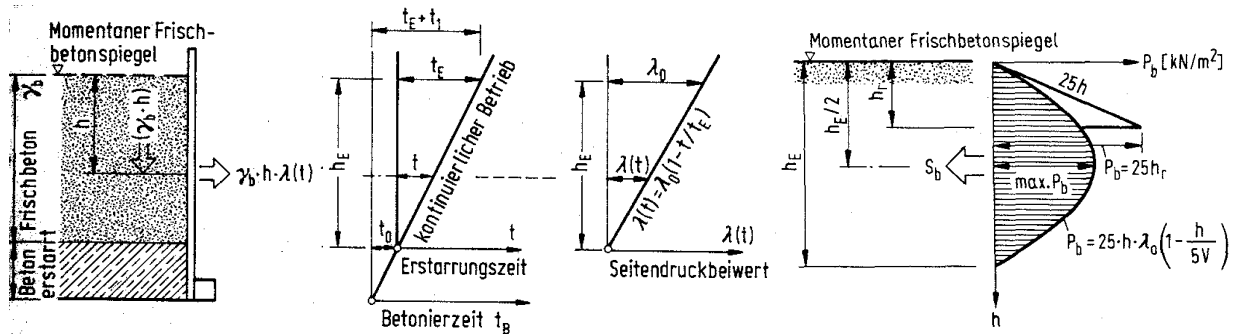


Bild 5.3 (links): Druck des ruhend gedachten Frischbetons im Betrachtungszeitraum bei kontinuierlichem Betrieb nach Modell 2, nach /28/

Bild 5.4 (rechts): Verteilung des Schalungsdrucks, für eine Erstarrenszeit von 5h, Modell 2, nach /28/

Zu bemerken ist, dass sich die geringeren maximalen Druckwerte nach Modell 2 lediglich bei vollkommen ruhender Last und einer nachgiebigen Schalungswand einstellen. Weiterhin ist infolge der vorgespannten Schalung und Schalungsanker auch bei einer Verfestigung des Betons bis zur Zeit  $t_E$  nicht von einem signifikanten Absinken des Frischbetondrucks auszugehen. Dies wäre erst durch das nicht erwünschte Lösen der Schalungsanker bzw. durch ein Nachgeben des Schalungssystems zu erreichen.

Bei der Bemessung der Schalung müsste zwischen einem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit unterschieden werden.

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit:

- Festlegung der maximal zulässigen Verformungen der Schalungselemente

Grenzzustand der Tragfähigkeit:

- Ermittlung der maximalen Betonierhöhe bei zulässiger Verformung der Schalungselemente (Nachweis der elastischen und plastischen Verformbarkeit sowie der Tragfähigkeit der Schalung bis zum Erreichen der Bemessungslast)

Erfahrungen und Messungen, welche an Bauteilen mit großen Querschnitten gesammelt wurden, könnten gegebenenfalls eine Entscheidung für die Modellvorstellung 2 bzw. eine Kombination aus Modell 1 und Modell 2 begünstigen.

### 5.3 Vorschlag für ein vereinfachtes Berechnungsverfahren zur Beschreibung des Schalungsdrucks bei SVB

Es wird ein Berechnungsansatz vorgeschlagen, welcher auf dem in Kapitel 5.2 vorgestellten Modell 1 basiert, also einer stetigen Zunahme des Frischbetondrucks bis zum Erreichen des Erstarrungsendes.

Nachfolgend wird die Entscheidung für den Berechnungsvorschlag auf Grundlage des Modells 1 begründet.

Der Berechnungsansatz basiert auf den Grundlagen der DIN 18 218.

Bei der Festlegung der DIN 18 218 für Rüttelbeton entschied sich der Normenausschuss aus folgenden Gründen ebenfalls für das Modell 1 /27/:

1. Das Phänomen der geschmierten Reibung beim Frischbeton wird fortgeschrieben. Die Viskosität nimmt bis zur Erstarrung zu und damit der Wert  $\lambda$  nach Gleichung 5.1 auf Null ab.
2. Berücksichtigung der Rüttelwirkung als Zuschlag bis zur Zeit  $t_E$  (entfällt bei SVB).
3. Bei einem teilweisen Lösen der Schalungsanker könnte eine Verminderung des Druckes erreicht werden. (nach Abschalten der Vibratoren, bei SVB kein Problem). Aufgrund der erforderlichen Maßhaltigkeit und der äußeren Gefügedichte müssen die Schalungsanker/Schalungen als unverschieblich betrachtet werden.
4. Diese Vorstellung führt auf die sichere Seite

Auch für SVB sind die Argumente der Punkte 1, 3 und 4 noch relevant. Gerade der Punkt 4 ist bei der komplizierten Problematik des Frischbetons ein wichtiges Argument.

Der zusätzliche Sicherheitszuschlag nach DIN 18 218 (siehe Bild 5.5) wird in /28/ als zusätzlicher Rüttelzuschlag angesehen. Da auch bei dem Einbau von selbstverdichtetem Beton dynamische Beanspruchungen, z.B. durch den frei fallenden Beton (siehe Kapitel 4.2) oder sonstige externe Erschütterungen entstehen können, wird es als sinnvoll angesehen diesen Zuschlag beizubehalten. Ebenfalls ist infolge der Unsicherheiten bei der Beschreibung des zeitlichen Verlaufs des Seitendruckbeiwertes der Sicherheitszuschlag empfehlenswert. Insbesondere die Möglichkeit des verzögerten Ansteifen des Beton in der Anfangsphase wird durch den Sicherheitszuschlag berücksichtigt. Außerdem dient dieser Zuschlag der Abdeckung der möglichen, im Forschungsvorhaben jedoch nicht untersuchten, Einflüsse ,wie z.B. der verschiedenen Fließmittel, der unterschiedlichen Mehlkorngelalte und der Art, Form der Gesteinskörnungen.

Der maximale Frischbetondruck  $p_{max}$  errechnet damit sich zu:

$$p_{max} = \frac{\gamma_b \cdot v \cdot \lambda_0 \cdot t_E}{2} . \quad \text{Gl. 5.4}$$

$\gamma_b$  – Frischbetonwichte

$v$  – Steiggeschwindigkeit des Betons

$\lambda_0$  – Seitendruckbeiwert zu Betonierbeginn (bei SVB mit 1.0 anzusetzen)

Es muss ein kontinuierliches Ansteifen/Erhärtung vom Betonierbeginn bis zum Erstarrungsende sichergestellt sein, d.h. eine annähernd lineare Abnahme von  $\lambda_0 = 1.0$  (Betonierbeginn) auf  $\lambda_E = 0.0$  (Betonierende) oder ein dem linearen Verlauf entsprechender Flächeninhalt unter der Funktion  $\lambda(t)$ , Bild 5.3., ansonsten ist der Schalungsdruck anzupassen (maximal zu verdoppeln).

$t_E$  – Erstarrungsende des Betons

Mit  $\lambda_0 = 1.0$  und  $\gamma_b = 25 \text{ kN/m}^3$  ergibt sich der maximale Schalungsdruck zu:

$$p_{max} = 12.5 \cdot v \cdot t_E \quad \text{Gl.5.7}$$

Es besteht lediglich eine Abhängigkeit von der Steiggeschwindigkeit sowie des Erstarrungsendes des Betons.

Der Lastanteil infolge Vibration nach DIN 18 128 entfällt. Eine absolute maximale Begrenzung des Frischbetondrucks ist bei dem zur Zeit vorliegenden Kenntnisstand nicht möglich.

Ein Vergleich der Lastansätze zwischen den Konsistenzbereichen verdeutlicht Bild 5.6.

Für die Druckverteilung über die Bauteilhöhe wird der in DIN 18 218 enthaltene Ansatz vorgeschlagen, d.h. ein **hydrostatisches Verhalten des Betons bis zum Erreichen des maximalen Schalungsdrucks und ein konstanter Wert bis zum Erstarrungsende** (Bild 5.5 und Bild 5.7).

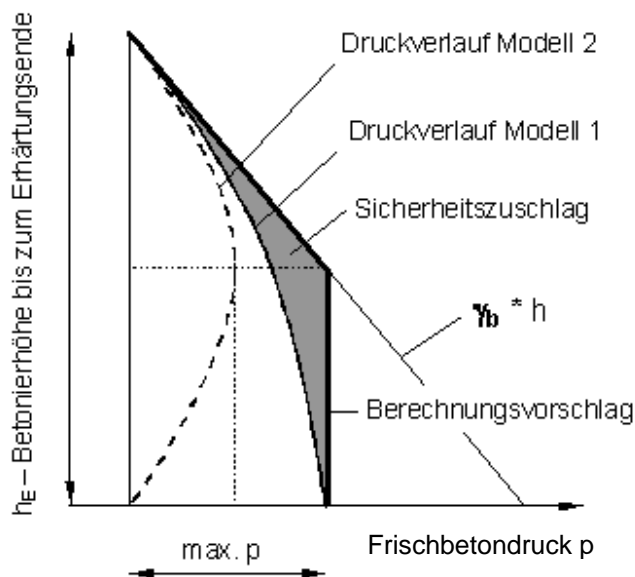


Bild 5.5: Entwicklung des Verteilungsdiagramms für den Berechnungsvorschlag (prinzipiell)

Die Angaben gelten nur bei dem Einbringen des Betons von oben.

Bei einer freien Fallhöhe von mehr als 2.0 m ist zu beachten, dass die dynamische Wirkung infolge des frei fallenden Volumenstroms auch Druckwerte über den hydrostatischen Druck hinaus erzeugen kann. Diese Belastungen könnte über einen zusätzlichen Zuschlag, ähnlich dem Rüttelzuschlag nach DIN 18 218, berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass ein hoher Volumenstrom auch große dynamische Beanspruchungen impliziert.

Beim Einbringen von unten ist hydrostatisches Verhalten, zuzüglich des Anteils aus der zu überwindenden Wandreibung anzusetzen.

Weiterhin gelten die Randbedingungen und sonstigen Festlegungen nach DIN 18 218, siehe Kapitel 2.2.2. Auch die zulässigen Abweichungen von der lotrechten mit  $\pm 5^\circ$  können aufgrund der gewählten Druckverteilung beibehalten werden.

Für den Ansatz des Druckverlaufs nach dem Erreichen des Maximalwertes wird empfohlen, die Überlegungen aus Specht /28/ (reduziertes Druckverteilungsdiagramm) in die zu treffenden Festlegungen einfließen zu lassen. Hier wird die resultierende Gesamlast reduziert, nicht jedoch der maximale Schalungsdruck. Dies wirkt sich weniger auf die Dimensionierung der Schalung selbst, gegebenenfalls aber auf die lastweiterleitenden Bauteile, wie Anker, Spreizen und Querriegel (in weitem Abstand angeordnet) aus.

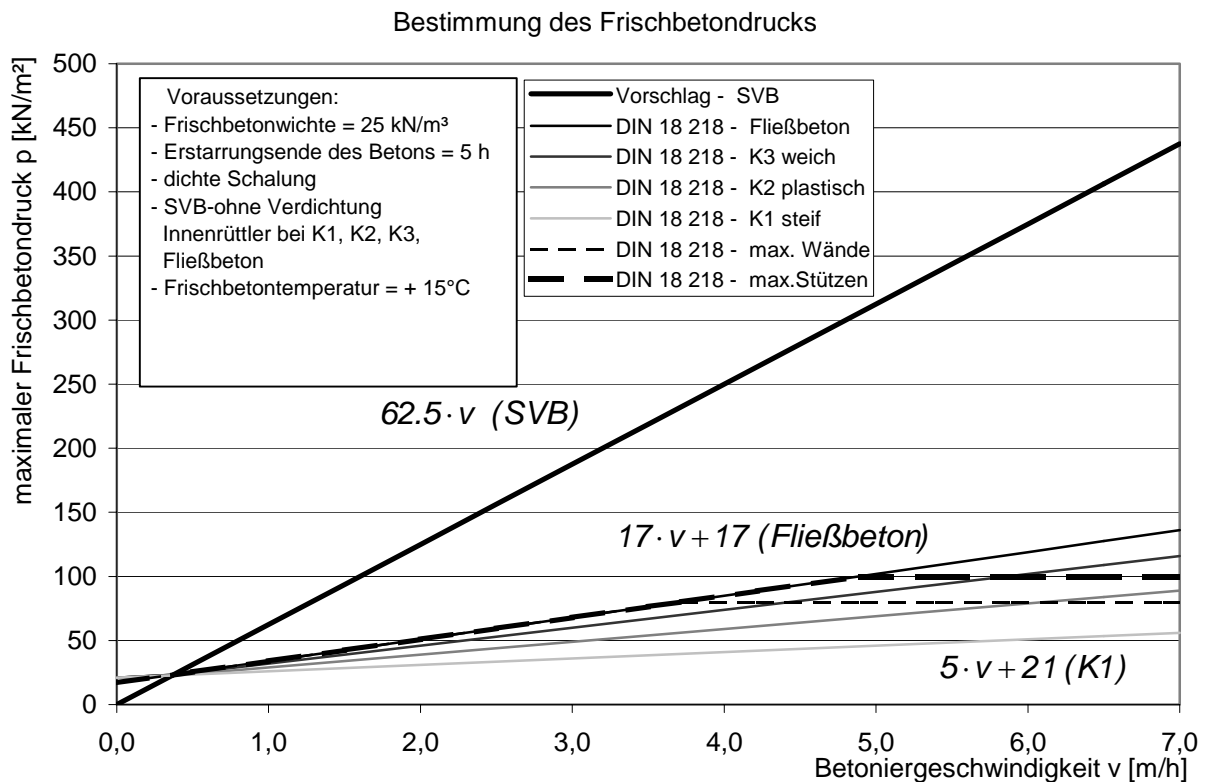


Bild 5.6: Diagramm zur Bestimmung des Frischbetondrucks p in Abhängigkeit von der Steiggeschwindigkeit v - Berechnungsvorschlag für SVB und DIN-Werte unter Beachtung der Konsistenz

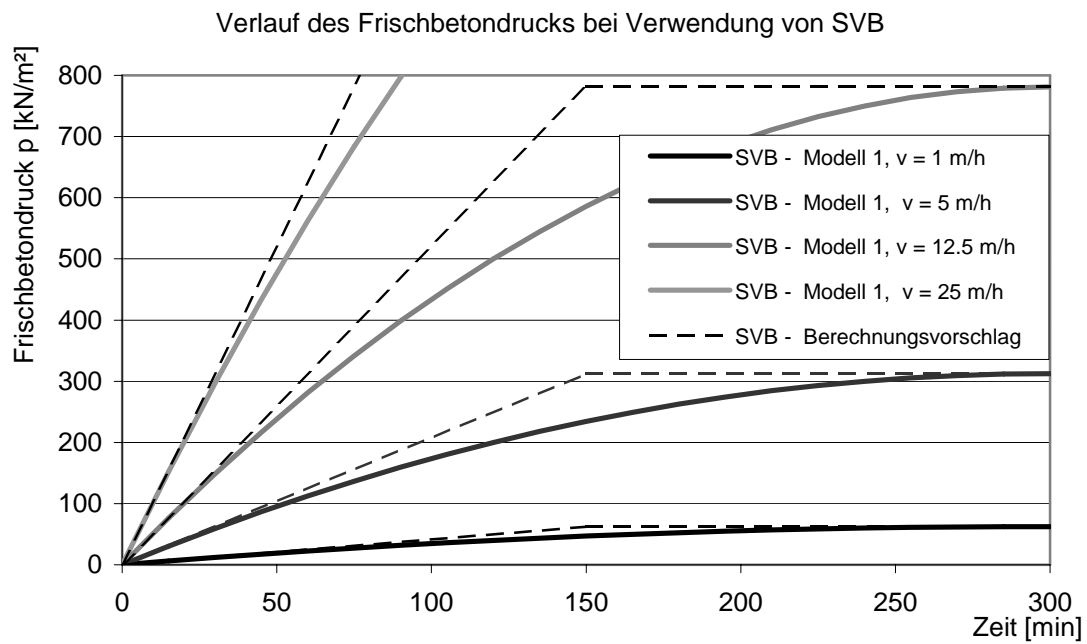


Bild 5.7: Verlauf des Frischbetondrucks  $p$  für SVB in Abhängigkeit vom Betonierfortschritt  $t$ , Modell 1 sowie Berechnungsvorschlag (Erstarrungsende 5h bzw. 300 min,  $\gamma_b = 25$  kN/m<sup>3</sup>, Frischbetontemperatur 15°C)

## 5.4 Vergleich des Berechnungsvorschlags mit den Messergebnissen

Das vereinfachte Berechnungsverfahren wurde unter der Einbeziehung der in Kapitel 5.2 erläuterten Modellvorstellungen entwickelt.

Ein Vergleich der Rechenergebnisse mit den Messergebnissen ist in Bild 5.8 dargestellt. Zu erkennen ist der hydrostatische Betondruckverlauf für den Bemessungsvorschlag (der rechnerische Maximaldruck ist noch nicht erreicht). Der Verlauf nach Modell 1 weicht bei den vorliegenden Betoniergeschwindigkeiten nur geringfügig vom hydrostatischen Verlauf ab. Die Messwerte liegen sowohl unter den Werten des Bemessungsmodells sowie des Modells 1 und 2. Diese geringen Druckwerte insbesondere bei der Betoniergeschwindigkeit von 12.5 m/h sind mit dem Siloeffekt zu erklären, welcher sich bei kleinen Querschnitten signifikant auswirkt. Die Rechenwerte liegen somit auf der sicheren Seite.

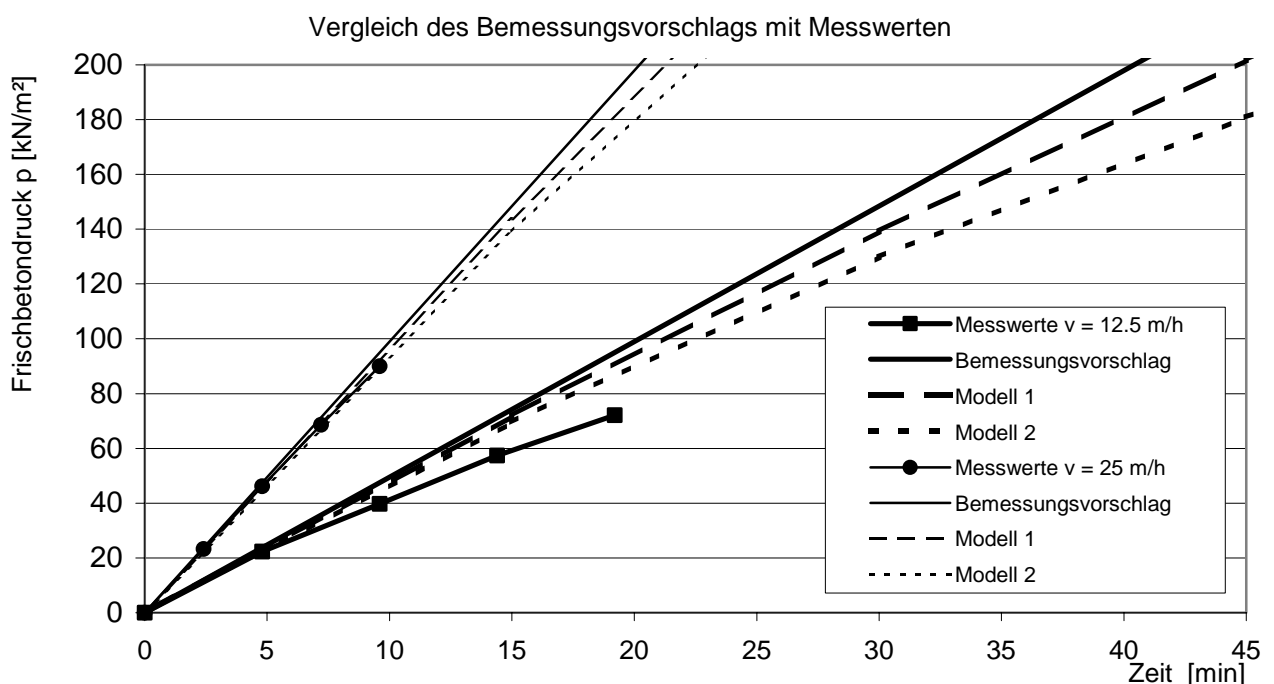


Bild 5.8: Vergleich des Rechenansatzes mit den Versuchsergebnissen, Verlauf des Frischbetondrucks  $p$  in Abhängigkeit vom Betonierfortschritt  $t$  (Erstarrungsende des Betons  $4h$ ,  $\gamma_b = 23.75 \text{ kN/m}^3$ )

Die Zusatzuntersuchungen welche zum Seitendruckbeiwert durchgeführt wurden zeigen die Notwendigkeit des Ansatzes hydrostatischen Verhaltens bis zum Erreichen des maximalen Schalungsdrucks (Kapitel 4.4). In Bild 4.28 ist die Abweichung des bei der verwendeten Mischung festgestellten Seitendruckbeiwertes vom idealisierten linearen Verlauf zu erkennen. Während der ersten Stunde überschreiten die tatsächlichen Werte die Rechenwerte (nahezu hydrostatisches Verhalten), fallen jedoch nachfolgend stark ab.

Die Flächeninhalte unterhalb der jeweiligen Funktion entsprechen prinzipiell dem Maximaldruck. Daraus ist abzuleiten, dass die Berechnungsansätze für diesen Wert hier auf der sicheren Seite liegen.

Weitere Versuche könnten das Verhalten bis zum Erreichen des Maximaldrucks und des Erstarrungsendes bei kontinuierlichem Einfüllprozess überprüfen. Hier müssten sehr geringe Betoniergeschwindigkeiten und entsprechend große Querschnittsabmessungen (zur Minimierung des Siloeffektes) gewählt werden.



## **6. Empfehlungen zur Sicherstellung eines ausreichenden Entlüftungsverhaltens und damit guten Ausführungsqualität**

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die Ausführungsqualität von hohen Bauteilen, die mit SVB hergestellt wurden von den verschiedensten Faktoren abhängt.

Diese sind vor allem die

- Betoniergeschwindigkeit,
- rheologischen Eigenschaften des Frischbetons während des Einbaus (Setzfließmaß),
- Einfülltechnik/ Fallhöhe,
- Länge des Fließweges am Einbauort,
- Dichtigkeit der Schalung,
- Art der Schalungsoberfläche,
- Druckverhältnisse in der Schalung.

Das Entlüftungsverhalten im Speziellen und damit die angestrebte Verdichtung wiederum wird hauptsächlich beeinflusst von

- der Betoniergeschwindigkeit,
- den rheologischen Eigenschaften des Frischbetons während des Einbaus (Setzfließmaß),
- der Einfülltechnik/ Fallhöhe,
- der Länge des Fließweges am Einbauort,
- den Druckverhältnissen in der Schalung.

Dabei wirkt sich der letzte Parameter eher auf die Verringerung der eingetragenen Luftporen infolge Kompression aus.

Als nur bedingt entscheidender Einflussparameter erwies sich die nach der Zielsetzung hauptsächlich zu verifizierende Betoniergeschwindigkeit (Versuchsreihe I).

Es wurde bei Vergrößerung der Betoniergeschwindigkeiten bei der Sicherstellung eines hohen Setzfließmaßes kein signifikant höherer Porengehalt im Festbeton festgestellt.

Dies begründet warum keine Korrelation der Druckfestigkeiten mit der Betoniergeschwindigkeit nachgewiesen werden konnte. Dies gilt ebenso für die Größe und die Anzahl der an der Betonoberfläche sichtbaren Lunker.

Allein bei der maximalen Geschwindigkeit von 160 m/h ergaben sich recht hohe Porengehalte sowie vereinzelte große Fehlstellen.

Als bedeutsamster Faktor für die Selbstentlüftungsfähigkeit können die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons bewertet werden. In der neu aufgenommenen Versuchsreihe II wurde dazu das Setzfließmaß des Frischbetons und damit vor allem die Fließgrenze gezielt verändert. Eine Verringerung des Setzfließmaßes ergab sowohl eine starke Erhöhung des Luftporengehaltes als auch eine signifikante Verringerung der Druckfestigkeiten. Außerdem verschlechterte sich die Qualität der Betonoberfläche.

Eine Veränderung der Bewehrungsführung bzw. des Bewehrungsgrades in der Versuchsreihe III ergab keinen Einfluss auf die Entlüftung. Diese Einschätzung gilt aber lediglich für geringe Bewehrungsgrade.

Im folgenden sollen einige praktische Empfehlungen für den Einbau von selbstverdichtendem Beton gegeben werden.

Um eine ausreichende Entlüftung bei hohen Bauteilen sicherzustellen werden folgende bau-praktische Regeln vorgeschlagen:

- Ein Setzfließmaß ohne Blockierring zum Zeitpunkt des Betoneinbaus von  $s_m \geq 74$  cm ist zu gewährleisten, die Zeit  $t_{500}$  sollte dabei 3 Sekunden nicht überschreiten.
- Der Beton darf nicht gegen die Schalung betoniert (Entmischung), sondern mittig eingebaut werden. Um den Kontakt mit der Bewehrung, und damit ein Entmischen zu vermeiden sollte die freie Fallhöhe bei schmalen Bauteilen möglichst gering gehalten werden und maximal 2 m betragen. Außerdem sind im Einfüllbereich Bewehrungskonzentrationen zu vermeiden.
- Die Betoniergeschwindigkeit sollte bei Stützen und Wänden nicht mehr als 50 m/h betragen
- Bei hohen Bewehrungskonzentrationen wird vorgeschlagen die Betoniergeschwindigkeit weiter zu reduzieren, um sicherzustellen, dass der Beton die Bewehrung umhüllt und alle Zwischenräume ausfüllt.
- Vorteilhaft vor allem bei Bauteilen mit geringen Querschnittsabmessungen ist der Einbau des Betons von unten mittels Einpressen.

Bei großen Querschnitten wird die Entlüftung durch einen langen Fließweg begünstigt (z.B. bei Wänden durchaus möglich). Daher könnte hier gegebenenfalls von den oben angegebenen Vorgaben zum Setzfließmaß und zur Zeit  $t_{500}$  abgewichen werden

Die Schalung sollte gerade bei hohen Bauteilen möglichst dicht ausgeführt werden. Aufgrund der auftretenden hohen Schalungsdrücke erfolgt schon bei Spalten von kleiner als 3 mm ein signifikanter Abfluss von Leimanteilen und damit eine starke Separation.

Nach Dehn in /15/ sind Spalten bis zu 4 mm unbedenklich. Dies kann für niedrige Druckzustände bestätigt werden.

## 7. Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsauftrages wurde für selbstverdichtenden Beton der auftretende Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen in Abhängigkeit von der Betoniergeschwindigkeit untersucht. Mit Hilfe der Begutachtungen an insgesamt 11 Versuchsstützen konnten ebenfalls Aussagen zum Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf die Qualität von Betonbauteilen getroffen werden.

Für die Problematik des **Frischbetondrucks** war festzustellen, dass die in der nationalen Norm DIN 18 218 angegebenen Lastermittlungen zum Frischbetondruck nicht ohne Modifizierungen für SVB übernommen werden können.

Folgende Einflussparameter wurden mittels der Bauteilversuche verifiziert:

- Betoniergeschwindigkeit (Steiggeschwindigkeit)
- Konsistenz/ Fließgrenze (Setzfließmaß)
- Bewehrungsführung

Als wesentliche Einflussparameter stellten sich bei dem vorhandenen Stützenquerschnitt und den praxisüblichen Betoniergeschwindigkeiten die Konsistenz der Mischung und die Bewehrungsführung heraus. Insbesondere bei niedrigen Setzfließmaßen war eine deutliche Abnahme des Schalungsdrucks gegenüber dem hydrostatischen Verhalten zu beobachten.

Die Betoniergeschwindigkeit hatte nur bei der Erhöhung der Fließgrenze bzw. bei geringen Fließmaßen einen signifikanten Einfluss auf die Schalungsdrücke. Somit ist bei langen Betonierzeiten aufgrund des Erstarrungsverlaufs mit einem signifikanten Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf den Frischbetondruck zu rechnen.

Für SVB sollte beim Herstellen von hohen und schlanken Bauteilen eine starke Selbstentlüftungsfähigkeit sichergestellt sein. Dies bedingt im Allgemeinen ein hohes Setzfließmaß. Infolge dieser Randbedingung, verbunden mit den meist großen Füllgeschwindigkeiten und der kurzen Betonierzeiten muss im Regelfall für hohe und schlanke Bauteile von hydrostatischen Frischbetondrücken ausgegangen werden. Bei gedrungene Bauteilen ist der Einfluss des Siloeffekt wesentlich geringer, so dass er bei der Berechnung des Frischbetondrucks vernachlässigt werden kann.

Aus den eigenen Versuchsergebnissen sowie Angaben aus der Literatur wurden verschiedene Ansätze zur rechnerischen Ermittlung des Frischbetondrucks von SVB auf lotrechte Schalungen erarbeitet.

Für die praktische Anwendung wird der in Kapitel 5.3 dargestellte, auf den Grundlagen der DIN 18 218 entwickelte, Berechnungsvorschlag empfohlen. Dieser vernachlässigt auf der sicheren Seite liegend die Silowirkung. Das Verfahren basiert auf der Annahme einer Druckzunahme bis zum Erreichen des Erstarrungsendes. Auch für die Druckverteilung über die Bauteilhöhe wird der in DIN 18 218 enthaltene Ansatz vorgeschlagen, d.h. ein hydrostatisches Verhalten des Betons bis zum Erreichen des maximalen Schalungsdrucks und ein konstanter Wert bis zum Erstarrungsende (Bild 5.5).

Ein komplexer Rechenansatz zur Beschreibung des Schalungsdruckes, der den günstigen Einfluss infolge Silowirkung berücksichtigt wird aufgrund der bisher ungesicherten Erkenntnisse nicht vorgestellt. Ausführungen zur Silotheorie enthalten die Kapitel 2.2, 4.2 und 5.1.

Die Anwendung solch eines Verfahrens würde ein zusätzliches umfangreiches Wissen über folgende Einflussfaktoren erfordern:

- die Beschaffenheit der Schalungsoberfläche und der rheologischen Eigenschaften des Betons bzw. den Wandreibungskoeffizienten
- das Erhärungsverhalten des Betons
- Querschnittsgeometrie der Schalung
- gegebenenfalls die Bewehrungsführung

In Verbindung mit einem weiteren Forschungsvorhaben könnten bereits gefundene Ansätze weiterentwickelt, auf ihre Allgemeingültigkeit hin überprüft und Hilfsmittel zur einfachen Abschätzung des Schalungsdrucks angefertigt werden. Damit ist vor Allem bei schlanken Bauteilen mit relativ geringer Betoniergeschwindigkeit eine starke Reduzierung des zur Bemessung anzusetzenden Frischbetondrucks möglich. Dies erlaubt eine wirtschaftliche Bemessung der Schalung. Gerade bei hohen Bauteilen ergeben sich signifikante Einsparungen sowohl bei den Kosten für die Schalungen als auch für die benötigten Hebezeuge und erforderlichen Arbeitskräfte.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass unter bestimmten Voraussetzungen auch bei hohen Bauteilen mit geringen Querschnittsabmessungen eine ausreichende **Entlüftung** des SVB gewährleistet ist.

Eine geringe Viskosität und eine niedrige Fließgrenze (Grenzscherspannung) begünstigen die Selbstentlüftung. Es wurde hierbei festgestellt, dass zum Zeitpunkt des Betoneinbaus ein Setzfließmaß ohne Blockiering von 74 cm nicht unterschritten, die Zeit  $t_{500} = 3s$  nicht überschritten werden sollte. Bei großen Querschnitten wird die Entlüftung durch einen langen Fließweg begünstigt. Daher könnte hier gegebenenfalls von den oben angegebenen Vorgaben zum Setzfließmaß und  $t_{500}$  abgewichen werden

Das Druckpotential in der Schalung bei großen Betonierhöhen bewirkt eine erhebliche Reduzierung des eingetragenen Luftvolumens durch Kompression und damit auch höhere Druckfestigkeiten in den unteren Bauteilbereichen.

Es wurde weiterhin festgestellt, dass der Beton, wie auch für Rüttelbeton empfohlen, nicht gegen die Schalung, sondern mittig eingebaut werden muss, da ansonsten die Gefahr von Separationserscheinungen besteht. Um den Kontakt mit der Bewehrung während des Einbaus zu vermeiden wird empfohlen bei schmalen Querschnitten die freie Fallhöhe möglichst gering zu halten und auf maximal 2 m zu begrenzen.

Die Betoniergeschwindigkeit sollte bei schlanken Bauteilen nicht mehr als 50 m/h betragen, um größere Lunker an der Betonoberfläche zu vermeiden, und ein vollständiges Umhüllen der Bewehrung sicherzustellen. Bei hohen Bewehrungsgraden ist diese Geschwindigkeit gegebenenfalls weiter zu reduzieren.

Das Ersetzen einer dichten Schalungsoberfläche durch eine saugfähige Schalung bewirkte eine Reduzierung der Oberflächenporosität.

Undichtigkeiten zwischen den Schalungselementen führten aufgrund der auftretenden hohen Schalungsdrücke zu einem massiven Abfluss von Leimanteilen und damit zu einer starken Separation. Daher sollten gerade bei hohen Bauteilen die Fugen zwischen den einzelnen Schalungselementen möglichst dicht ausgeführt werden.

## 8. Literaturverzeichnis

- /1/ DIN 1045-3, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 3 Bauausführung, Ausgabe Juli 2001
- /2/ Ozawa, K.: Maekawa, K. Kunisima, M. Okamura, H.: High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures, Proc. of 2- East Asia-Pacific Conference on Structural Design and Construction, 1989.
- /3/ Ozawa, K.: Maekawa, K.; Okamura, H.: Development of High Performance Concrete, Journal of the faculty of engineering, The University of Tokio, No 3, 1992
- /4/ Grube, H. Rickert, J.: Selbstverdichtender Beton – ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems. In: Beton 49, Heft 4, 1999.
- /5/ Yurugi, M.: Application of Self-Compacting Concrete for Construction in Japan. In: Kajima Technical Research Institute, Kajima Corp., Japan 1998.
- /6/ Meyer, L.: Unter die Lupe genommen – Selbstverdichtender Beton in der Fertigteilpraxis. In: Bauwirtschaft Nr. 5, 2000.
- /7/ Brantz, H.: Hochleistungsbeton, Erfahrungen und Ausblick. 45. Ulmer Beton- und Fertigteiltag. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik, Nr. 1, Bauverlag Wiesbaden, 2001.
- /8/ Reinhardt et al: Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB) Entwurf 11/2000 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin, 2000.
- /9/ Ertinghausen, H.: Über den Schalungsdruck von Frischbeton, Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TU Braunschweig, Heft 5, Braunschweig, März 1965
- /10/ Graf, O.: Schalungsdruck beim Betonieren, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 135, Berlin, 1960
- /11/ Noack: Ergebnisse neuer Forschungsarbeiten über die Eigenschaften des Zementbetons und Versuche zur Bestimmung des Seitendrucks, Dissertation TH-Dresden, 1919
- /12/ DIN 18 218, Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen, September 1980
- /13/ DIN 1045, Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, Ausgabe Juli 1988
- /14/ Ozawa, K.: Proceedings of “The Second International Symposium” of Self – Compacting – Concrete, COMS Engineering Corporation, Fukui/ Japan, 2001.

- /15/ König, G.: Selbstverdichtender Beton - Innovation im Bauwesen Bauwerk Berlin, 2001.
- /16/ Friedle, R.: Schalungsdruck beim Einsatz von selbstverdichtendem Beton – SCC, Beton+Zement, Heft 28, 2001
- /17/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton. Juli 2001, Berlin.
- /18/ Französische Norm NFP 93-350, “Banches industrialisées pour ouvrages en béton”, Juni 1995
- /19/ CIRIA research report Nr. 1, The pressure of concrete in formwork “, Construction Industry Research and Information Association, London, 42 pp, 1965
- /20/ CIRIA research report Nr. 108, Clear, C.A., Harison, T.A., The pressure of concrete in formwork “, Construction Industry Research and Information Association, London, 1985
- /21/ Skarendahl, A.: Self-Compacting-Concrete in Sweden, In: Proceedings of “International Symposium” of Self – Compacting – Concrete, Kochi/ Japan, 1998
- /22/ Jansen, H.A.: Versuche über Getreidedruck in Silozellen, VDI Zeitschrift, V. 39, pp. 1045-1049, August 1895
- /23/ DIN 1055 T6, Lastannahmen für Bauten, Lasten in Silozellen, Mai 1987
- /24/ Entwurf DIN 1055 T6, Einwirkungen auf Tragwerke, Einwirkungen aus Silos und Flüssigkeitsbehälter, Mai 1987
- /25/ Specht, M.: Der Frischbetondruck nach DIN 18 218 – die Grundlagen und die wichtigsten Festlegungen, Bautechnik 8/1981, Seiten 252 - 261
- /26/ Courtois P.D. u. a. (ACI-Committee 347): Recommended Practice for Concrete Formwork (ACU 347-78), ACI Journal Sept. 1977, Seiten 397-434
- /27/ Specht, M.: Die Belastung von Schalung und Rüstung durch Frischbeton, Werner-Verlag, Düsseldorf 1973
- /28/ Specht, M.: Theorie des Frischbetondrucks – gegenwärtiger Stand und ungelöste Probleme, Bautechnik, Berlin 1987
- /29/ Arconis Spezial: Self Compacting Concrete, Selbstverdichtender Beton - Entwicklung, Projekte, Zukunft. Arconis Spezialheft 1, Juli 2000.
- /30/ DIN 1045-1, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1 Bemessung und Konstruktion, Ausgabe Juli 2001

- /31/ DIN EN 206-1, Beton - Teil 1 Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität  
Deutsche Fassung EN 206-1, Ausgabe Juli 2001
- /32/ DIN EN 196-3, Prüfverfahren für Zement, Bestimmung der Erstarrungszeiten und der  
Raumbeständigkeit, Ausgabe 1994
- /33/ Stark, J.: Anorganische Bindemittel, Zement – Kalk – Spezielle Bindemittel, Schriften  
der Bauhaus-Universität Weimar, Heft 109, Ausgabe 1998
- /34/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton - Heft 422, Prüfung von Beton - Empfehlungen  
und Hinweise, als Ergänzung zu DIN 1048, Berlin 1991
- /35/ DIN 1048 – Prüfverfahren für Beton, Ausgabe 1991
- /36/ de Larrard, F.: Concrete Mixture-Proportion – Scientific Approach, E & FN SPON,  
London, 1999

## **Danksagung:**

Hiermit möchten wir uns recht herzlich beim Deutschen Ausschuss für Stahlbeton für die Ermöglichung des Forschungsvorhabens bedanken.

Bei der praktischen Durchführung wurden wir von der Hochtief AG – Spannbetonwerk Stockstadt unterstützt. Hier gilt der Dank für die hervorragende Zusammenarbeit insbesondere Herrn Dipl.- Ing. E. Müller- Falcke, Herrn Dipl.- Ing. T. Rieger und Herrn Dipl.- Ing. Bayer.

Vielen Dank auch Frau Dipl.-Ing. F. Tauscher, Herrn BauDir Dr.-Ing. Y. Efes, Herrn Dipl.-Ing. L. Mayer und Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt für die fachliche Begleitung innerhalb der Beratergruppe.



# Anhang

## Protokolle der Frischbetoneigenschaften

HOCHTIEF		BETON		Datum : 07.03.2002 Bauteil 1a / VR1-8	
Frischbetonprüfung					
Niederlassung : Hochtief Building Fertigteilebau GmbH, Stockstadt am Rhein.					
Bauteilart / Pos.Nr. Wandplatten / Stabteile .					
Betonrezeptur Nr. 9 - SVB		Betonfestigkeitsklasse : B 55		Konsistenz : F6	
Entnahmestelle / Uhrzeit : Form / 11 °° Uhr TB-Werk : Eigene Mischanlage .					
Lufttemperatur : 17 ° C			Frischbetontemperatur : 17,4 ° C		
Konsistenz : Verdichtungsmaß $v = 40 / (40-s)$		Ausbreitmaß $a =$		74	
Beurteilung nach Augenschein : $t_{30} = 2,5 s$					
zusammenhängend : x		zerfallend :		wasserabsonderd :	
Frischbetonrohddichte					
Verdichtungsgerät : unverdichtet			Verdichtungsdauer : unverdichtet		
Probekörperbezeichnung	25/2	26/2	27/2		
Gewicht Form+Beton	kg 9,911	9,944	9,997		
Gewicht Form	kg 1,900	1,897	1,897		
Gewicht Beton	kg 8,011	8,047	8,100		
Volumen Form	dm³ 3,375	3,375	3,375		
Rohddichte einzeln	kg/dm³ 2,374	2,384	2,400		
Rohddichte im Mittel	kg/dm³ 2,386				
Wasserzementwert gemäß Darrversuch und Luftporengehalt					
Darrversuch			LP - Topf		
Betongewicht feucht	g 5000	Gewicht Form+Beton		kg	
Betongewicht trocken	g 4579	Gewicht Form		kg	
Wassergewicht in der Probe	g 421	Gewicht Beton		kg	
Gesamtwassergehalt	kg / m³ 200,9	Volumen Form		dm³	
Kernfeuchtegehalt	kg / m³	Rohddichte		kg / dm³	
Wirksamer Wassergehalt	kg / m³	Luftporengehalt Vol.-%.			
Wasserzementwert W / Z	0,52		1,0%		
HOCHTIEF Fertigteilebau GmbH, Niederlassung Stockstadt / Rhein. Datum : 07.03.2002					

HOCHTIEF		BETON		Datum : 05.03.2002 Bauteil 2a / VR 1-7	
Frischbetonprüfung					
Niederlassung : Hochtief Building Fertigteilebau GmbH, Stockstadt am Rhein.					
Bauteilart / Pos.Nr. Wandplatten / Stabteile .					
Betonrezeptur Nr. 9 - SVB		Betonfestigkeitsklasse : B 55		Konsistenz : F6	
Entnahmestelle / Uhrzeit : Form / 10 °° Uhr TB-Werk : Eigene Mischanlage .					
Lufttemperatur : 17 ° C			Frischbetontemperatur : 19,5 ° C		
Konsistenz : Verdichtungsmaß $v = 40 / (40-s)$		Ausbreitmaß $a =$		75,5	
Beurteilung nach Augenschein : $t_{30} = 2,0 s$					
zusammenhängend : x		zerfallend :		wasserabsonderd :	
Frischbetonrohddichte					
Verdichtungsgerät : unverdichtet			Verdichtungsdauer : unverdichtet		
Probekörperbezeichnung	22/2	23/2	24/2		
Gewicht Form+Beton	kg				
Gewicht Form	kg				
Gewicht Beton	kg 8,024	0,000	0,000		
Volumen Form	dm³ 3,375	3,375	3,375		
Rohddichte einzeln	kg/dm³ 2,377	0,000	0,000		
Rohddichte im Mittel	kg/dm³ 2,377				
Wasserzementwert gemäß Darrversuch und Luftporengehalt					
Darrversuch			LP - Topf		
Betongewicht feucht	g 5000	Gewicht Form+Beton		kg	
Betongewicht trocken	g 4586	Gewicht Form		kg	
Wassergewicht in der Probe	g 414	Gewicht Beton		kg	
Gesamtwassergehalt	kg / m³ 196,8	Volumen Form		dm³	
Kernfeuchtegehalt	kg / m³	Rohddichte		kg / dm³	
Wirksamer Wassergehalt	kg / m³	Luftporengehalt Vol.-%.			
Wasserzementwert W / Z	0,51		1,0%		
HOCHTIEF Fertigteilebau GmbH, Niederlassung Stockstadt / Rhein. Datum : 05.03.2002					

HOCHTIEF		BETON		Datum : 30.01.2002 Bauteil 3a / VR1-4	
Frischbetonprüfung					
Niederlassung : Hochtief Building Fertigteilebau GmbH, Stockstadt am Rhein.					
Bauteilart / Pos.Nr. Wandplatten / Stabteile .					
Betonrezeptur Nr. 9 - SVB		Betonfestigkeitsklasse : B 55		Konsistenz : F6	
Entnahmestelle / Uhrzeit : Form / 10 °° Uhr TB-Werk : Eigene Mischanlage .					
Lufttemperatur : 18 ° C			Frischbetontemperatur : 19 ° C		
Konsistenz : Verdichtungsmaß $v = 40 / (40-s)$		Ausbreitmaß $a =$		75	
Beurteilung nach Augenschein : $t_{30} = 2,0 s$					
zusammenhängend : x		zerfallend :		wasserabsonderd :	
Frischbetonrohddichte					
Verdichtungsgerät : unverdichtet			Verdichtungsdauer : unverdichtet		
Probekörperbezeichnung	13/2	14/2	15/2		
Gewicht Form+Beton	kg 9,917	9,927	9,912		
Gewicht Form	kg 1,897	1,899	1,897		
Gewicht Beton	kg 8,020	8,028	8,015		
Volumen Form	dm³ 3,375	3,375	3,375		
Rohddichte einzeln	kg/dm³ 2,376	2,379	2,375		
Rohddichte im Mittel	kg/dm³ 2,377				
Wasserzementwert gemäß Darrversuch und Luftporengehalt					
Darrversuch			LP - Topf		
Betongewicht feucht	g 5000	Gewicht Form+Beton		kg	
Betongewicht trocken	g 4592	Gewicht Form		kg	
Wassergewicht in der Probe	g 408	Gewicht Beton		kg	
Gesamtwassergehalt	kg / m³ 193,9	Volumen Form		dm³	
Kernfeuchtegehalt	kg / m³	Rohddichte		kg / dm³	
Wirksamer Wassergehalt	kg / m³	Luftporengehalt Vol.-%.			
Wasserzementwert W / Z	0,50		0,8%		
HOCHTIEF Fertigteilebau GmbH, Niederlassung Stockstadt / Rhein. Datum : 30.01.2002					

HOCHTIEF		BETON		Datum : 23.01.2002 Bauteil 4a / VR 1-2	
Frischbetonprüfung					
Niederlassung : Hochtief Building Fertigteilebau GmbH, Stockstadt am Rhein.					
Bauteilart / Pos.Nr. Wandplatten / Stabteile .					
Betonrezeptur Nr. 9 - SVB		Betonfestigkeitsklasse : B 55		Konsistenz : F6	
Entnahmestelle / Uhrzeit : Form / 10 °° Uhr TB-Werk : Eigene Mischanlage .					
Lufttemperatur : 19 ° C			Frischbetontemperatur : 16 ° C		
Konsistenz : Verdichtungsmaß $v = 40 / (40-s)$		Ausbreitmaß $a =$		74	
Beurteilung nach Augenschein : FK - 61 - 0,50 dm³ / 50 cm - 2 s					
zusammenhängend : x		zerfallend :		wasserabsonderd :	
Frischbetonrohddichte					
Verdichtungsgerät : unverdichtet			Verdichtungsdauer : unverdichtet		
Probekörperbezeichnung	7/2	8/2	9/2		
Gewicht Form+Beton	kg 9,832	9,895	9,865		
Gewicht Form	kg 1,897	1,899	1,897		
Gewicht Beton	kg 7,935	7,996	7,968		
Volumen Form	dm³ 3,375	3,375	3,375		
Rohddichte einzeln	kg/dm³ 2,351	2,369	2,361		
Rohddichte im Mittel	kg/dm³ 2,360				
Wasserzementwert gemäß Darrversuch und Luftporengehalt					
Darrversuch			LP - Topf		
Betongewicht feucht	g 5000	Gewicht Form+Beton		kg	
Betongewicht trocken	g 4582	Gewicht Form		kg	
Wassergewicht in der Probe	g 418	Gewicht Beton		kg	
Gesamtwassergehalt	kg / m³ 197,3	Volumen Form		dm³	
Kernfeuchtegehalt	kg / m³	Rohddichte		kg / dm³	
Wirksamer Wassergehalt	kg / m³	Luftporengehalt Vol.-%.			
Wasserzementwert W / Z	0,51		1,1%		
HOCHTIEF Fertigteilebau GmbH, Niederlassung Stockstadt / Rhein. Datum : 23.01.2002					

HOCHTIEF		BETON		Datum: 21.01.2002 Bauteil 5a/ VR 1-1			
		Frischbetonprüfung					
Niederlassung: Hochtief Building Fertigteilbau GmbH, Stockstadt am Rhein.							
Bauteilart / Pos.Nr. Wandplatten / Stabteile							
Betonrezeptur Nr. 9 - SVB		Betonfestigkeitsklasse: B 55		Konsistenz: F6			
Entnahmestelle / Uhrzeit: Form / 13 °° Uhr		TB-Werk: Eigene Mischanlage					
Lufttemperatur: 19 ° C		Frischbetontemperatur: 17 ° C					
Konsistenz: Verdichtungsmaß v = 40 / (40-s)		Ausbreitmaß a = 74					
Beurteilung nach Augenschein: t <sub>sp</sub> = 3,0 s							
zusammenhängend: x		zerfallend:		wasserabsonderd:			
Frischbetonrohddichte							
Verdichtungsgerät: unverdichtet			Verdichtungsdauer: unverdichtet				
Probekörperbezeichnung	1/2	2/2	3/2	4/2	5/2	6/2	
Gewicht Form+Beton	kg	12,482	12,502	12,683	9,842	9,872	9,946
Gewicht Form	kg	4,478	4,482	4,682	1,896	1,899	1,897
Gewicht Beton	kg	8,004	8,020	8,001	7,946	7,973	8,049
Volumen Form	dm³	3,375	3,375	3,375	3,375	3,375	3,375
Rohddichte einzeln	kg/dm³	2,372	2,376	2,371	2,354	2,362	2,385
Rohddichte im Mittel	kg/dm³	2,370					
Wasserelementwert gemäß Darrversuch und Luftporengehalt							
Darrversuch			LP - Topf				
Betongewicht feucht	g	5000	Gewicht Form+Beton	kg			
Betongewicht trocken	g	4612	Gewicht Form	kg			
Wassergewicht in der Probe	g	388	Gewicht Beton	kg			
Gesamtwassergehalt	kg / m³	183,9	Volumen Form	dm³			
Kernfeuchtegehalt	kg / m³		Rohddichte	kg / dm³			
Wirksamer Wassergehalt	kg / m³		Luftporengehalt Vol.-%.				
Wasserelementwert W / Z		0,48	1,0%				
HOCHTIEF Fertigteilbau GmbH, Niederlassung Stockstadt / Rhein. Datum: 21.01.2002							

HOCHTIEF		BETON		Datum: 28.01.2002 Bauteil 2b/ VR 1-3		
		Frischbetonprüfung				
Niederlassung: Hochtief Building Fertigteilbau GmbH, Stockstadt am Rhein.						
Bauteilart / Pos.Nr. Wandplatten / Stabteile						
Betonrezeptur Nr. 9 - SVB		Betonfestigkeitsklasse: B 55		Konsistenz: F6		
Entnahmestelle / Uhrzeit: Form / 11 °° Uhr		TB-Werk: Eigene Mischanlage				
Lufttemperatur: 18 ° C		Frischbetontemperatur: 20 ° C				
Konsistenz: Verdichtungsmaß v = 40 / (40-s)		Ausbreitmaß a = 71,5				
Beurteilung nach Augenschein: t <sub>sp</sub> = 3,0 s						
zusammenhängend: x		zerfallend:		wasserabsonderd:		
Frischbetonrohddichte						
Verdichtungsgerät: unverdichtet			Verdichtungsdauer: unverdichtet			
Probekörperbezeichnung	10/2	11/2	12/2			
Gewicht Form+Beton	kg	9,873	9,864	9,882		
Gewicht Form	kg	1,897	1,899	1,897		
Gewicht Beton	kg	7,976	7,965	7,985		
Volumen Form	dm³	3,375	3,375	3,375		
Rohddichte einzeln	kg/dm³	2,363	2,360	2,366		
Rohddichte im Mittel	kg/dm³	2,363				
Wasserelementwert gemäß Darrversuch und Luftporengehalt						
Darrversuch			LP - Topf			
Betongewicht feucht	g	5000	Gewicht Form+Beton	kg		
Betongewicht trocken	g	4600	Gewicht Form	kg		
Wassergewicht in der Probe	g	400	Gewicht Beton	kg		
Gesamtwassergehalt	kg / m³	189,0	Volumen Form	dm³		
Kernfeuchtegehalt	kg / m³		Rohddichte	kg / dm³		
Wirksamer Wassergehalt	kg / m³		Luftporengehalt Vol.-%.			
Wasserelementwert W / Z		0,49	1,2% - 1,3%			
HOCHTIEF Fertigteilbau GmbH, Niederlassung Stockstadt / Rhein. Datum: 28.01.2002						

HOCHTIEF		BETON		Datum: 19.03.2002 Bauteil 2c/ VR 1-10	
		Frischbetonprüfung			
Niederlassung: Hochtief Building Fertigteilbau GmbH, Stockstadt am Rhein.					
Bauteilart / Pos.Nr. Wandplatten / Stabteile					
Betonrezeptur Nr. 9 - SVB		Betonfestigkeitsklasse: B 55		Konsistenz: F6	
Entnahmestelle / Uhrzeit: Form / 14 °° Uhr		TB-Werk: Eigene Mischanlage			
Lufttemperatur: 19 ° C		Frischbetontemperatur: 20,4 ° C			
Konsistenz: Verdichtungsmaß v = 40 / (40-s)		Ausbreitmaß a = 61			
Beurteilung nach Augenschein: t <sub>sp</sub> = 5,0 s					
zusammenhängend: x		zerfallend:		wasserabsonderd:	
Frischbetonrohddichte					
Verdichtungsgerät: unverdichtet			Verdichtungsdauer: unverdichtet		
Probekörperbezeichnung	31/2	32/2	33/2		
Gewicht Form+Beton	kg	9,916	9,940	9,977	
Gewicht Form	kg	1,900	1,897	1,897	
Gewicht Beton	kg	8,016	8,043	8,080	
Volumen Form	dm³	3,375	3,375	3,375	
Rohddichte einzeln	kg/dm³	2,375	2,383	2,394	
Rohddichte im Mittel	kg/dm³	2,384			
Wasserelementwert gemäß Darrversuch und Luftporengehalt					
Darrversuch			LP - Topf		
Betongewicht feucht	g	5000	Gewicht Form+Beton	kg	
Betongewicht trocken	g	4601	Gewicht Form	kg	
Wassergewicht in der Probe	g	399	Gewicht Beton	kg	
Gesamtwassergehalt	kg / m³	190,3	Volumen Form	dm³	
Kernfeuchtegehalt	kg / m³		Rohddichte	kg / dm³	
Wirksamer Wassergehalt	kg / m³		Luftporengehalt Vol.-%.		
Wasserelementwert W / Z		0,49	1,6%		
HOCHTIEF Fertigteilbau GmbH, Niederlassung Stockstadt / Rhein. Datum: 19.03.2002					

HOCHTIEF		BETON		Datum: 18.03.2002 Bauteil 3b/ VR 1-9	
		Frischbetonprüfung			
Niederlassung: Hochtief Building Fertigteilbau GmbH, Stockstadt am Rhein.					
Bauteilart / Pos.Nr. Wandplatten / Stabteile					
Betonrezeptur Nr. 9 - SVB		Betonfestigkeitsklasse: B 55		Konsistenz: F6	
Entnahmestelle / Uhrzeit: Form / 11 °° Uhr		TB-Werk: Eigene Mischanlage			
Lufttemperatur: 20 ° C		Frischbetontemperatur: 19,3 ° C			
Konsistenz: Verdichtungsmaß v = 40 / (40-s)		Ausbreitmaß a = 69,5			
Beurteilung nach Augenschein: t <sub>sp</sub> = 3,0 s					
zusammenhängend: x		zerfallend:		wasserabsonderd:	
Frischbetonrohddichte					
Verdichtungsgerät: unverdichtet			Verdichtungsdauer: unverdichtet		
Probekörperbezeichnung	28/2	29/2	30/2		
Gewicht Form+Beton	kg	9,916	9,958	9,963	
Gewicht Form	kg	1,900	1,897	1,897	
Gewicht Beton	kg	8,016	8,061	8,066	
Volumen Form	dm³	3,375	3,375	3,375	
Rohddichte einzeln	kg/dm³	2,375	2,388	2,390	
Rohddichte im Mittel	kg/dm³	2,384			
Wasserelementwert gemäß Darrversuch und Luftporengehalt					
Darrversuch			LP - Topf		
Betongewicht feucht	g	5000	Gewicht Form+Beton	kg	
Betongewicht trocken	g	4598	Gewicht Form	kg	
Wassergewicht in der Probe	g	402	Gewicht Beton	kg	
Gesamtwassergehalt	kg / m³	191,7	Volumen Form	dm³	
Kernfeuchtegehalt	kg / m³		Rohddichte	kg / dm³	
Wirksamer Wassergehalt	kg / m³		Luftporengehalt Vol.-%.		
Wasserelementwert W / Z		0,50	1,4%		
HOCHTIEF Fertigteilbau GmbH, Niederlassung Stockstadt / Rhein. Datum: 18.03.2002					

HOCHTIEF		BETON		Datum: 12.02.2002 Bauteil 4c/ VR 1-5	
		Frischbetonprüfung			
Niederlassung: Hochtief Building Fertigteilebau GmbH, Stockstadt am Rhein.					
Bauteilart / Pos.Nr. Wandplatten / Stabteile					
Betonzusatz Nr. 9- SVB		Betondeckungsstärke: B 55		Konsistenz: F6	
Entnahmestelle / Uhrzeit: Form / 10 <sup>00</sup> Uhr		TB-Werk: Eigene Mischanlage			
Lufttemperatur: 18 °C		Frischbetontemperatur: 19 °C			
Konsistenz: Verdichtungsmaß v = 40 / (40-s)		Ausbreitmaß a =		55	
Beurteilung nach Augenschein:					
zusammenhängend: x		zerfallend:		wasserabsondernd:	
Frischbetonrohddichte					
Verdichtungsgerät: unverdichtet			Verdichtungsdauer: unverdichtet		
Probekörperbezeichnung					
Gewicht Form+Beton	kg	9,562	9,596	9,627	
Gewicht Form	kg	1,897	1,899	1,897	
Gewicht Beton	kg	7,665	7,697	7,730	
Volumen Form	dm <sup>3</sup>	3,375	3,375	3,375	
Rohdichte einzeln	kg/dm <sup>3</sup>	2,271	2,281	2,290	
Rohdichte im Mittel	kg/dm <sup>3</sup>	2,281			
Wasserzementwert gemäß Darrversuch und Luftporengehalt					
Darrversuch			LP - Topf		
Betongewicht feucht	g	5000	Gewicht Form+Beton	kg	
Betongewicht trocken	g	4630	Gewicht Form	kg	
Wassergewicht in der Probe	g	370	Gewicht Beton	kg	
Gesamtwassergehalt	kg / m <sup>3</sup>	168,8	Volumen Form	dm <sup>3</sup>	
Kernfeuchtegehalt	kg / m <sup>3</sup>		Rohdichte	kg / dm <sup>3</sup>	
Wirksamer Wassergehalt	kg / m <sup>3</sup>		Luftporengehalt Vol.-%		
Wasserzementwert W / Z	0,44		4,5 %		
HOCHTIEF Fertigteilebau GmbH, Niederlassung Stockstadt / Rhein. Datum : 12.02.2002					

HOCHTIEF		BETON		Datum: 22.05.2002 Bauteil 2b/ VR 1-11	
		Frischbetonprüfung			
Niederlassung: Hochtief Building Fertigteilebau GmbH, Stockstadt am Rhein.					
Bauteilart / Pos.Nr. Wandplatten / Stabteile / Spannbeton					
Betonzusatz Nr. 9- SVB		Betondeckungsstärke: B 55		Konsistenz: SVB	
Entnahmestelle / Uhrzeit: Form / 11 <sup>00</sup> Uhr		TB-Werk: Eigene Mischanlage			
Lufttemperatur: 26 °C		Frischbetontemperatur: 26,3 °C			
Konsistenz: Verdichtungsmaß v = 40 / (40-s)		Ausbreitmaß a =		71	
Beurteilung nach Augenschein:					
zusammenhängend: x		zerfallend:		wasserabsondernd: t <sub>90</sub> = 3,0 s	
Frischbetonrohddichte					
Verdichtungsgerät: unverdichtet			Verdichtungsdauer: unverdichtet		
Probekörperbezeichnung					
Gewicht Form+Beton	kg	9,953	9,969	9,989	
Gewicht Form	kg	1,898	1,896	1,897	
Gewicht Beton	kg	8,055	8,073	8,092	
Volumen Form	dm <sup>3</sup>	3,375	3,375	3,375	
Rohdichte einzeln	kg/dm <sup>3</sup>	2,387	2,392	2,398	
Rohdichte im Mittel	kg/dm <sup>3</sup>	2,392			
Wasserzementwert gemäß Darrversuch und Luftporengehalt					
Darrversuch			LP - Topf		
Betongewicht feucht	g	5000	Gewicht Form+Beton	kg	
Betongewicht trocken	g	4613	Gewicht Form	kg	
Wassergewicht in der Probe	g	387	Gewicht Beton	kg	
Gesamtwassergehalt	kg / m <sup>3</sup>	185,1	Volumen Form	dm <sup>3</sup>	
Kernfeuchtegehalt	kg / m <sup>3</sup>		Rohdichte	kg / dm <sup>3</sup>	
Wirksamer Wassergehalt	kg / m <sup>3</sup>		Luftporengehalt Vol.-%		
Wasserzementwert W / Z	0,48		1,5 %		
HOCHTIEF Fertigteilebau GmbH, Niederlassung Stockstadt / Rhein. Datum : 22.05.2002					

HOCHTIEF		BETON		Datum: 15.02.2002 Bauteil 5r/ VR 1-6	
		Frischbetonprüfung			
Niederlassung: Hochtief Building Fertigteilebau GmbH, Stockstadt am Rhein.					
Bauteilart / Pos.Nr. Wandplatten / Stabteile ( O - Mischung )					
Betonzusatz Nr. 9- SVB		Betondeckungsstärke: B 55		Konsistenz: KR	
Entnahmestelle / Uhrzeit: Form / 10 <sup>00</sup> Uhr		TB-Werk: Eigene Mischanlage			
Lufttemperatur: 17 °C		Frischbetontemperatur: 18,6 °C			
Konsistenz: Verdichtungsmaß v = 40 / (40-s)		Ausbreitmaß a =		47,5	
Beurteilung nach Augenschein:					
zusammenhängend: x		zerfallend:		wasserabsondernd:	
Frischbetonrohddichte					
Verdichtungsgerät: unverdichtet			Verdichtungsdauer: unverdichtet		
Probekörperbezeichnung					
Gewicht Form+Beton	kg	12,395	12,460	12,659	
Gewicht Form	kg	4,478	4,482	4,682	
Gewicht Beton	kg	7,917	7,978	7,977	
Volumen Form	dm <sup>3</sup>	3,375	3,375	3,375	
Rohdichte einzeln	kg/dm <sup>3</sup>	2,346	2,364	2,364	
Rohdichte im Mittel	kg/dm <sup>3</sup>	2,358			
Wasserzementwert gemäß Darrversuch und Luftporengehalt					
Darrversuch			LP - Topf		
Betongewicht feucht	g	2000	Gewicht Form+Beton	kg	
Betongewicht trocken	g	1839	Gewicht Form	kg	
Wassergewicht in der Probe	g	161	Gewicht Beton	kg	
Gesamtwassergehalt	kg / m <sup>3</sup>	189,8	Volumen Form	dm <sup>3</sup>	
Kernfeuchtegehalt	kg / m <sup>3</sup>		Rohdichte	kg / dm <sup>3</sup>	
Wirksamer Wassergehalt	kg / m <sup>3</sup>		Luftporengehalt Vol.-%		
Wasserzementwert W / Z	0,49		1,4 %		
HOCHTIEF Fertigteilebau GmbH, Niederlassung Stockstadt / Rhein. Datum : 15.02.2002					

HOCHTIEF		BETON		Datum: 06.06.2002 Konsistenzversuch/Erstarrungszeiten	
		Frischbetonprüfung			
Niederlassung: Hochtief Building Fertigteilebau GmbH, Stockstadt am Rhein.					
Bauteilart / Pos.Nr. Wandplatten / Stabteile / Spannbeton					
Betonzusatz Nr. 9- SVB		Betondeckungsstärke: B 55		Konsistenz: SVB	
Entnahmestelle / Uhrzeit: Form / 10 <sup>00</sup> Uhr		TB-Werk: Eigene Mischanlage			
Lufttemperatur: 24 °C		Frischbetontemperatur: 26 °C			
Konsistenz: Verdichtungsmaß v = 40 / (40-s)		Ausbreitmaß a =		74	
Beurteilung nach Augenschein:					
zusammenhängend: x		zerfallend:		wasserabsondernd:	
Frischbetonrohddichte					
Verdichtungsgerät: unverdichtet			Verdichtungsdauer: unverdichtet		
Probekörperbezeichnung					
Gewicht Form+Beton	kg	9,954	9,922	9,892	
Gewicht Form	kg	1,899	1,898	1,897	
Gewicht Beton	kg	8,055	8,024	7,995	
Volumen Form	dm <sup>3</sup>	3,375	3,375	3,375	
Rohdichte einzeln	kg/dm <sup>3</sup>	2,387	2,377	2,369	
Rohdichte im Mittel	kg/dm <sup>3</sup>	2,378			
Wasserzementwert gemäß Darrversuch und Luftporengehalt					
Darrversuch			LP - Topf		
Betongewicht feucht	g	5000	Gewicht Form+Beton	kg	
Betongewicht trocken	g	4617	Gewicht Form	kg	
Wassergewicht in der Probe	g	383	Gewicht Beton	kg	
Gesamtwassergehalt	kg / m <sup>3</sup>	182,1	Volumen Form	dm <sup>3</sup>	
Kernfeuchtegehalt	kg / m <sup>3</sup>		Rohdichte	kg / dm <sup>3</sup>	
Wirksamer Wassergehalt	kg / m <sup>3</sup>		Luftporengehalt Vol.-%		
Wasserzementwert W / Z	0,47		1,4 %		
HOCHTIEF Fertigteilebau GmbH, Niederlassung Stockstadt / Rhein. Datum : 06.06.2002					

## Mischprotokolle

**Bauteil 1a**  
 Protokollnr.: 20540 N07.03.02 / 11:19:31  
 Werk : 1  
 Kunde : 0  
 Baustelle : 2 Bedarfstelle 2  
 Fahrzeug : 999 / Fertigteilwerk  
 Rezeptsorte : 19 / 19 / 19  
 Konsistenz : KF / KF  
 Bestellmenge : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Lieferung : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Wetter :  
 Auftragnr. : 9999 / 2 / 14

Güte : B55 / B55 Produktgruppe : 9  
 W/Z Faktor : 0,49 Körnung : 0/11  
 geliefert : 2,00 m<sup>3</sup> Rest : 0,00 m<sup>3</sup>  
 Rückmenge : 0,00 m<sup>3</sup> Mischer : 1  
 Restwasserdichte: 1,04 kg/dm<sup>3</sup> Feststoffdichte : 2,20 kg/dm<sup>3</sup>  
 Bedienername : Ameruoso

Charge 8/11 Spl. 2/8 Rhein 0/2 Rhein				CEM IIA/S 52,5R	SFA	FK 61	----- W a s s e r -----				
							Feststoff	Was.korr.	Ist	Frischwas	Hygromet
							Feuchte	Spülwas.	Soll		WZ(F)-Fa
2,00	<00970kg>	<00900kg>	<01660kg>	<00701kg>	<00178kg>	<009,50kg>	0kg	0kg	00027kg	00026kg	170kg
		3,00%	5,1%				109kg	4kg	00027kg		0,46
Ist	00970kg	00900kg	01660kg	00701kg	00178kg	009,50kg	0kg	0kg	00027kg	00026kg	170kg
Soll	00968kg	00902kg	01679kg	00700kg	00180kg	009,46kg	109kg	4kg	00027kg		
Diff	0,2 %	-0,2 %	-1,1 %	0,1 %	-1,1 %	0,4 %					0,0 %

Betontemperatur: 16,1 °C

**Bauteil 2a**  
 Protokollnr.: 20494 N05.03.02 / 10:40:01  
 Werk : 1  
 Kunde : 0  
 Baustelle : 2 Bedarfstelle 2  
 Fahrzeug : 999 / Fertigteilwerk  
 Rezeptsorte : 19 / 19 / 19  
 Konsistenz : KF / KF  
 Bestellmenge : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Lieferung : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Wetter :  
 Auftragnr. : 9999 / 2 / 1

Güte : B55 / B55 Produktgruppe : 9  
 W/Z Faktor : 0,49 Körnung : 0/11  
 geliefert : 2,00 m<sup>3</sup> Rest : 0,00 m<sup>3</sup>  
 Rückmenge : 0,00 m<sup>3</sup> Mischer : 1  
 Restwasserdichte: 1,04 kg/dm<sup>3</sup> Feststoffdichte : 2,20 kg/dm<sup>3</sup>  
 Bedienername : Ameruoso

Charge 8/11 Spl. 2/8 Rhein 0/2 Rhein				CEM IIA/S 52,5R	SFA	FK 61	----- W a s s e r -----				
							Feststoff	Was.korr.	Ist	Frischwas	Hygromet
							Feuchte	Spülwas.	Soll		WZ(F)-Fa
2,00	<00960kg>	<00900kg>	<01640kg>	<00699kg>	<00178kg>	<010,00kg>	0kg	0kg	00041kg	00040kg	192kg
		3,00%	4,3%				95kg	4kg	00041kg		0,49
Ist	00960kg	00900kg	01640kg	00699kg	00178kg	010,00kg	0kg	0kg	00041kg	00040kg	192kg
Soll	00968kg	00902kg	01665kg	00700kg	00180kg	009,98kg	95kg	4kg	00041kg		
Diff	-0,6 %	-0,2 %	-1,5 %	-0,1 %	-1,1 %	0,2 %					0,0 %

Betontemperatur: 14,5 °C

**Bauteil 3a**  
 Protokollnr.: 19804/ N28.01.02 / 10:45:33  
 Werk : 1  
 Kunde : 0  
 Baustelle : 2 Bedarfstelle 2  
 Fahrzeug : 999 / Fertigteilwerk  
 Rezeptsorte : 19 / 19 / 19  
 Konsistenz : KF / KF  
 Bestellmenge : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Lieferung : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Wetter :  
 Auftragnr. : 9999 / 2 / 6

Güte : B55 / B55 Produktgruppe : 9  
 W/Z Faktor : 0,49 Körnung : 0/11  
 geliefert : 2,00 m<sup>3</sup> Rest : 0,00 m<sup>3</sup>  
 Rückmenge : 0,00 m<sup>3</sup> Mischer : 1  
 Restwasserdichte: 1,04 kg/dm<sup>3</sup> Feststoffdichte : 2,20 kg/dm<sup>3</sup>  
 Bedienername : Ameruoso

Charge 8/11 Spl. 2/8 Rhein 0/2 Rhein				CEM IIA/S 52,5R	SFA	FK 61	----- W a s s e r -----				
							Feststoff	Was.korr.	Ist	Frischwas	Hygromet
							Feuchte	Spülwas.	Soll		WZ(F)-
2,00	<00970kg>	<00900kg>	<01660kg>	<00700kg>	<00179kg>	<010,00kg>	0kg	0kg	00056kg	00056kg	174kg
		3,00%	4,5%				98kg	2kg	00060kg		0,4
Ist	00970kg	00900kg	01660kg	00700kg	00179kg	010,00kg	0kg	0kg	00056kg	00056kg	174kg
Soll	00968kg	00902kg	01668kg	00700kg	00180kg	009,98kg	98kg	2kg	00060kg		
Diff	0,2 %	-0,2 %	-0,4 %	0,0 %	-0,5 %	0,2 %					-3,3 %

Betontemperatur: 19,2 °C

**Bauteil 4a**  
 Protokollnr.: 19695/ N23.01.02 / 09:45:54  
 Werk : 1  
 Kunde : 0  
 Baustelle : 2 Bedarfstelle 2  
 Fahrzeug : 999 / Fertigteilwerk  
 Rezeptsorte : 19 / 19 / 19  
 Konsistenz : KF / KF  
 Bestellmenge : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Lieferung : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Wetter :  
 Auftragnr. : 9999 / 2 / 2

Güte : B55 / B55 Produktgruppe : 9  
 W/Z Faktor : 0,49 Körnung : 0/11  
 geliefert : 2,00 m<sup>3</sup> Rest : 0,00 m<sup>3</sup>  
 Rückmenge : 0,00 m<sup>3</sup> Mischer : 1  
 Restwasserdichte: 1,04 kg/dm<sup>3</sup> Feststoffdichte : 2,20 kg/dm<sup>3</sup>  
 Bedienername : Ameruoso

Charge 8/11 Spl. 2/8 Rhein 0/2 Rhein				CEM IIA/S 52,5R	SFA	FK 61	----- W a s s e r -----				
							Feststoff	Was.korr.	Ist	Frischwas	Hygromet
							Feuchte	Spülwas.	Soll		WZ(F)-
2,00	<00970kg>	<00900kg>	<01680kg>	<00701kg>	<00179kg>	<010,00kg>	0kg	0kg	00046kg	00045kg	186kg
		3,00%	5,2%				109kg	2kg	00049kg		0,5
Ist	00970kg	00900kg	01680kg	00701kg	00179kg	010,00kg	0kg	0kg	00046kg	00045kg	186kg
Soll	00968kg	00902kg	01679kg	00700kg	00180kg	009,98kg	109kg	2kg	00049kg		
Diff	0,2 %	-0,2 %	0,0 %	0,1 %	-0,5 %	0,2 %					-6,1 %

Betontemperatur: 15,2 °C

**Bauteil 5a**  
 Protokollnr.: 19646 / N21.01.02 / 12:05:51  
 Werk : 1  
 Kunde : 0  
 Baustelle : 2 Bedarfstelle 2  
 Fahrzeug : 999 / Fertigteilwerk  
 Rezeptsorte : 19 / 19 / 19  
 Konsistenz : KF / KF  
 Bestellmenge : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Lieferung : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Wetter :  
 Auftragnr. : 9999 / 2 / 6

Güte : B55 / B55 Produktgruppe : 9  
 W/Z Faktor : 0,49 Körnung : 0/11  
 geliefert : 2,00 m<sup>3</sup> Rest : 0,00 m<sup>3</sup>  
 Rückmenge : 0,00 m<sup>3</sup> Mischer : 1  
 Restwasserdichte: 1,04 kg/dm<sup>3</sup> Feststoffdichte : 2,20 kg/dm<sup>3</sup>  
 Bedienername : Ameruoso

Charge 8/11 Spl. 2/8 Rhein 0/2 Rhein				CEM IIA/S 52,5R	SFA	FK 61	W a s s e r				
							Feststoff	Was.korr.	Ist	Frischwas	Hygrom
							Feuchte	Spülwas.	Soll	WZ(F)-	
2,00	<00970kg	<00900kg	<01660kg	<00698kg	<00182kg	<010,50kg	0kg	0kg	00085kg	00064kg	173k
	3,00%	4,34%					95kg	2kg	00083kg		0,5
Ist	00970kg	00900kg	01660kg	00698kg	00182kg	010,50kg	0kg	0kg	00085kg	00064kg	173k
Soll	00968kg	00902kg	01665kg	00700kg	00180kg	010,50kg	95kg	2kg	00083kg		
Diff	0,2 %	-0,2 %	-0,2 %	-0,2 %	1,1 %	0,0 %			3,1 %		

Betontemperatur: 13,6 °C

**Bauteil 2b**  
 Protokollnr.: 19804 / N28.01.02 / 10:45:33  
 Werk : 1  
 Kunde : 0  
 Baustelle : 2 Bedarfstelle 2  
 Fahrzeug : 999 / Fertigteilwerk  
 Rezeptsorte : 19 / 19 / 19  
 Konsistenz : KF / KF  
 Bestellmenge : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Lieferung : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Wetter :  
 Auftragnr. : 9999 / 2 / 6

Güte : B55 / B55 Produktgruppe : 9  
 W/Z Faktor : 0,49 Körnung : 0/11  
 geliefert : 2,00 m<sup>3</sup> Rest : 0,00 m<sup>3</sup>  
 Rückmenge : 0,00 m<sup>3</sup> Mischer : 1  
 Restwasserdichte: 1,04 kg/dm<sup>3</sup> Feststoffdichte : 2,20 kg/dm<sup>3</sup>  
 Bedienername : Ameruoso

Charge 8/11 Spl. 2/8 Rhein 0/2 Rhein				CEM IIA/S 52,5R	SFA	FK 61	W a s s e r				
							Feststoff	Was.korr.	Ist	Frischwas	Hygrom
							Feuchte	Spülwas.	Soll	WZ(F)-	
2,00	<00970kg	<00900kg	<01660kg	<00700kg	<00179kg	<010,00kg	0kg	0kg	00058kg	00058kg	174k
	3,00%	4,51%					98kg	2kg	00060kg		0,4
Ist	00970kg	00900kg	01660kg	00700kg	00179kg	010,00kg	0kg	0kg	00058kg	00058kg	174k
Soll	00968kg	00902kg	01666kg	00700kg	00180kg	009,98kg	98kg	2kg	00060kg		
Diff	0,2 %	-0,2 %	-0,4 %	0,0 %	-0,5 %	0,2 %			-3,3 %		

Betontemperatur: 19,2 °C

**Bauteil 2c**  
 Protokollnr.: 20717 / N19.03.02 / 14:15:05  
 Werk : 1  
 Kunde : 0  
 Baustelle : 2 Bedarfstelle 2  
 Fahrzeug : 999 / Fertigteilwerk  
 Rezeptsorte : 9 / 9 / 9  
 Konsistenz : KF / KF  
 Bestellmenge : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Lieferung : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Wetter :  
 Auftragnr. : 9999 / 2 / 23

Güte : B55 / B55 Produktgruppe : 9  
 W/Z Faktor : 0,49 Körnung : 0/11  
 geliefert : 2,00 m<sup>3</sup> Rest : 0,00 m<sup>3</sup>  
 Rückmenge : 0,00 m<sup>3</sup> Mischer : 1  
 Restwasserdichte: 1,04 kg/dm<sup>3</sup> Feststoffdichte : 2,20 kg/dm<sup>3</sup>  
 Bedienername : Ameruoso

Charge 8/11 Spl. 2/8 Rhein 0/2 Rhein				CEM IIA/S 52,5R	SFA	FK 61	W a s s e r				
							Feststoff	Was.korr.	Ist	Frischwas	Hygromete
							Feuchte	Spülwas.	Soll	WZ(F)-Fak	
2,00	<01000kg	<00900kg	<01670kg	<00698kg	<00180kg	<009,40kg	0kg	0kg	00034kg	00033kg	147kg
	3,00%	4,81%					103kg	4kg	00033kg		0,43
Ist	01000kg	00900kg	01670kg	00698kg	00180kg	009,40kg	0kg	0kg	00034kg	00033kg	147kg
Soll	00968kg	00902kg	01673kg	00700kg	00180kg	009,46kg	103kg	4kg	00033kg		
Diff	3,3 %	-0,2 %	-0,1 %	-0,2 %	0,0 %	-0,6 %			3,0 %		

Betontemperatur: 19,6 °C

**Bauteil 3b**  
 Protokollnr.: 20690 / N18.03.02 / 11:20:34  
 Werk : 1  
 Kunde : 0  
 Baustelle : 1 Bedarfstelle 1  
 Fahrzeug : 999 / Fertigteilwerk  
 Rezeptsorte : 9 / 9 / 9  
 Konsistenz : KF / KF  
 Bestellmenge : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Lieferung : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Wetter :  
 Auftragnr. : 9999 / 1 / 11

Güte : B55 / B55 Produktgruppe : 9  
 W/Z Faktor : 0,49 Körnung : 0/11  
 geliefert : 2,00 m<sup>3</sup> Rest : 0,00 m<sup>3</sup>  
 Rückmenge : 0,00 m<sup>3</sup> Mischer : 1  
 Restwasserdichte: 1,04 kg/dm<sup>3</sup> Feststoffdichte : 2,20 kg/dm<sup>3</sup>  
 Bedienername : Ameruoso

Charge 8/11 Spl. 2/8 Rhein 0/2 Rhein				CEM IIA/S 52,5R	SFA	FK 61	W a s s e r				
							Feststoff	Was.korr.	Ist	Frischwas	Hygromete
							Feuchte	Spülwas.	Soll	WZ(F)-Fak	
2,00	<00970kg	<00900kg	<01670kg	<00707kg	<00183kg	<009,50kg	0kg	99kg			230kg
	3,00%	4,59%					99kg	0kg			0,46
Ist	00970kg	00900kg	01670kg	00707kg	00183kg	009,50kg	0kg	99kg			230kg
Soll	00968kg	00902kg	01669kg	00700kg	00180kg	009,46kg	99kg	0kg			
Diff	0,2 %	-0,2 %	0,0 %	1,0 %	1,6 %	0,4 %					

Betontemperatur: 17,8 °C

**Bauteil 4c**  
 Protokollnr.: 20092 N12.02.02 / 10:09:58  
 Werk : 1  
 Kunde : 0  
 Baustelle : 2 Bedarfstelle 2  
 Fahrzeug : 999 / Fertigteilwerk  
 Rezeptsorte : 19 / 19 / 19  
 Konsistenz : KF / KF  
 Bestellmenge : 1,50 m<sup>3</sup>  
 Lieferung : 1,50 m<sup>3</sup>  
 Wetter :  
 Auftragnr. : 9999 / 2 / 1

Güte : B55 / B55  
 W/Z Faktor : 0,49  
 geliefert : 1,50 m<sup>3</sup>  
 Rückmenge : 0,00 m<sup>3</sup>  
 Restwasserdichte: 1,04 kg/dm<sup>3</sup>  
 Bedienername : Ameruoso

Produktgruppe : 9  
 Körnung : 0/11  
 Rest : 0,00 m<sup>3</sup>  
 Mischer : 1  
 Feststoffdichte : 2,20 kg/dm<sup>3</sup>

Charge	6/11 Spl. 2/8 Rhein 0/2 Rhein			CEM IIA/S 52,5R	SFA	FK 6i	W a s s e r			Frischwas Hygromete WZ(F)-Fak	
	Feststoff	Was.korr.	Ist				Feuchte	Spülwas.	Soll		
1,50	<00730kg> 3,00%	<00680kg> 4,85%	<01270kg>	<00527kg>	<00134kg>	<008,70kg>	0kg	0kg	00041kg	00040kg	75kg
Ist	00730kg	00680kg	01270kg	00527kg	00134kg	008,70kg	78kg	2kg	00040kg	00040kg	0,89
Soll	00726kg	00677kg	01255kg	00525kg	00136kg	008,67kg	0kg	0kg	00041kg	00040kg	75kg
Diff	0,5 %	0,4 %	1,1 %	0,3 %	-1,4 %	0,3 %	78kg	2kg	00040kg		2,5 %

Betontemperatur: 17,4 °C

**Bauteil 5r**  
 Protokollnr.: 20166 N15.02.02 / 10:07:37  
 Werk : 1  
 Kunde : 0  
 Baustelle : 2 Bedarfstelle 2  
 Fahrzeug : 999 / Fertigteilwerk  
 Rezeptsorte : 19 / 19 / 19  
 Konsistenz : KF / KF  
 Bestellmenge : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Lieferung : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Wetter :  
 Auftragnr. : 9999 / 2 / 1

Güte : B55 / B55  
 W/Z Faktor : 0,49  
 geliefert : 2,00 m<sup>3</sup>  
 Rückmenge : 0,00 m<sup>3</sup>  
 Restwasserdichte: 1,04 kg/dm<sup>3</sup>  
 Bedienername : Ameruoso

Produktgruppe : 9  
 Körnung : 0/11  
 Rest : 0,00 m<sup>3</sup>  
 Mischer : 1  
 Feststoffdichte : 2,20 kg/dm<sup>3</sup>

Charge	6/11 Spl. 2/8 Rhein 0/2 Rhein			CEM IIA/S 52,5R	SFA	Muraplast	W a s s e r			Frischwas Hygromete WZ(F)-Fak	
	Feststoff	Was.korr.	Ist				Feuchte	Spülwas.	Soll		
2,00	<00970kg> 3,00%	<00910kg> 4,62%	<01660kg>	<00699kg>	<00182kg>	<009,70kg>	0kg	0kg	00059kg	00057kg	75kg
Ist	00970kg	00910kg	01660kg	00699kg	00182kg	009,70kg	100kg	2kg	00058kg		0,35
Soll	00968kg	00902kg	01670kg	00700kg	00180kg	009,68kg	0kg	0kg	00059kg	00057kg	75kg
Diff	0,2 %	0,8 %	-0,5 %	-0,1 %	1,1 %	0,2 %	100kg	2kg	00058kg		1,7 %

Betontemperatur: 17,4 °C

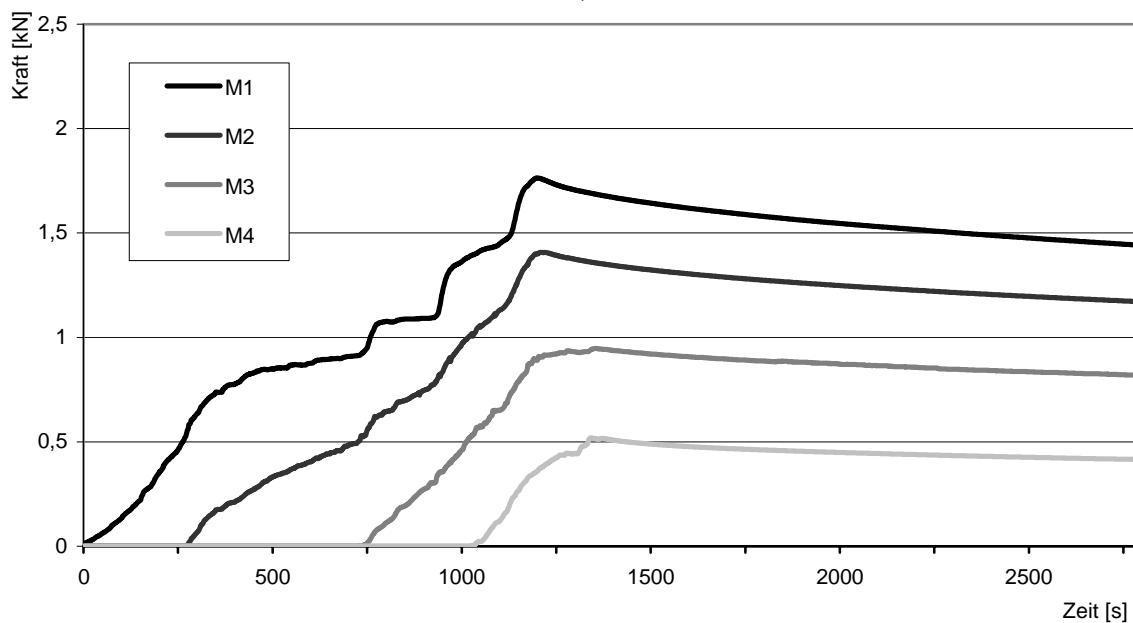
## Analyse der Gesteinkörnungen

<b>GESTEINSKÖRNUNG</b>												
<b>Abschl. Bestandteile, Org. Stoffe, Eigenfeuchte, Siebversuch</b>												
Niederlassung / Werk - Hochtief Fertigteilebau GmbH, Stockstadt am Rhein.												
Herstellwerk / Lieferant	Kiebert GmbH			Kiebert GmbH			Kiebert GmbH			Kiebert GmbH		
Gesteinskörnungart / Korngruppe	Sand 0/2 a			Sand 0/2 a			Sand 0/2 a			Sand 0/2 a		
Lieferschein - Nr.	839860			840046			840258			840478		
Probe - Kennzeichen	31.01.2002			14.02.2002			28.02.2002			15.03.2002		
<b>Abschlämmbare Bestandteile ( Absetzversuch )</b>						<b>Stoffe organischen Ursprungs</b>						
Einwage 500 g Gesteinskörnung bis 4mm Korngröße						Färbung der überstehenden Natronlauge						
Probe - Kennzeichen	31.01.02	01.03.02	Probe - Kennzeichen			31.01.02	01.03.02					
Versuch	1	1	Versuch			1	1					
Schlammmenge ( 24 Stunde) cm³	2	3	farblos bis hellgelb			x	x					
Trockenmasse einzeln in M.-%	0,4	0,5	tiefgelb bis hellbraun									
Trockenmasse Mittel M.-%	0,5		dunkelbraun,rötlich									
<b>Kornzusammensetzung / Siebversuch</b>												
Probe - Kennzeichen : 31.01.2002						Korngruppe - 0/2 a.						
Versuch	Gesamt-	Rückstand in g auf dem Sieb										
	rückstand	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	
1	938	935	841	419	160	64	2	0	0	0	0	
2	940	937	843	420	161	64	0	0	0	0	0	
Summe	1878	1872	1684	839	321	128	2	0	0	0	0	
Rückstand in %	99,7	89,7	44,7	17,1	6,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Durchgang in %	0,3	10,3	55,3	82,9	93,2	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
<b>Eigenfeuchte in M.-%.</b>		Gesteinskörnung feucht g				Gesteinskörnung trocken g				Wasser in der Probe g		
<b>6,6</b>		1000				938				62		
Probe - Kennzeichen : 14.02.2002						Korngruppe - 0/2 a.						
Versuch	Gesamt-	Rückstand in g auf dem Sieb										
	rückstand	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	
1	957	954	846	416	169	67	3	0	0	0	0	
2	956	953	845	418	169	68	1	0	0	0	0	
Summe	1913	1907	1691	834	338	135	4	0	0	0	0	
Rückstand in %	99,7	88,4	43,6	17,7	7,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Durchgang in %	0,3	11,6	56,4	82,3	92,9	99,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
<b>Eigenfeuchte in M.-%.</b>		Gesteinskörnung feucht g				Gesteinskörnung trocken g				Wasser in der Probe g		
<b>4,5</b>		1000				957				43		
Probe - Kennzeichen : 28.02.2002						Korngruppe - 0/2 a.						
Versuch	Gesamt-	Rückstand in g auf dem Sieb										
	rückstand	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	
1	957	954	858	456	180	65	2	0	0	0	0	
2	959	957	862	455	181	66	1	0	0	0	0	
Summe	1916	1911	1720	911	361	131	3	0	0	0	0	
Rückstand in %	99,7	89,8	47,5	18,8	6,8	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Durchgang in %	0,3	10,2	52,5	81,2	93,2	99,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
<b>Eigenfeuchte in M.-%.</b>		Gesteinskörnung feucht g				Gesteinskörnung trocken g				Wasser in der Probe g		
<b>4,4</b>		1000				958				42		
Probe - Kennzeichen : 15.03.2002						Korngruppe - 0/2 a.						
Versuch	Gesamt-	Rückstand in g auf dem Sieb										
	rückstand	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	
1	963	957	796	388	151	51	0	0	0	0	0	
2	962	956	798	388	149	50	0	0	0	0	0	
Summe	1925	1913	1594	776	300	101	0	0	0	0	0	
Rückstand in %	99,4	82,8	40,3	15,6	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Durchgang in %	0,6	17,2	59,7	84,4	94,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
<b>Eigenfeuchte in M.-%.</b>		Gesteinskörnung feucht g				Gesteinskörnung trocken g				Wasser in der Probe g		
<b>3,8</b>		1000				963				37		

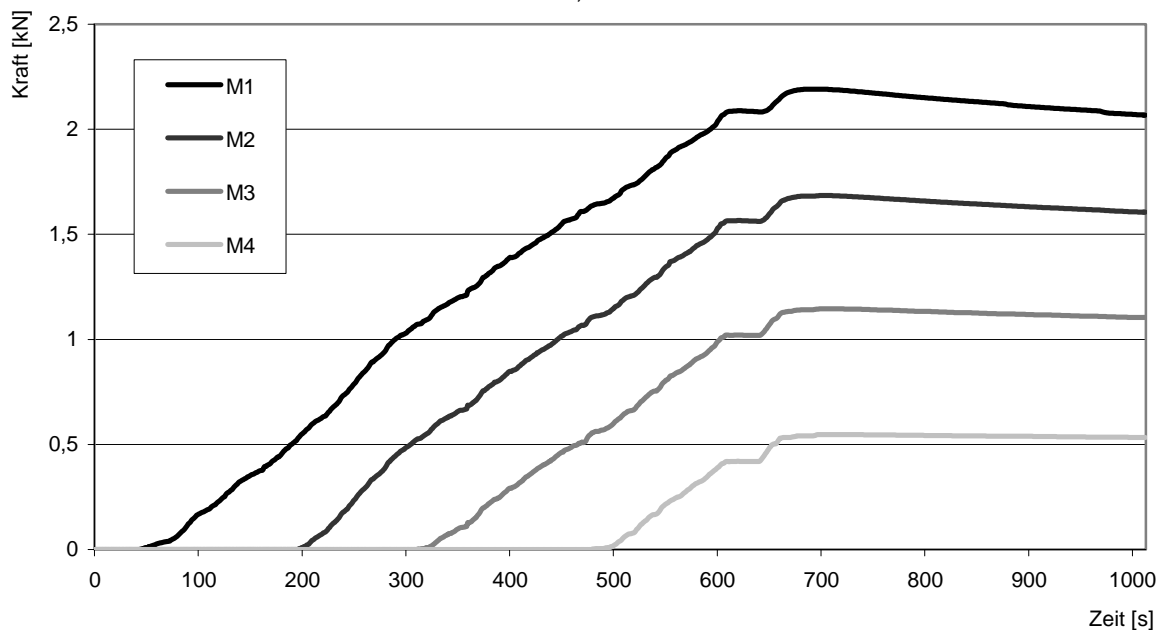
## Messwerte der Kraftmessdosen

- M1 – Betonierhöhe 4m
- M2 – Betonierhöhe 3m
- M3 – Betonierhöhe 2m
- M4 – Betonierhöhe 1m

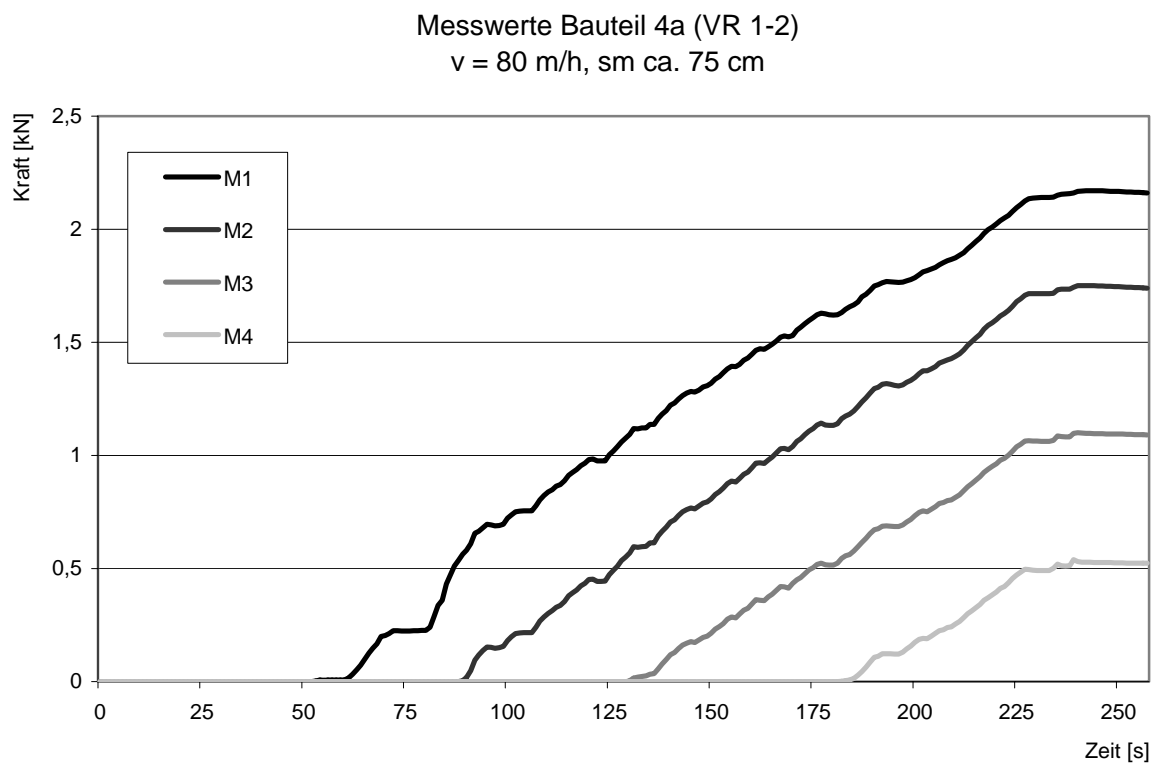
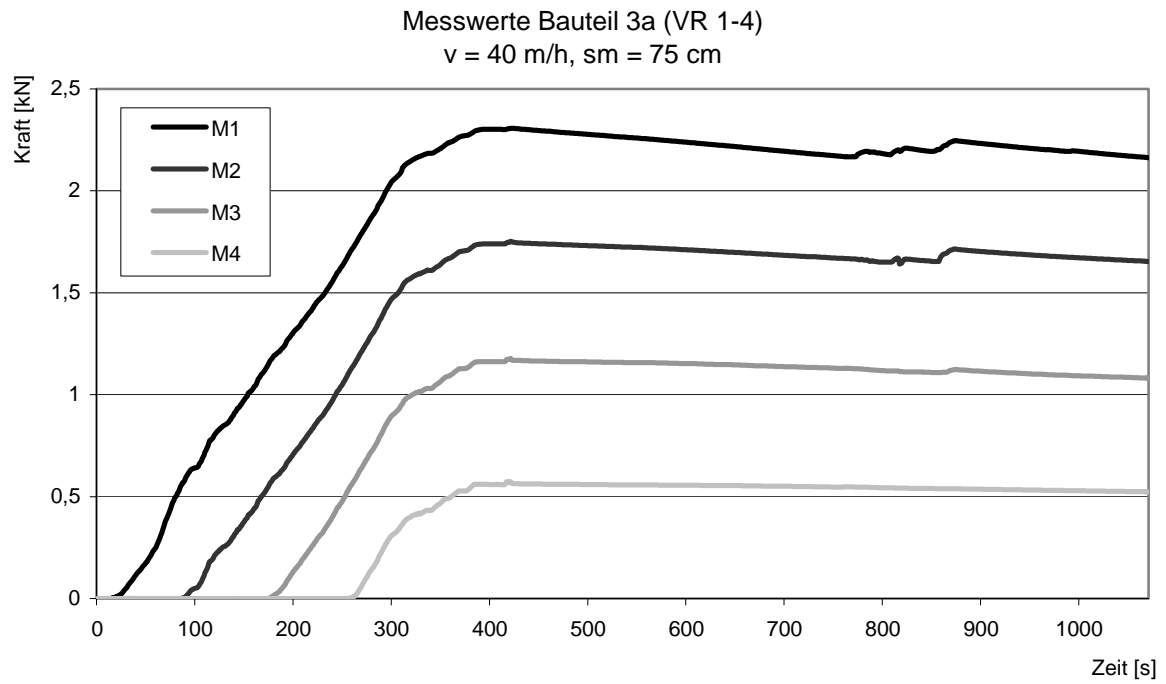
Messwerte Bauteil 1a (VR 1-8)  
 $v = 12.5 \text{ m/h}$ ,  $sm \text{ ca. } 75 \text{ cm}$



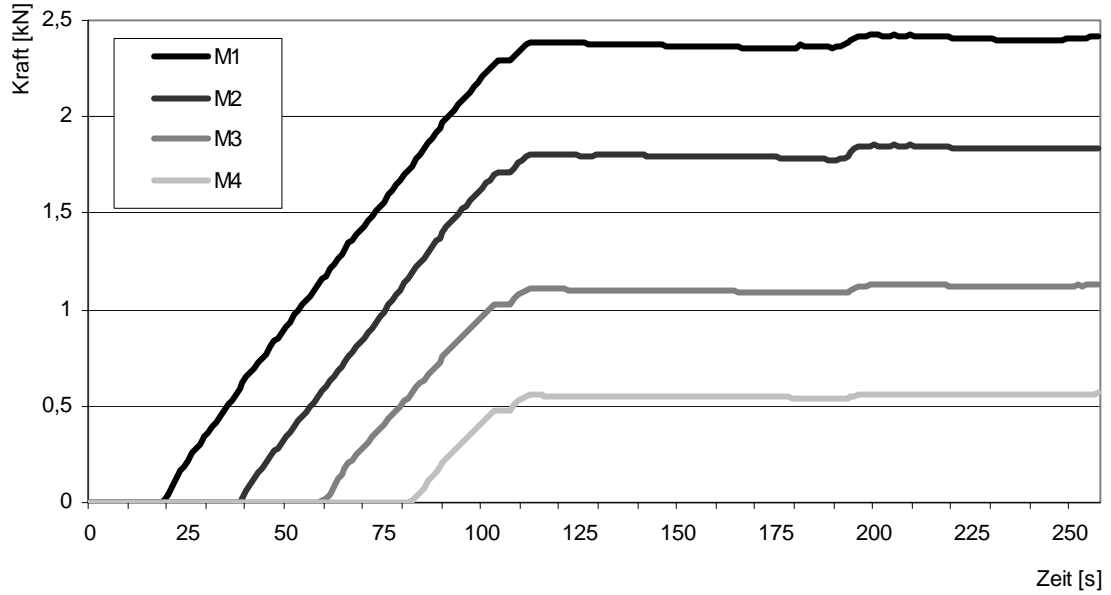
Messwerte Bauteil 2a (VR 1-7)  
 $v = 25 \text{ m/h}$ ,  $sm \text{ ca. } 75 \text{ cm}$



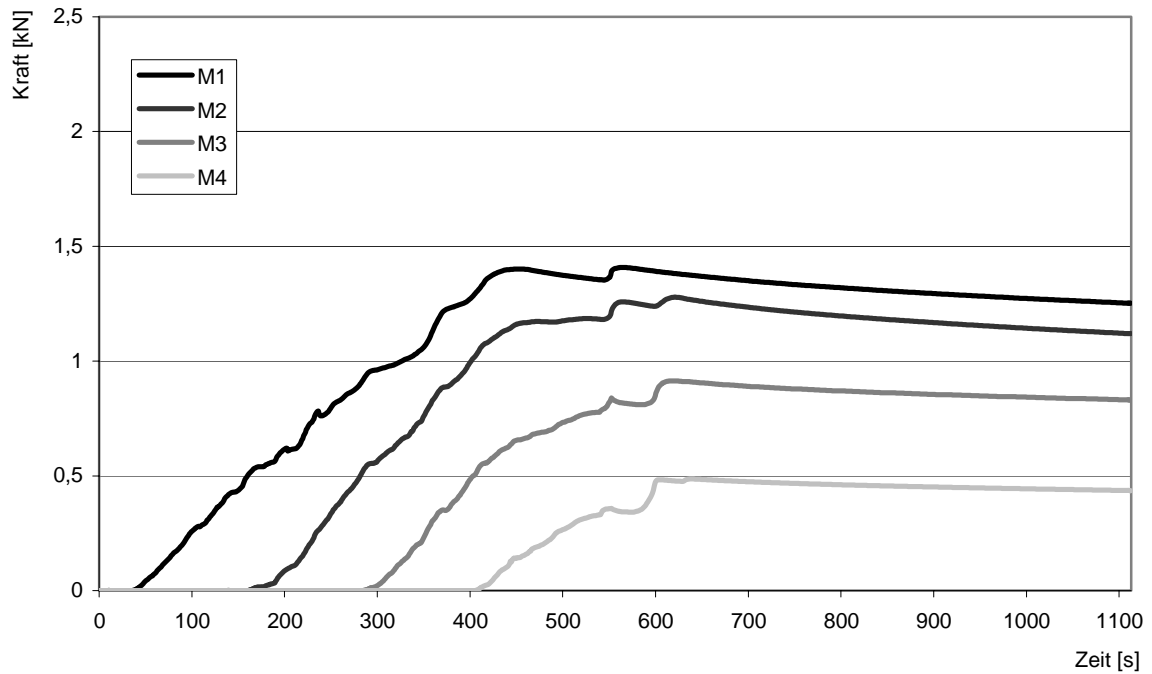




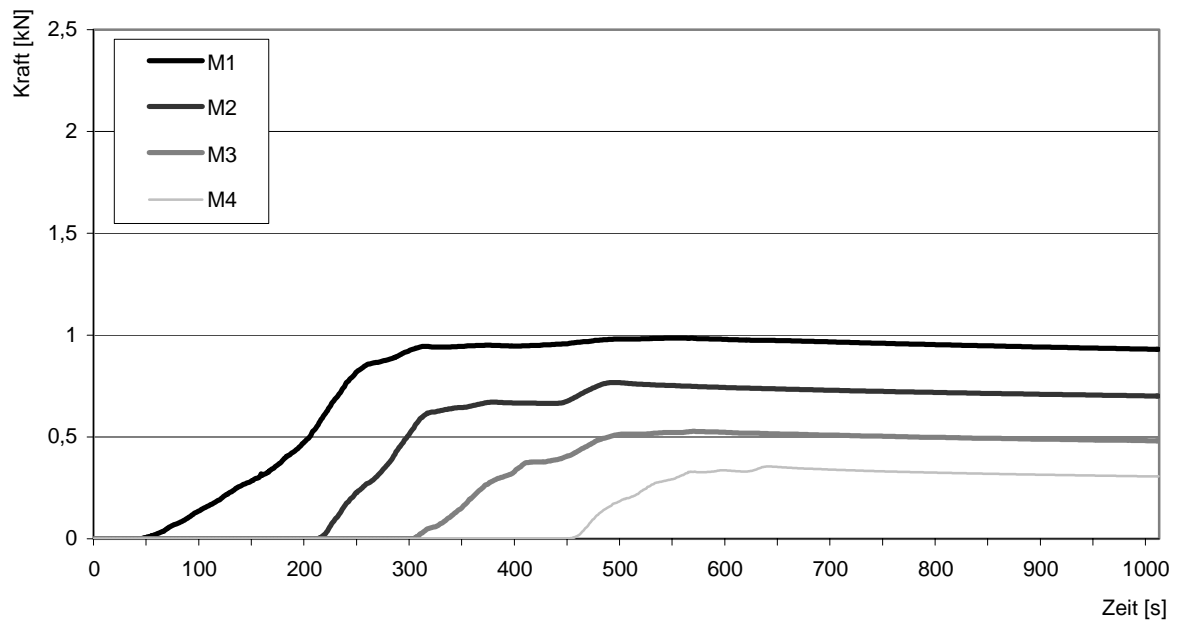
Messwerte Bauteil 5a (VR 1-1)  
 $v = 160 \text{ m/h}$ ,  $sm \text{ ca. } 75 \text{ cm}$



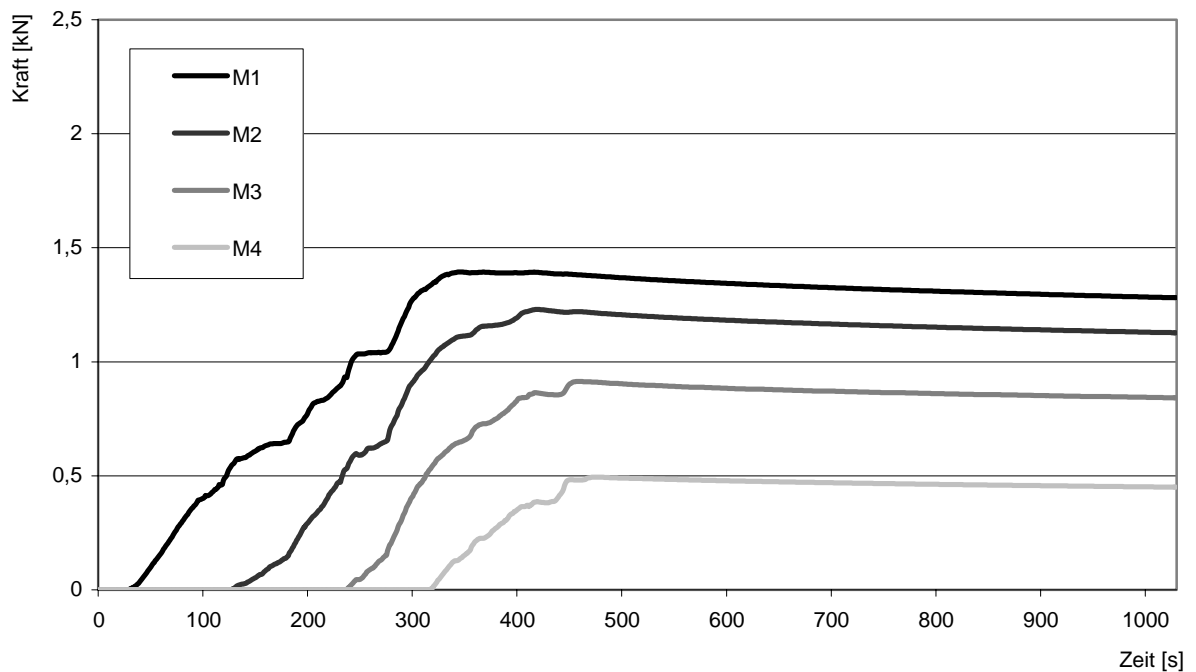
Messwerte Bauteil 2b (VR1-3)  
 $v = 25 \text{ m/h}$ ,  $sm \text{ ca. } 70$

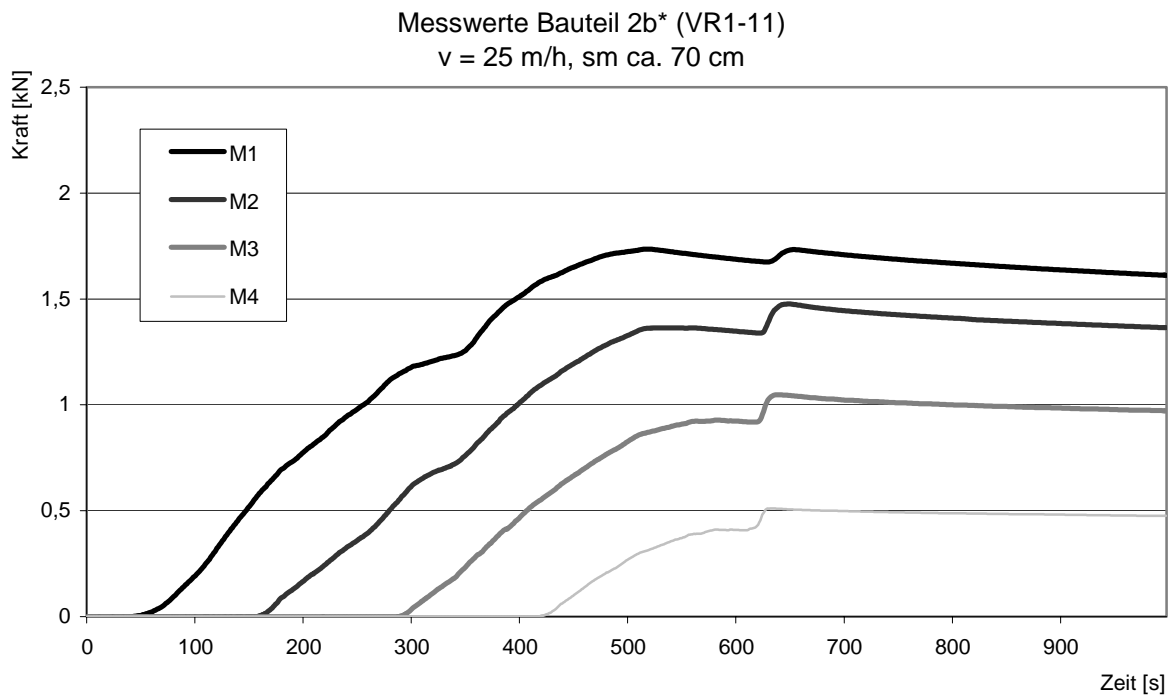
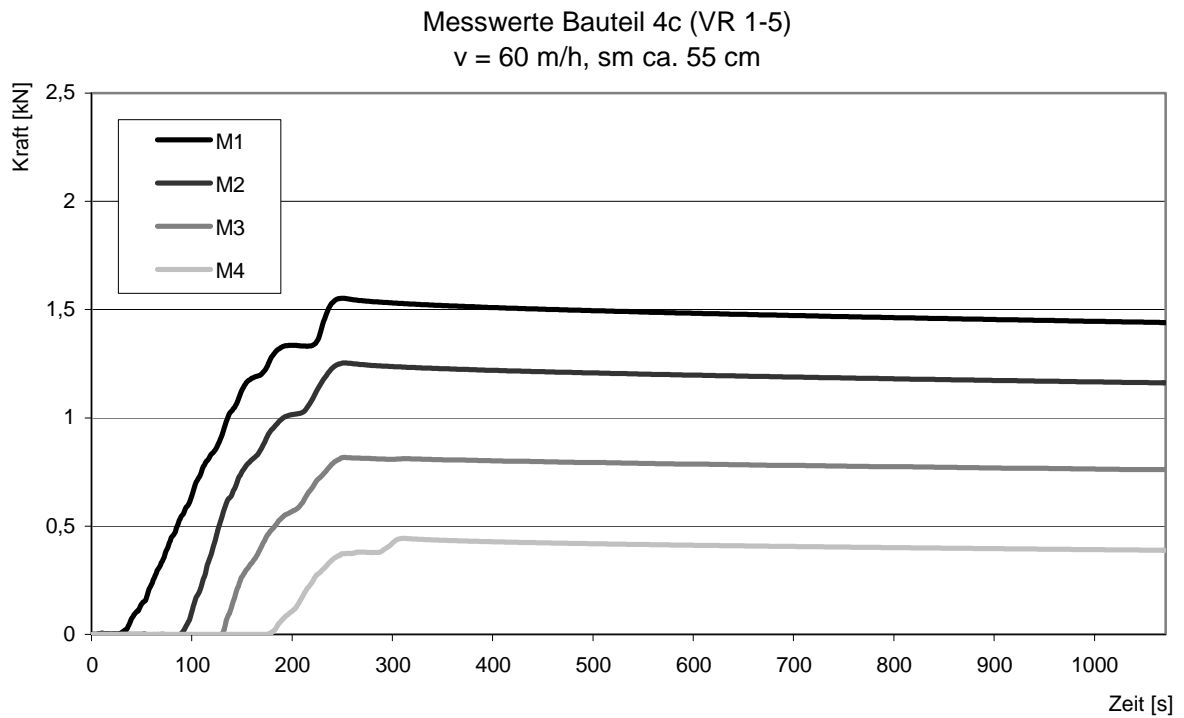


Messwerte Bauteil 2c (VR1-10)  
 $v = 25 \text{ m/h}$ ,  $sm \text{ ca. } 60 \text{ cm}$

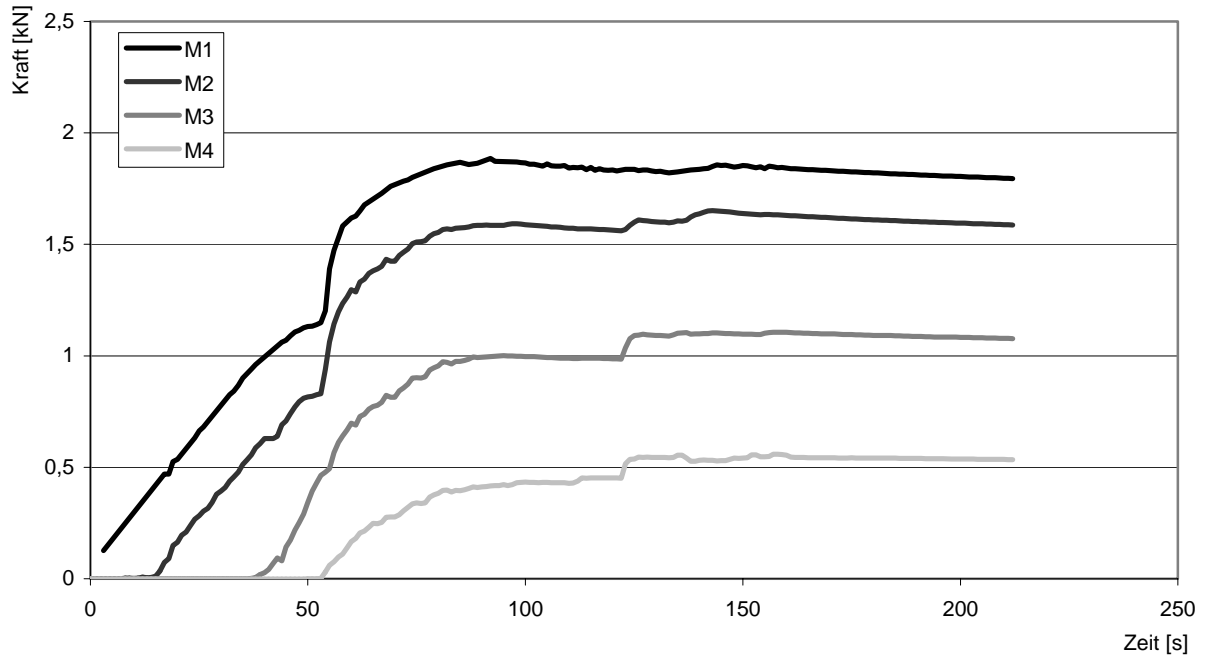


Messwerte Bauteil 3b (VR 1-9)  
 $v = 40 \text{ m/h}$ ,  $sm \text{ ca. } 70 \text{ cm}$



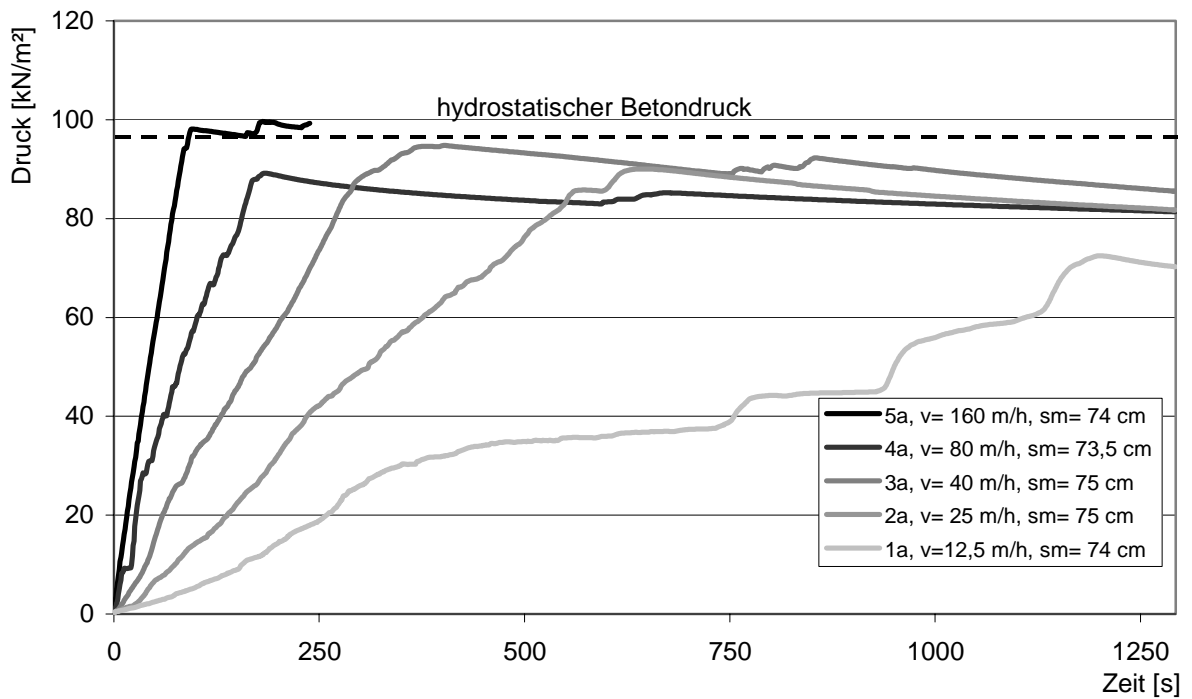


Messwerte Bauteil 5r (VR 1-6)  
 $v = 160 \text{ m/h}$ , Rüttelbeton - Regelkonsistenz

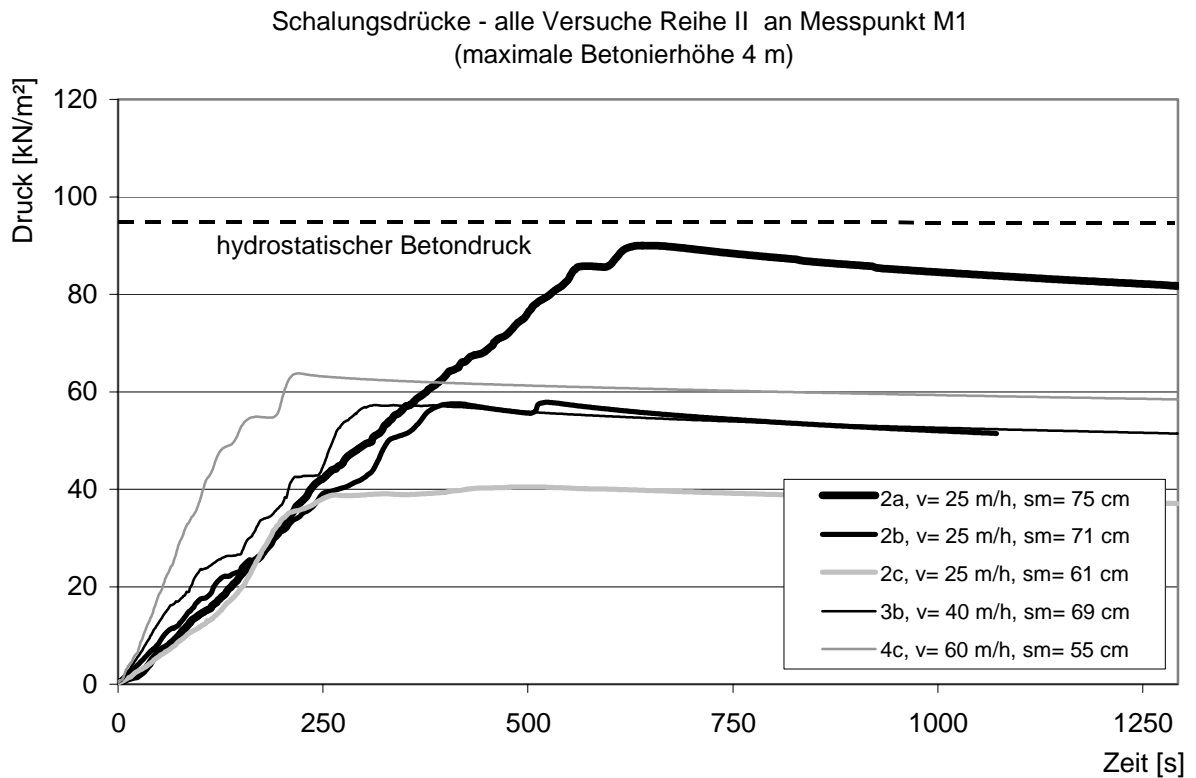


**Schalungsdrücke an der Messstelle M1**  
 Versuchsreihe I

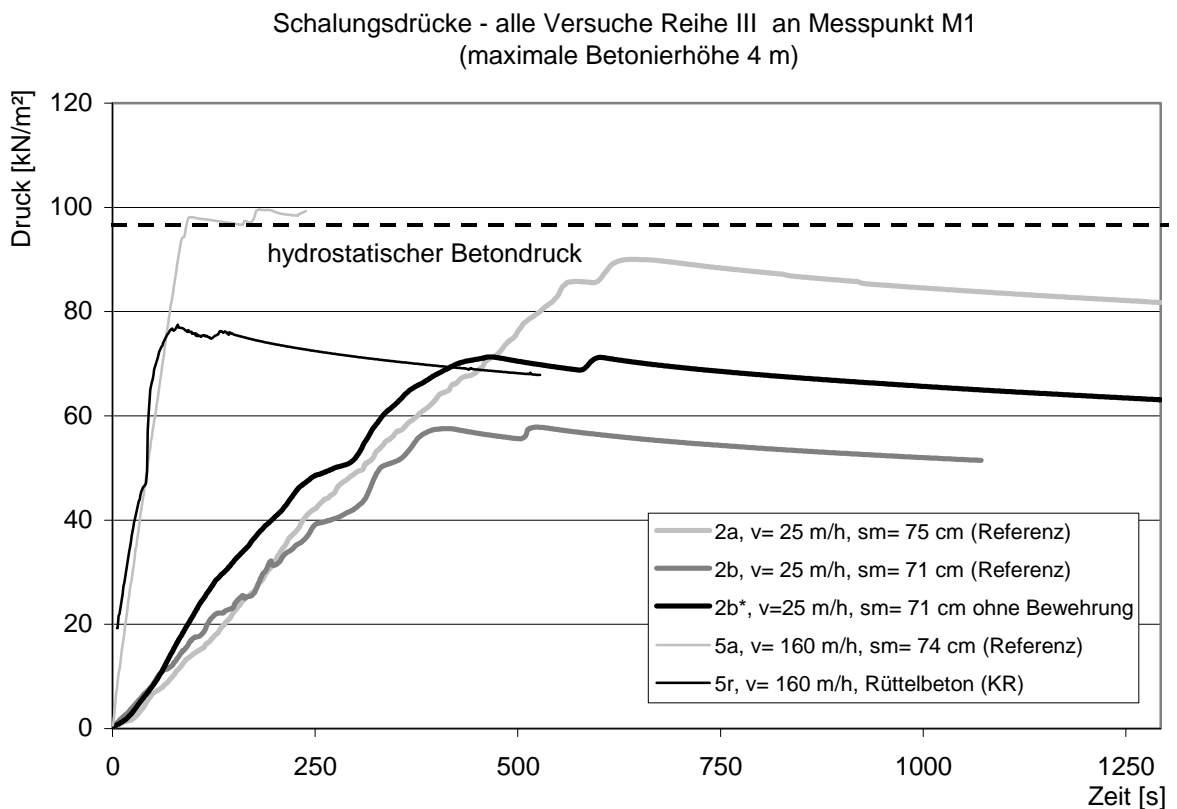
Schalungsdrücke - alle Versuche Reihe I an Messpunkt M1  
 (maximale Betonierhöhe 4 m)



### Versuchsreihe II



### Versuchsreihe III



## Druckfestigkeiten

ca. 56 Tage

Exemplarisch ermittelter Faktor zur Berücksichtigung des Einflusses der unterschiedlichen Lagerungsbedingungen an den extra hergestellten Probekörpern

Würfel (150mm)

$f_{c,luft} = 0,92 \times f_{c,wasser}$   
 (Luftlagerung) (Wasserlagerung über 7d)

Bauteil	Beton	sm bzw. a	v	Lag. Nr.	Abmessungen			Masse m	Bruchlast 56 d F <sub>c</sub>	Beton-	Betondruck-	Betondruck-	
					rohichte ρ <sub>b</sub>	festigkeit f <sub>c,cube150,d56</sub>	festigkeit f <sub>c,cube200,d56</sub>						
		[cm]	[m/h]		[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kN]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	
VR 1-1 5a	SVB	74	160	w	1/2	150	150	150	7,885	2010	2,34	89,3	84,9
				w	2/2	150	150	150	7,916	1965	2,35	87,3	83,0
				w	3/2	150	150	150	7,989	2015	2,37	89,6	85,1
				w							<b>2,35</b>	88,74	<b>84,30</b>
				l	4/2	150	150	150	7,9	1855	2,34	82,4	78,3
				l	5/2	150	150	150	7,918	1880	2,35	83,6	79,4
				l	6/2	150	150	150	7,902	1800	2,34	80,0	76,0
				l					<b>2,34</b>	<b>82,0</b>	<b>77,9</b>		
VR 1-2 4a	SVB	73	80	w	7/2	150	150	150	7,865	1915	2,33	85,1	80,9
				w	8/2	150	150	150	7,928	1895	2,35	84,2	80,0
				w	9/2	150	150	150	7,901	1945	2,34	86,4	82,1
				w							<b>2,34</b>	85,3	<b>81,0</b>
				l					<b>2,33</b>	<b>78,8</b>	<b>74,8</b>		
VR 1-3 2b	SVB	71	25	w	10//2	150	150	150	7,865	2075	2,33	92,2	87,6
				w	11/2	150	150	150	7,928	1935	2,35	86,0	81,7
				w	12/2	150	150	150	7,901	2040	2,34	90,7	86,1
				w							<b>2,34</b>	89,6	<b>85,1</b>
				l					<b>2,33</b>	<b>82,8</b>	<b>78,7</b>		
VR 1-4 3a	SVB	75	40	w	13/2	150	150	150	7,944	1955	2,35	86,9	82,5
				w	14/2	150	150	150	7,956	2005	2,36	89,1	84,7
				w	15/2	150	150	150	7,945	2015	2,35	89,6	85,1
				w							<b>2,36</b>	88,5	<b>84,1</b>
				l					<b>2,35</b>	<b>81,8</b>	<b>77,7</b>		
VR 1-5 4c	SVB	55	60	w	16/2	150	151	150	7,607	1802	2,23	79,5	75,5
				w	17/2	150	152	150	7,637	1734	2,23	76,2	72,3
				w	18/2	150	152	150	7,667	1799	2,24	78,8	74,9
				w							<b>2,23</b>	78,1	<b>74,2</b>
				l					<b>2,23</b>	<b>72,2</b>	<b>68,6</b>		
VR 1-6 5r	Rüttel- beton	47	160	w	19/2	150	150	150	7,842	1732	2,33	77,3	73,4
				w	20/2	150	150	150	7,908	1665	2,33	73,7	70,0
				w	21/2	151	151	150	7,97	1665	2,35	73,4	69,7
				w							<b>2,34</b>	74,8	<b>71,1</b>
				l					<b>2,33</b>	<b>69,1</b>	<b>65,7</b>		
VR 1-7 2a	SVB	75	25	w	22/2	150	150	150	7,997	2110	2,38	94,1	89,4
				w	23/2	150	150	150	8,022	2085	2,38	92,8	88,2
				w	24/2	150	150	151	7,956	2100	2,35	93,3	88,7
				w							<b>2,37</b>	93,4	<b>88,7</b>
				l					<b>2,36</b>	<b>86,3</b>	<b>82,0</b>		

Bauteil	Beton	sm bzw. a	v	Lag. Nr.	Abmessungen			Masse m	Bruchlast 56 d F <sub>c</sub>	Beton- dichtichte ρ <sub>b</sub>	Betondruck- festigkeit f <sub>c,cube150,d56</sub>	Betondruck- festigkeit f <sub>c,cube200,d56</sub>	
					b	l	h						[kN]
		[cm]	[m/h]		[mm]	[mm]	[mm]	[kg]					
VR 1-8 1a	SVB	74	12,5	w	25/2	150	151	150	7,936	2055	2,35	91,0	86,5
				w	26/2	150	150	150	7,968	2030	2,36	90,0	85,5
				w	27/2	150	151	150	8,028	2020	2,37	89,4	84,9
				w							<b>2,36</b>	90,1	<b>85,6</b>
				l							<b>2,35</b>	<b>83,3</b>	<b>79,1</b>
VR 1-9 3b	SVB	69	40	w	28/2	150	150	150	7,949	2105	2,35	93,4	88,7
				w	29/2	150	151	150	7,996	2140	2,36	94,7	89,9
				w	30/2	150	151	150	8,002	2105	2,36	93,2	88,5
				w							<b>2,36</b>	93,7	<b>89,1</b>
				l							<b>2,35</b>	<b>86,6</b>	<b>82,3</b>
VR 1-10 2c	SVB	61	25	w	31/2	150	150	150	7,948	1945	2,35	86,3	82,0
				w	32/2	150	151	150	7,973	2050	2,36	90,8	86,3
				w	33/2	150	151	150	8,009	2005	2,36	88,6	84,2
				w							<b>2,36</b>	88,6	<b>84,1</b>
				l							<b>2,35</b>	<b>81,8</b>	<b>77,7</b>



## Druckfestigkeiten

Lage der Bohrkerne

**Bohrkerne** oben: von OK Schalung 50 cm  
 mitte: von OK Schalung 200 cm  
**Zylinder (Ø100/100 mm)** unten: von OK Schalung

Bauteil	Bauteil Lage	Lag.	Abmessungen			Masse m	Bruchlast 56 d F <sub>c</sub>	Beton- rohdichte ρ <sub>b</sub>	Beton- druckfestigkeit f <sub>c,cyl100,d56</sub>
			h1	h2	d				
VR 1-1 5a	unten	I	99	99,6	103	1,989	(605) 705	2,39	84,0
	mitte	I	99,6	100	103	1,986	690	2,37	82,2
	oben	I	99,3	99,5	103	1,964	665	2,35	79,2
	<b>Durchschnitt</b>	I						<b>2,37</b>	<b>81,8</b>
VR 1-2 4a	unten	I	99,6	100	103	1,989	705	2,37	84,0
	mitte	I	99,4	99,3	103	1,97	660	2,36	78,6
	oben	I	99,5	99,7	103	1,959	650	2,34	77,4
	<b>Durchschnitt</b>	I						<b>2,36</b>	<b>80,0</b>
VR 1-3 2b	unten	I	98,7	99,4	104	1,993	670	2,39	79,6
	mitte	I	99,8	99,5	103	1,987	710	2,37	84,6
	oben	I	99,1	99,4	103	1,986	690	2,38	82,2
	<b>Durchschnitt</b>	I						<b>2,38</b>	<b>82,1</b>
VR 1-4 3a	unten	I	99	99,5	103	2,005	630	2,41	75,0
	mitte	I	99,4	99,5	103	1,984	612	2,38	72,9
	oben	I	100	99,7	103	1,999	610	2,39	72,8
	<b>Durchschnitt</b>	I						<b>2,39</b>	<b>73,6</b>
VR 1-5 4c	unten	I	103,2	103,2	104	2,0183	620	2,32	73,5
	mitte	I	103,1	103,1	104	1,986	650	2,29	77,1
	oben	I	104,2	104,2	104	2,0028	625	2,28	74,1
	<b>Durchschnitt</b>	I						<b>2,30</b>	<b>74,9</b>
VR 1-6 5r	unten	I	103,2	103,2	104	2,0448	660	2,35	78,3
	mitte	I	103,2	103,2	104	2,04	635	2,34	75,3
	oben	I	103,1	103,1	104	2,0442	630	2,35	74,7
	<b>Durchschnitt</b>	I						<b>2,35</b>	<b>76,1</b>
VR 1-7 2a	unten	I	102,6	102,5	104	2,084	738	2,41	87,4
	mitte	I	102,3	102,6	104	2,079	716	2,40	84,8
	oben	I	102,5	102,5	104	2,07	674	2,39	79,8
	<b>Durchschnitt</b>	I						<b>2,40</b>	<b>84,0</b>

Bauteil	Bauteil Lage	Lag.	Abmessungen			Masse m	Bruchlast 56 d F <sub>c</sub>	Beton- rohddichte ρ <sub>b</sub>	Betondruck- festigkeit f <sub>c,oy100,d56</sub>
			h1	h2	d				
			[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kN]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
VR 1-8 1a	unten	I	102,3	102,4	104	2,082	718	2,41	85,0
	mitte	I	102,4	102,2	104	2,063	673	2,40	80,0
	oben	I	102,6	102,6	104	2,087	682	2,41	80,9
	<b>Durchschnitt</b>	I						2,41	82,0
VR 1-9 3b	unten	I	102,1	102,7	104	2,056	718	2,39	85,3
	mitte	I	102,4	102,3	104	2,052	726	2,38	86,3
	oben	I	102,4	102,3	104	2,061	703	2,39	83,4
	<b>Durchschnitt</b>	I						2,39	85,0
VR 1-10 2c	unten	I	102,3	102,7	104	2,058	686	2,38	81,4
	mitte	I	102,2	102,4	104	2,042	658	2,37	78,1
	oben	I	102,7	102,7	104	2,031	632	2,34	74,8
	<b>Durchschnitt</b>	I						2,36	78,1

## Vakuum – Wasseraufnahme

Nach DAfStb Heft 422, /34/

Probe Nr. [-]	Bauteil Bez. [-]	Wasseraufnahme		Rohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]
		[M-%]	[Vol.-%]	
VR 1-1 oben	5a	6,85	15,42	2,25
VR 1-1 mitte		6,43	14,63	2,27
VR 1-1 unten		6,14	14,03	2,29
VR 1-2 oben	4a	6,98	15,58	2,23
VR 1-2 mitte		6,91	15,46	2,24
VR 1-2 unten		6,33	14,37	2,27
VR 1-3 oben	2b	5,91	13,64	2,31
VR 1-3 mitte		6,23	14,23	2,28
VR 1-3 unten		5,94	13,64	2,29
VR 1-4 oben	3a	6,13	14,00	2,28
VR 1-4 mitte		6,08	13,90	2,29
VR 1-4 unten		5,83	13,41	2,30
VR 1-5 oben	4c	7,74	17,09	2,21
VR 1-5 mitte		7,52	16,64	2,21
VR 1-5 unten		6,99	15,67	2,24
VR 1-6 oben	5r	7,18	16,08	2,24
VR 1-6 mitte		6,96	15,63	2,25
VR 1-6 unten		6,67	15,05	2,26
VR 1-7 oben	2a	6,26	14,34	2,29
VR 1-7 mitte		5,96	13,45	2,26
VR 1-7 unten		6,06	13,94	2,30
VR 1-8 oben	1a	5,79	13,42	2,32
VR 1-8 mitte		6,21	14,19	2,28
VR 1-8 unten		6,07	14,00	2,31
VR 1-9 oben	3b	5,97	13,74	2,30
VR 1-9 mitte		6,11	13,94	2,28
VR 1-9 unten		6,02	13,81	2,30
VR 1-10oben	2c	6,83	15,28	2,24
VR 1-10mitte		6,49	14,69	2,26
VR 1-10unten		6,33	14,35	2,27
<b>Mittel</b>		<b>6,43</b>	<b>14,59</b>	<b>2,27</b>