

**INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU  
DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE BRAUNSCHWEIG**

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen  
Prof. Dr.-Ing. K. Kordina

# Über den Schalungsdruck von Frischbeton

von

HELMUT ERTINGSHAUSEN

Bibliothek  
Technischen Hochschule  
Braunschweig

Fa  
559  
(5)

5 · BRAUNSCHWEIG · M Ä R Z 1 9 6 5

UB Braunschweig 84



10181-611-9

10.02.2011

10.02.2011

90

0

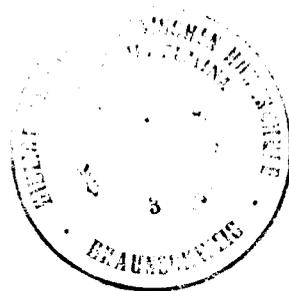
**INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU  
DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE BRAUNSCHWEIG**

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen  
Prof. Dr.-Ing. K. Kordina

# Über den Schalungsdruck von Frischbeton

von

HELMUT ERTINGSHAUSEN



**HEFT 5 . BRAUNSCHWEIG . MÄRZ 1965**

Die Anregung zur vorliegenden Arbeit gab mir Herr o. Professor em. Dr.-Ing. K. G a e d e , früherer Direktor des Instituts für Materialprüfung und Forschung des Bauwesens der Technischen Hochschule Hannover, dem ich für wertvolle Hinweise und die Betreuung der Arbeit danke.

Herr o. Professor Dr.-Ing. W. Z e r n a , Direktor des Instituts für Massivbau der Technischen Hochschule Hannover, und seinen Mitarbeitern danke ich für die mir gewährte vielseitige Unterstützung.

Herr o. Professor Dr.-Ing. H. L e h m a n n , Direktor des Instituts für Steine und Erden der Bergakademie Clausthal, hat es mir ermöglicht, in seinem Institut Versuche an Frischbeton vorzunehmen, wofür ich ihm und seinen Mitarbeitern meinen Dank sage.

Herr o. Professor Dr.-Ing. G. K n i t t e l , Direktor des Instituts für Baukonstruktionen der Technischen Hochschule Hannover, danke ich, daß er bereitwillig die Berichterstattung übernommen hat.

Herrn Dipl.-Ing. F. G l ö t z l , Karlsruhe, Herrn Wiss. Rat Dipl. Phys. H. L u c k e im Institut für Materialprüfung und Forschung des Bauwesens der Technischen Hochschule Hannover (Direktor Herr o. Professor Dr. techn. habil. Weinhold) und Herrn Reg.-Baurat S c h r ö d e r , Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, danke ich für den regen Gedankenaustausch und ihre Beratungen in meßtechnischen Fragen.

#### Den Bauunternehmen

Polensky und Zöllner, Niederlassung Hannover,  
Fritz Schuppert KG, Hannover, und  
W. Wallbrecht, Hannover,

danke ich für ihr verständnisvolles Entgegenkommen und die mir auf den Baustellen erwiesene Hilfsbereitschaft.

Meinen besonderen Dank sage ich den Mitarbeitern in den Werkstätten mehrerer Institute der Technischen Hochschule Hannover, die mir bei der Anfertigung von Meßgeräten behilflich waren.

Herrn o. Professor Dr.-Ing. K. K o r d i n a , Direktor des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, bin ich dankbar, daß die Arbeit in der Schriftenreihe des Instituts veröffentlicht werden kann.

# INHALTSVERZEICHNIS

1.	<u>Einleitung</u>	Seite	1
2.	<u>Auszüge aus bisherigen Arbeiten</u>		
2.1	Graf und Kaufmann ( s. auch 2.9 )		1
2.2	Noack		1
2.3	Cullough, Shunk, Ashley, Germain		2
2.4	Böhm		2
2.5	Schinkel und Schönfelder		5
2.6	Mauthner		5
2.7	Teller		6
2.8	Roby		6
2.9	Graf und Kaufmann		7
2.10	Hoffmann		9
2.11	Drechsel		11
2.12	Toussaint		12
2.13	Macklin		14
2.14	Guerrin		15
2.15	Rodin und Maxton		17
2.16	Schjødt		19
2.17	Olsson		20
2.18	Kahn		22
2.19	Muhs		23
2.20	American Concrete Institute ( ACI )		23
2.21	Cementbulletin		26
2.22	Holländische Rüttelrichtlinien		26
2.23	van Eyle und Boersma		27
2.24	Uspenskij		27
2.25	Adam		29
2.26	Witte		29
2.27	Ritchie		31
3.	<u>Die Eigenschaften von Frischbeton</u>		35
3.1	<u>Auszüge aus einzelnen Veröffentlichungen</u>		36
3.11	L'Hermite		36
3.12	Øfjord		37
3.13	Nennig		39
3.14	Witte		40
3.15	Ritchie		41
3.16	Kühl, Würzner, Francmanis, Czernin u.a.		43

3.2	<u>Eigene Untersuchungen</u>	Seite	45
4.	<u>Messungen von Schalungsdrücken an Bauwerken</u>		47
4.1	<u>Meßgeräte</u>		47
4.11	Druckmeßdose, Bauart Glötzl		47
4.12	Membrandruckmeßdose der Bundesanstalt für Wasserbau		47
4.13	Plattendruckmeßdose - Nachbau Bauart Inst. f. Materialprüfung der T.H. Hannover		51
4.14	Temperaturmeßgeräte		51
4.15	Meßuhren		51
4.2	<u>Schalungsdruckmessungen</u>		51
4.21	Mittelpfeiler einer Straßenbrücke über einen Autobahnabschnitt		51
4.22	Widerlager einer Straßenbrücke über einen Autobahnabschnitt		54
4.23	Widerlager einer Straßenbrücke über einen Autobahnabschnitt		55
4.24	Widerlager einer Stadtautobahn-Brücke		56
4.25	Widerlager einer Eisenbahnbrücke über eine Bundesbahnstrecke		58
4.26	Stahlbetonstützen einer Straßenbrücke		60
4.27	Stahlbetonwände in einem Verwaltungsgebäude		63
4.28	Zusammenfassung der Ergebnisse		66
5.	<u>Auswertung</u>		
5.1	Allgemeines		68
5.2	Die Größtwerte des Schalungsdrucks		68
5.3	Vergleich der Meßergebnisse mit einigen Berechnungsvorschlägen		74
5.4	Vorschläge zur Abschätzung des größten Schalungsdrucks		75
5.5	Die Verteilung des Schalungsdrucks		78
<u>Anlage 1</u>	Versuche über die Verfestigung von Frischbeton ( zu Abschnitt 3.2 )		81
<u>Anlage 2</u>	Korrelationsrechnungen zu Abschnitt 5.2		90
	Literaturverzeichnis		95

# ÜBER DEN SCHALUNGSDRUCK VON FRISCHBETON

## 1. Einleitung

Die Frage nach der Größe und Verteilung des Schalungsdrucks beim Betonieren wird in vielen Veröffentlichungen behandelt, von denen die ersten bereits im vergangenen Jahrhundert erschienen sind. In der Reihe der Untersuchungen zeigen sich die Fortschritte des Betonbaus, des Schalungsbaus, der Betontechnologie und der Meßtechnik. So läßt es sich erklären, daß nur wenige Arbeiten zu annähernd übereinstimmenden Ergebnissen geführt haben. - Die Untersuchungen im Laboratorium finden ihre Grenzen in den Frischbetonmassen, die für Versuchsreihen, die der Praxis nahekommen, benötigt werden. Andererseits sind die in der Baupraxis vorgenommenen Prüfungen in Reihenversuche schwer einzuordnen, weil nur in wenigen Fällen auf den Arbeitsablauf der Baustelle Einfluß genommen werden kann und der Baustoff Beton selbst auf jeder Baustelle, wenn nicht sogar bei jedem Bauteil, unterschiedlich zusammengesetzt oder verarbeitet wird. Außerdem sind Schalungsart, Schalungsquerschnitt und die Konstruktion des Schalgerüstes in jedem Einzelfall anders, so daß eine sehr große Zahl von Messungen des Schalungsdrucks notwendig wäre, um die mannigfaltigen Einflüsse erfassen und bewerten zu können. -

In einer Arbeit des American Concrete Institute (1) wurden folgende Faktoren angegeben, die den Schalungsdruck des Frischbetons mehr oder weniger beeinflussen könnten:

1. die Betoniergeschwindigkeit
2. die Betonkonsistenz
3. das Betongewicht
4. die Größe der Zuschlagstoffe
5. die Frischbetontemperatur
6. die Außentemperatur während des Betonierens
7. die Rauigkeit und Dichtheit der Schalung
8. der Schalungsquerschnitt
9. die Verdichtung z.B. infolge Rüttelns
10. der Arbeitsvorgang auf der Baustelle
11. der Porenwasserdruck
12. die verwendete Zementart
13. die Gesamthöhe des Frischbetons

Diese Veränderungen können noch ergänzt werden z.B. durch die Steifigkeit des Schalungsgerüstes und die Rütteltiefe.

Soweit die einzelnen Verfasser auf diese Einflüsse eingehen, wird bei der Angabe ihrer Arbeiten darauf verwiesen.

## 2. Auszüge aus bisherigen Arbeiten

- 2.1 Die bisher umfangreichste neuere deutschsprachige Veröffentlichung über den Schalungsdruck lieferten Graf und Kaufmann (2). Sie berichteten darin über eigene und Versuche anderer Forscher, deren Arbeiten im folgenden zur umfassenden Behandlung des Fragenkomplexes teilweise noch einmal beschrieben werden. Im wesentlichen handelt es sich dabei jedoch um älteres Schrifttum und Versuche, die inzwischen zwanzig und mehr Jahre zurückliegen.
- 2.2 In Deutschland hat erstmalig Noack (3) Messungen des Schalungsdrucks von Gußbeton in den Jahren 1916 und 1917 vorgenommen. Dabei hat er an einem hölzernen Kasten (1,97 m lang, 0,62 m breit und 2,64 m hoch) während des Betonierens die Verformungen der 6 cm breiten und 2 cm dicken Schalbretter gemessen. Die Durchbiegungen waren erheblich und erreichten einen Größtwert von 20,6 cm. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse wandte er das bereits im Jahre 1895 von Janssen (4) für sogenannte Halbflüssigkeiten entwickelte Druckgesetz an und fand die Gleichung

$$p = \frac{\gamma}{f \cdot c} (1 - e^{-k \cdot c \cdot h})$$

mit  $p$  = Seitendruck des Frischbetons ( $\text{Mp/m}^2$ )

$\gamma$  = Rohdichte des Frischbetons nach der Verdichtung (Mittelwert nach Noack  $2,1 \text{ t/m}^3$ )

$q$  = Bodendruck des Frischbetons ( $\text{Mp/m}^2$ )

$U$  = Grundrißumfang der Schalungseinheit ( $\text{m}^2$ )

$F$  = waagerechter Querschnitt der Schalungseinheit ( $\text{m}^2$ )

$c$  = Quotient  $U : F$

$f = \text{tg } \psi' =$  Reibungswert zwischen Beton und Schalung

$k = f(p/q) = \text{Reibungsbeiwert für}$   
 erdfeuchten Beton  $k = 0,401$   
 weichen Beton  $k = 0,380$   
 flüssigen Beton  $k = 0,375$   
 $h = \text{Füll- bzw. Druckhöhe des Frischbetons (m)}$

Für unendlich große Zellen, bei denen  $c = 0$  würde, ergibt  $\lim p = \frac{k}{1-k} \cdot h$ . Mit den angegebenen  $k$ -Werten folgen  $\lim p = 0,99 h$  bis  $1,23 h$ .

- 2.3 Vor Noack hatten bereits mehrere amerikanische Forscher Schalungsdrücke von Gußbeton gemessen und ausgewertet. Die von ihnen angewendeten Meßverfahren waren unterschiedlich: Cullough ermittelte die Verformungen der Schalungsbretter, Shunk (5) verwendete Kolben mit Gewichtshebeln. Er gab den Druck in Abhängigkeit von der Betoniergeschwindigkeit und der Temperatur an. Ashley benutzte hydraulische Pressen und Germain Vorläufer von Druckmeßlösen. Die aus ihren Versuchen mit flüssigem Beton gewonnenen Diagramme sind in Bild 1 dargestellt. Die Grenzwerte nach Noacks Ansätzen sind ebenfalls aufgenommen und liegen niedriger als die von Shunk und Germain angegebenen Werte, zeigen aber eine gewisse Übereinstimmung mit den von Cullough und Ashley gefundenen Druckkurven.

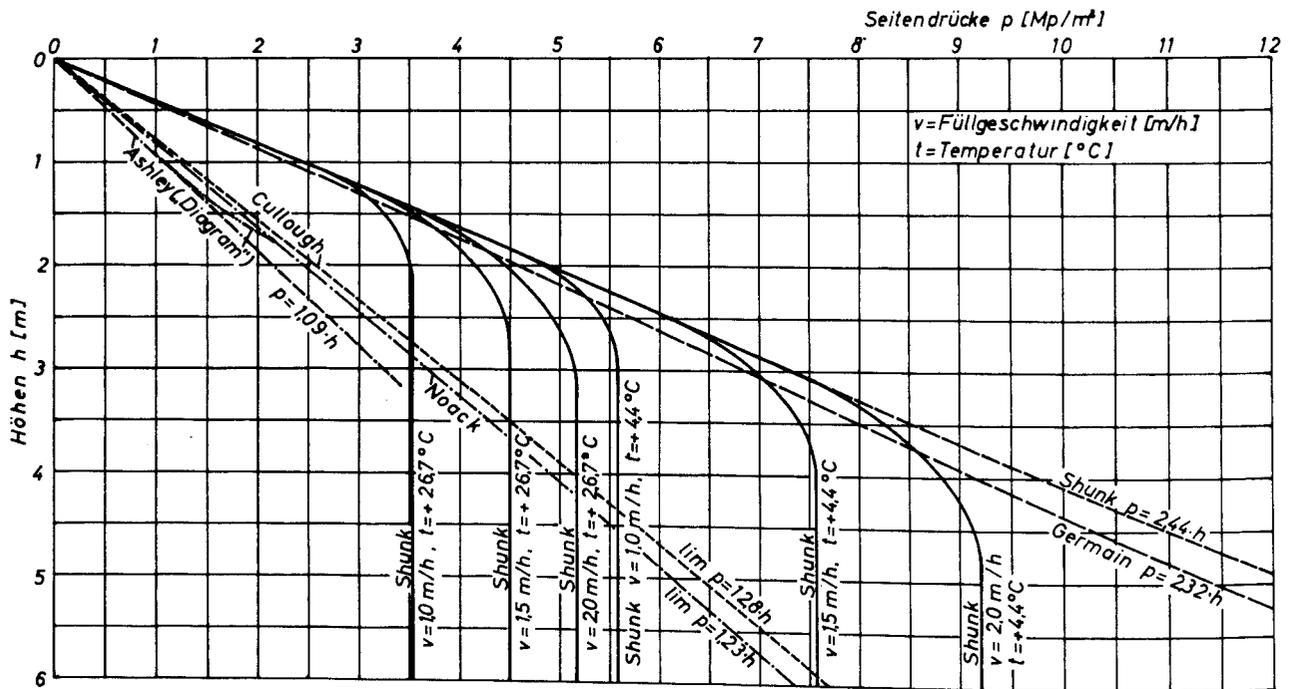


Bild 1

### Seitendruck von flüssigem Beton

- 2.4 Unter Hinweis auf einige z.T. schwere Bauunfälle, deren Ursachen in zu niedrig bemessenen Seitenschalungen lagen, untersuchte Böhm (6) die von Shunk und Noack gegebenen Berechnungsvorschläge. Nach Shunk und Germain sollte frischer Gußbeton wie eine Flüssigkeit mit einer Rohdichte von 2,44 bzw. 2,32 t/m<sup>3</sup> wirken, während Noack, Cullough und Ashley den flüssigen Beton als "Halbflüssigkeit" ansahen und die entsprechenden Asymptotenwerte  $\lim p = 1,28$  (1,23 bzw. 1,09)  $h$  angaben. Böhm hält die Berechnung nach Noack grundsätzlich für richtig, bemängelt jedoch die Versuchsergebnisse mit nach seiner Auffassung zu niedrigen Schalungsdrücken. Er führte dies darauf zurück, daß Noack den Reibungsbeiwert  $f = \text{tg } \varphi'$  mit 0,64 bzw. 0,70 zu hoch angesetzt hätte, weil dieser Betrag niemals größer sein könnte als der Tangens des natürlichen Böschungswinkels  $\varphi$  für Beton. Nach seinen Schätzungen sollte  $\varphi' = \varphi/2$  gesetzt werden.

Der natürliche Böschungswinkel ändere sich außerdem in den folgenden Phasen:

- frisch eingebrachter Gußbeton in geschmeidigem Zustand
- Beton nach erfolgtem Setzen der groben Bestandteile und Ausscheiden des überschüssigen Wassers
- Beton nach dem Erstarren.

Unter der Annahme, daß der Seitendruck nach dem Erstarren des Betons nicht mehr zunimmt, sollen folgende Phasen gelten:

a) für den geschmeidigen Beton  $\varphi = 15^\circ$ ,  $\text{tg } \varphi = 0,27$ ;  $\varphi' = 7,5^\circ$ ,  $\text{tg } \varphi' = 0,13$

b) für den abgesetzten Beton (wie bei gesättigtem nassen Sand oder Kies)

$$\varphi = 25^\circ, \text{tg } \varphi = 0,466; \varphi' = 12,5^\circ, \text{tg } \varphi' = 0,22$$

B ö h m berechnet den Seitendruck nach der von K o e n e n (7) angegebenen Gleichung für den Seitendruck einer Halbflüssigkeit:

$$p_s = \frac{\gamma}{m} (1 - e^{-mx}) \cdot \text{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \text{ mit}$$

$$m = \frac{U}{F} \cdot \text{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \text{tg } \varphi' = c \cdot \text{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \text{tg } \varphi'$$

Die Bezeichnung U, F, c und  $\text{tg } \varphi'$  stimmen mit den von Noack gewählten überein. Ferner bedeuten

$\varphi$  = natürlicher Böschungswinkel des Betons

$\gamma$  = Rohdichte des Gußbetons (hier:  $2.200 \text{ kg/m}^3$ )

x = Tiefe des betrachteten Querschnitts unter der Betonoberfläche

Für  $x = \infty$  wird  $\max p_s = \frac{\gamma}{c \cdot \text{tg } \varphi}$ , mit  $c = \frac{U}{F}$

und für  $c \rightarrow 0$ , d.h. für die unendlich große Zelle, ergibt sich  $\lim p_s = \gamma \cdot x \cdot \text{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$

Der gleiche Wert gilt auch nach der Coulombschen Erddrucktheorie für die senkrechte Wand und waagerechte Geländelinie.

Mit den Werten für Gußbeton ergibt sich  $\lim p_s = 2200 \cdot 0,59 \cdot x = 1298 x \sim 1300 x \text{ (kp/m}^2\text{)}$

Böhm berücksichtigt in seinen durch Beispiele erläuterten Berechnungsvorschlägen auch den Einfluß der Zeit auf den Seitendruck von Gußbeton.

Während sich nach damaligen Erfahrungen frisch eingebrachter Gußbeton binnen zwei bis drei Stunden gesetzt haben sollte, hängt der Abbindebeginn des Betons im wesentlichen von der Zementart, dem Wassergehalt des Betons und der Temperatur ab. Für mittlere Temperaturen von  $8^\circ$  bis  $10^\circ \text{ C}$  rechnete Böhm mit einer Abbindezeit von 12 Stunden.

Werden die Reibungswerte  $\text{tg } \varphi'$  in die Gleichung für den größten Seitendruck eingesetzt, ergibt sich für die Anfangsphase, den geschmeidigen Beton, ( $\text{tg } \varphi' = 0,13$ )

$$\max p_{s1} = \frac{2200}{c \cdot 0,13} = \frac{16900}{c} = \frac{17000}{c} \text{ (kp/m}^2\text{)} \text{ mit } c = \frac{U}{F}$$

und für den abgesetzten Beton, ( $\text{tg } \varphi' = 0,22$ )

$$\max p_{s2} = \frac{2200}{c \cdot 0,22} = \frac{10000}{c} = 0,59 \max p_{s1}$$

In Bild 2 ist die Abnahme des Seitendrucks von frisch eingebrachtem Gußbeton dargestellt, wobei die Annahme gemacht wurde, daß das Setzen des Betons nach drei Stunden mit dem Abbindebeginn des Betons zusammenfällt. Nach vorstehender Rechnung würde Gußbeton zu diesem Zeitpunkt nur noch 59 % des Seitendrucks ausüben.

Um die Rechnung zu vereinfachen, sollte aber mit einer geradlinigen Druckabnahme über 12 Stunden gerechnet werden.

Wegen der etwas umständlichen Berechnung der Seitendrucklinie nach der Gleichung für Halbflüssigkeiten wurden von B ö h m die Ersatzlinienzüge für die Siloberechnung nach M ö r s c h ( O F C ) und nach S o r ( O A B C ) übernommen (Bild 3).

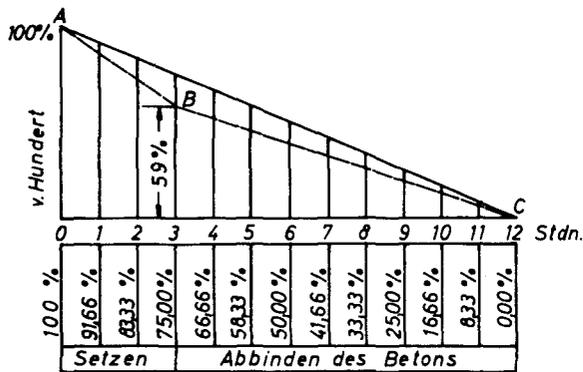


Bild 2

Abnahme des Schalungsdrucks nach Böhm

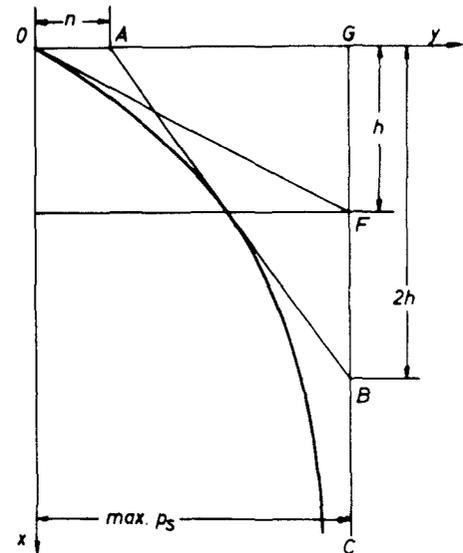


Bild 3

Ersatzlinienzüge für den Schalungsdruck  
nach Mörsch (OFC) und Sor (OABC)

Nach dem "Handbuch für Eisenbeton" ergibt sich für die Silodruckkurve

$$h = \frac{\max p_s}{\gamma \cdot \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} \quad \text{und}$$

$$n = OA = 0,264 \max p_s$$

Nach dem von Mörsch empfohlenen Linienzug wird der Schalungsdruck für die in einer Stunde erreichte Betonhöhe  $x$  mit

$$\lim p = 1300 \cdot x = p_{st} \quad (\text{kp/m}^2)$$

errechnet und bei der Summation der jeweilige stündliche Abminderungsfaktor nach Bild 2 berücksichtigt (s. Tab. 1). Der größte Seitendruck ergibt sich nach 11 Stunden mit  $p_{\max} = 5,5 p_{st} = 7150 x \quad (\text{kp/m}^2)$

Wenn die Änderung der Drucklinie nach Sor angenommen werden soll, tritt an die Stelle  $p_{st}$  jetzt

$$p_{sg} = n + \Delta p,$$

$$\text{mit } n = \frac{4300}{c} \quad \text{und}$$

$$\Delta p = 478 v, \quad \text{dem Druckzuwachs pro Stunde,}$$

wobei  $v$  die Betoniergeschwindigkeit bedeutet. Während  $n$  wie in Bild 2 gezeigt abnimmt, folgt  $\Delta p$  dem Verlauf des Drucks wie bei der Mörsch-Linie (s. Zahlentafel S. 5).

Wenn die Füllhöhe der Zelle  $H$  nach 12 Stunden nicht gleich  $2h = \frac{26}{c}$  ist, werden folgende Fälle unterschieden:

1.  $H \geq 2h$ , d.h.  $2h$  wird nach 12 Stunden oder später erreicht. Hier entsteht der größte Seitendruck zu dem Zeitpunkt, bei dem die Tiefe  $2h$  erreicht ist.
2.  $H \leq 2h$ . Hier entsteht der größte Seitendruck nach 7 Stunden:  $\max p_s = (0,42 n + 4,67 \Delta p) \quad (\text{kp/m}^2)$

## Zahlentafel

Drucklinien für den Schalungsdruck  $kp/m^2$

Stunden	p	nach Mörsch	nach Sor
0	$p_0$	$0,0 p_{st}$	n
1	$p_1$	$0,917 p_{st} \approx 0,92 p_{st}$	$(0,92 n + 0,92 \Delta p)$
2	$p_2$	$(0,92 + 0,83) p_{st} = 1,75 p_{st}$	$(0,83 n + 1,75 \Delta p)$
3	$p_3$	$(1,75 + 0,75) p_{st} = 2,50 p_{st}$	$(0,75 n + 2,50 \Delta p)$
4	$p_4$	$(2,50 + 0,67) p_{st} = 3,17 p_{st}$	$(0,67 n + 3,17 \Delta p)$
5	$p_5$	$(3,17 + 0,58) p_{st} = 3,75 p_{st}$	$(0,58 n + 3,75 \Delta p)$
6	$p_6$	$(3,75 + 0,50) p_{st} = 4,25 p_{st}$	$(0,50 n + 4,25 \Delta p)$
7	$p_7$	$(4,25 + 0,41) p_{st} = 4,67 p_{st}$	$(0,42 n + 4,67 \Delta p) = p_{max}$
8	$p_8$	$(4,67 + 0,33) p_{st} = 5,00 p_{st}$	$(0,33 n + 5,00 \Delta p)$
9	$p_9$	$(5,00 + 0,25) p_{st} = 5,25 p_{st}$	$(0,25 n + 5,25 \Delta p)$
10	$p_{10}$	$(5,25 + 0,17) p_{st} = 5,42 p_{st}$	$(0,17 n + 5,42 \Delta p)$
11	$p_{11}$	$(5,42 + 0,08) p_{st} = 5,50 p_{st}$	$(0,08 n + 5,50 \Delta p)$
12	$p_{12}$	$(5,50 + 0,0) p_{st} = 5,50 p_{st}$	$5,50 \Delta p)$

In einem Rechenbeispiel für eine Stützmauer von 12 m Länge, 1,50 m Dicke und 6 m Höhe, die mit einer Betoniergeschwindigkeit von 0,33 m/h aus Gußbeton erstellt werden soll, ergibt sich der größte Seitendruck  $\max p_s = 2,105 \text{ Mp/m}^2$  nach 7 Stunden bei einer Betontiefe von 2,33 m. Nach Noack würde sich für  $H = 3,33 \text{ m}$   $p = 2,0 \text{ Mp/m}^2$  ergeben, ein etwa übereinstimmender Wert. Würde die gleiche Mauer aber mit einer Betongeschwindigkeit von 1,0 m/h hergestellt, dann ergäbe die Sor-Linie ein  $\max p = 3,65 \text{ Mp/m}^2$  nach 6 Stunden, also bei 6 m Betontiefe, während nach Noack  $\max p = 2,50 \text{ Mp/m}^2$  und nach Shunk  $\max p = 4,20 \text{ Mp/m}^2$  errechnet würden.

Nach den auf Baustellen beobachteten Verformungen der Schalbretter empfahl Böhm, für Stampfbeton einen Seitendruck von  $2,0 \text{ Mp/m}^2$  anzunehmen.

2.5 Weitere Versuche über den Schalungsdruck von Gußbeton haben Schinkel und Schönfelder (8) vorgenommen. Mit Hilfe von Membran-Meßdosen von 100 mm Durchmesser, bei denen die Membran aus Gummi bestand, die Meßdose mit Wasser gefüllt war und der Innendruck an einem Federmanometer abgelesen wurde, führten sie Baustellenmessungen im Sommer und im Herbst durch. In die Seitenwände eines Rahmenblocks von 9,75 m Länge, 1,90 m Breite und 7,46 m Höhe wurde der Beton aus Hochofenzement und Kiessand bis 25 mm Korngröße mit einer Betoniergeschwindigkeit von 0,4 m/h eingefüllt. Im Sommer traten die höchsten Seitendrucke nach rd. 3 Stunden bei Betonhöhen zwischen 1,15 und 1,55 m über den Meßdosen auf und erreichten 1,15 bis  $2,8 \text{ Mp/m}^2$ . Bei kühler Witterung stiegen alle Meßwerte an, und zwar wuchs der Höchstdruck nach rd. 4 Stunden auf 3,3 bis  $4,2 \text{ Mp/m}^2$  bei Betonhöhen von 1,8 bis 2,05 m über den Meßdosen.

Vergleichsweise sei angeführt, daß

$$\text{nach Noack für den Sommersversuch } p_{max} = 2,3 \text{ Mp/m}^2$$

$$\text{für den Herbstversuch } p_{max} = 2,6 \text{ Mp/m}^2$$

$$\text{nach Böhm für den Sommersversuch } p_{max} = 2,6 \text{ Mp/m}^2$$

$$\text{für den Herbstversuch } p_{max} = 4,2 \text{ Mp/m}^2$$

errechnet werden können.

2.6 Mautner (9) berichtete im Jahre 1932 von Versuchen über den Schalungsdruck bei Pumpkret-Beton, bei denen er für die Druckmessungen ebenfalls Membranmeßdosen von jedoch nur 7 cm Durchmesser verwendet hatte.

Die Schalung war für einen größten Seitendruck

$$p = k \cdot \gamma \cdot h = 0,85 \cdot 2,35 \cdot h$$

berechnet. Der Pumpbeton war aus Portlandzement, Kiessand und Splitt mit einem Größtkorn von 30 mm zusammengesetzt und hatte eine Rohdichte von  $2,35 \text{ t/m}^3$ . Bei einem Versuch wurde bis zu einer gleichmäßig erreichten Füllhöhe von 1,90 m ein Seitendruck wie für eine Flüssigkeit mit dem Gewicht des Betons erzielt, der jedoch sofort bei einer Arbeitsunterbrechung abfiel. -

Mauthner fand bei Auswertung seiner Versuche, daß sich der k-Faktor mit der Zeit t gradlinig änderte. Für  $t = 0$  wäre  $k = 1,0$ , der nach rd. 8,3 Stunden auf  $k = 0$  abfalle. Damit würde

$$p = \gamma \cdot h \cdot \left(1 - \frac{t}{8,3}\right),$$

- 2.7 Der Amerikaner T e l l e r (10) untersuchte im Jahre 1930 erstmalig den Einfluß des Rüttelns auf den Schlungsdruck von Frischbeton an Schalzellen von rd. 3,6 m Höhe, rd. 0,6 m Breite und rd. 20 cm Dicke. Die von ihm verwendeten Membranmeßdosen arbeiteten pneumatisch-elektrisch. Zwei Metallmembranen in der Meßdose schlossen bei gegenseitiger Berührung einen Stromkreis. Der auf die innere Membrane wirkende Betondruck wurde dadurch ermittelt, daß zwischen die Flächen Luft gepumpt wurde, bis der Stromkreis unterbrochen wurde. Es wurden an 5 Schalzellen Versuche vorgenommen. Der Beton wurde aus Zement, Sand und Kies in den Gewichtsteilen 1 : 2 : 4 mit unterschiedlichem Wassergehalt zusammengesetzt und hatte eine Rohdichte von rd.  $2,4 \text{ t/m}^3$ .

Mit einer Betoniergeschwindigkeit von rd. 6 m/h wurden die Zellen gefüllt, wobei der Frischbeton in zwei Zellen durch Stochern und in den drei anderen durch einen Außenrüttler (3600 U/min) verdichtet worden ist. Die Versuche ergaben, daß der mit dieser Füllgeschwindigkeit eingebrachte und durch Rütteln verdichtete Beton wie eine Flüssigkeit mit einer Rohdichte von rd.  $2,4 \text{ t/m}^3$  wirkte. Unmittelbar nach Betonierende zeigte sich ein beträchtlicher Abfall des Seitendrucks. Die gemessenen Höchstdrücke betragen bei einer Betonhöhe von 3,36 m über der Meßdose rd. 7,8 bis 8,1  $\text{Mp/m}^2$ . Der Druckverlauf in den mit gestochertem Beton gefüllten Zellen war nach der Konsistenz des Betons unterschiedlich. Bei dem steiferen Beton (3 1/2" Eindringmaß) nahm der Druck bis zur halben Füllhöhe (1,84 m) geradlinig zu ( $p$  rd.  $3,2 \text{ Mp/m}^2$ ) und erreichte bei einer Betonhöhe von rd. 2,60 m den Größtwert von rd.  $3,7 \text{ Mp/m}^2$ .

Dagegen wurden für weicheren Beton (7 1/2" Eindringmaß) bei rd. 0,9 m Betonhöhe  $p$  rd.  $2,3 \text{ Mp/m}^2$  gemessen; danach knickte die Drucklinie ab und erreichte bei voller Füllhöhe und 3,36 m Betontiefe bis zur Meßdose  $p_{\text{max}}$  rd.  $4,6 \text{ Mp/m}^2$ . Teller konnte bei seinen Versuchen bei unterschiedlichen Temperaturen verschiedene Säulen betonieren. Einen wesentlichen Einfluß der Temperatur (9,5 bzw.  $23^\circ \text{C}$ ) auf die bei dieser Betoniergeschwindigkeit auftretenden Höchstdrücke und den Druckabfall nach Betonieren konnte er nicht feststellen.

Bei der Bewertung dieser Versuchsergebnisse ist zu beachten, daß die sehr hohe Betoniergeschwindigkeit nur bei Säulen und schmalen Wänden erreicht werden kann. Dennoch sind die festgestellten Drücke nicht zuletzt deshalb so hoch, weil der Außen-Schalungsrüttler sich über die gesamte Säulenhöhe ausgewirkt hat. Außerdem ist mit der Druckmeßdose nicht der aktive Druck des Frischbetons gemessen worden, sondern beim Auseinanderpressen der Membranen ein Druck auf den Frischbeton ausgeübt und dabei der passive Seitendruck festgestellt worden.

- 2.8 Dagegen untersuchte R o b y (11) den Schalungsdruck an rechteckigen Säulenquerschnitten mit 76 cm Kantenlänge und 4,57 m Höhe, wobei er die Durchbiegungen einer in die Schalung eingebauten 11 mm dicken und 150 mm breiten Stahlplatte ermittelte. Die Platte war am unteren Teil der Holzschalung eingebaut und auf zwei Schneiden mit einer Stützweite von 71 cm gelagert. Roby untersuchte die Einflüsse der Betonzusammensetzung, der Betongeschwindigkeit und der Temperatur. Der Beton wurde mit Stochern verdichtet. Die Ergebnisse sind in Bild 4 dargestellt und in der folgenden Zahlentafel angegeben.

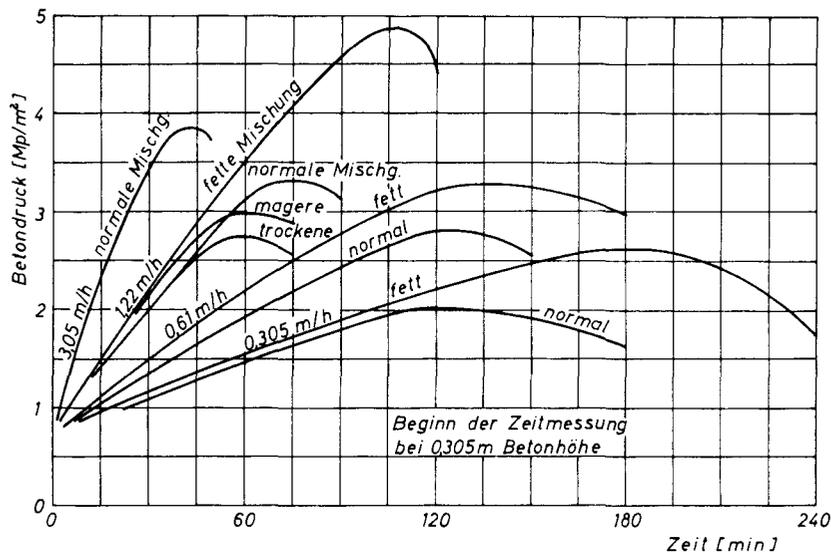


Bild 4

Einfluß der Betoniergeschwindigkeit auf den Betondruck  
nach Roby.

Zahlentafel

Betonmischung:	Normal	Trocken	Fett	Mager
Zusammensetzung in Gew. Teilen:	1:2:3 1/2	1:2:3 1/2	1: 1 1/4:2 1/4	1: 2 1/2:5
Wasserzementwert:	0,91	0,86	0,66	1,10
Eindringmaß:	7"	3"	7"	7"

Betonmischung	Betoniergeschwindigkeit m/h	Größter Druck Mp/m <sup>2</sup>	Zeit bis zum Erreichen des größten Druckes
Normal	0,30	2,05	3 Std.
"	0,60	2,78	2 1/2 "
"	1,22	3,27	1 1/2 "
"	3,05	3,81	3/4 "
Fett	0,30	2,64	4 "
"	0,60	3,37	3 "
"	1,22	4,89	2 "

Die Seitendrücke sind bei diesen Versuchen umso größer gewesen, je zementreicher die Betonmischungen waren. Die Betonmischungen mit einer Temperatur von 37,8° C (100° F) haben um 40 - 25 % geringere Seitendrücke ergeben als bei Betontemperaturen von 15,6° C (60° F).  
Ebenso wie Teller gibt auch Roby keine mathematische Auswertung seiner Versuche.

2.9 Graf und Kaufmann (2) berichteten über Versuche auf Baustellen und im Laboratorium. - An den senkrechten Flächen einer 5,50 m dicken, 11 m langen und 12,35 m hohen Schleusenmauer wurden mit Membranmeßdosen Schalungsdruckmessungen vorgenommen. Die Meßdosen hatten 19 cm Ø. Die Verformungen der Membrane konnten an einer Meßuhr abgelesen werden.

Die Stahl-Schalung des Betonblocks war mit senkrechten und waagerechten Gitterträgern abgestützt.

Der Beton enthielt  $225 \text{ kg/m}^3$  Traßzement. Die Zuschlagstoffe bestanden aus Kiessand bis zu 70 mm Korngröße. Das Ausbreitmaß betrug 40 cm, die Frischbetontemperatur 12 bis  $15^\circ \text{C}$  bei Lufttemperaturen zwischen 8 und  $18^\circ \text{C}$ . Die Rohdichte des Frischbetons wurde mit  $2430 \text{ kg/m}^3$  ermittelt. Der Beton wurde nach dem Einbringen durch Stochern verdichtet. Im ersten 4,05 m hohen Abschnitt betrug bei einer Betonierzeit von rd. 12 1/2 Stunden die Steiggeschwindigkeit 0,32 m/Std. Die Maximaldrücke traten nach 4 1/2 bis 4 3/4 Stunden auf und betragen 3,0 bis  $3,3 \text{ Mp/m}^2$ . -

Die Versuche wurden von Welt (12) ausgewertet. Er stellte danach die folgende Gleichung für den größten Seitendruck für gestocherten Beton auf:

$$\max p_s = 0,85 \gamma_b \cdot H,$$

worin  $\gamma_b$  die Betonrohddichte ( $\text{t/m}^3$ ) und H die bei Erstarren (Abbinden) des Betons erreichte Betonhöhe bedeuten ( $H = v \cdot z$  mit  $v =$  Steiggeschwindigkeit und  $z =$  Bindezeit des Betons (Erstarrungsbeginn)). Nach dem Überschreiten von H erfolgt kein weiterer Druckanstieg. -

Es müßte jedoch als Schwierigkeit angesehen werden, den Erstarrungsbeginn von Beton vorauszusagen.

Über ihre Versuche im Prüfraum an Schalungen für Betonsäulen mit quadratischem Querschnitt von 50 cm Kantenlänge und 4,0 m Höhe berichten Graf und Kaufmann auch an anderer Stelle (13). In die aus etwa 25 mm dicken Brettern bestehende Holzschalung waren die vorstehend beschriebenen Membranmeßdosen im Abstand von 48 cm über der Grundfläche eingebaut worden. Die Schalungsfugen waren mit Gipsmörtel abgedichtet. - Es wurden 4 Säulen angefertigt. Die Betonzusammensetzung war für je 2 Säulen annähernd gleich, jedoch wurde für den Rüttelbeton eine geringere Wassermenge verwendet.

Es wurden bestimmt für

Säule	I (gestochert)	II (gerüttelt)	III (gerüttelt)	IV (gestochert)
Mischungsverhältnis Zement/trockene Zuschlagstoffe in Gew. Teilen	1 : 7,6	1 : 7,7	1 : 7,6	1 : 7,6
Sandgehalt	50	50	80	80 %
Zementgehalt	251	255	222	$218 \text{ kg/m}^3$
Wasserzementwert	0,78	0,71	1,05	1,23
Betonsteife	A=45	E=4,9	E=5,4	A=40 cm
Betonrohddichte	2,35	2,40	2,15	$2,15 \text{ t/m}^3$
Würfelfestigkeit nach 42 Tagen (20cm)	239	295	115	$97 \text{ kp/cm}^2$

Der Beton wurde in Schichten von 50 cm Höhe eingebracht. In den Säulen II und III wurde er mit einem Innenrüttler mit einer Rütteltiefe von 60 cm an jeweils 5 Stellen verdichtet und in den Säulen I und IV durch 110maliges Einstoßen einer Holzlatte in jede Schicht gestochert.

Die Versuchsergebnisse sind nachfolgend angegeben:

Säule	I	II	III	IV
größter Seitendruck $p_s$	1,55	1,61	3,05	$1,47 \text{ Mp/m}^2$
hierbei Betonhöhe H	0,94	0,99	1,59	1,14 m
Zeit nach Einfüllen der ersten Mischung nach Verdichten	55	71	87	40 min
$0,85 \cdot \gamma_b \cdot H$ (nach Welt)	1,88	2,02	2,91	$2,08 \text{ Mp/m}^2$

Bei den Säulen I und II, deren Beton gut gekörnt war und 50 % Sand enthielt, ist kein wesentlicher Unterschied infolge der Verarbeitung erkennbar. Dagegen sind bei dem mit feineren Zuschlagstoffen angemachten Beton der Säulen III und IV große Druckunterschiede aufgetreten. Bei der Säule III war der Schalungsdruck mehr als doppelt

so groß wie bei der gestocherten Säule IV.

Die gemessenen Seitendrücke sind kleiner als die von anderen Forschern an Versuchsbauteilen mit größeren Querschnitten gemessenen Werte. Die Verfasser führten dies auf die Silowirkung zurück, die bei kleineren Querschnitten einen Einfluß hat. -

An einem sehr großen Bauwerk hatten Graf und Mitarbeiter Gelegenheit, bei kühler und später bei warmer Witterung Schalungsdruckmessungen vorzunehmen. Mehrere Blöcke mit 3,25 m Dicke, 21,6 m Länge und 12,5 m Höhe sollten ohne Unterbrechung betoniert werden. Hinter den Stahlschalplatten waren im Abstand von 50 cm T-Träger waagrecht angebracht, die den Schalungsdruck auf waagerechte und senkrechte Gitterträger überleiteten. Die 270 m<sup>2</sup> großen Seitenwände wurden durch 70 Ankerschrauben in 5 waagerechten Reihen gehalten. Die gesamte Schalungskonstruktion war verfahrbar. 30 Meßanker und 8 Meßdosen wurden eingebaut. An den Meßankern wurden die Längenänderungen mit Setzdehnungsmesser gemessen. An den Meßdosen (190 mm Ø) wurden die Drücke über Meßuhren ermittelt. -

Wintermessung: Der Beton enthielt 374 kg Eisenportlandzement und hatte einen Wasserzementwert von 0,5 bei einer Rohdichte von 2,32 t/m<sup>3</sup>. Das Ausbreitmaß betrug im Mittel 43 cm. In die Schalung wurde der Beton gepumpt. Er hatte eine Temperatur von 7 bis 8° C bei Außentemperaturen von 2 bis 7,4° C. Die Verdichtung erfolgte durch Innenrüttler. Die Betoniergeschwindigkeit betrug 1,18 m/Std.

Die für eine dreieckförmige Verteilung des Schalungsdrucks mit 10 Mp/m<sup>2</sup> an der Grundfläche- entsprechend einer Flüssigkeit mit einer Rohdichte von 0,8 t/m<sup>3</sup>- berechneten Ankerkräfte ergaben nur in der unteren Reihe eine annähernde Übereinstimmung mit den Meßwerten. Mit den Meßdosen wurden größte Seitendrücke um 3 Mp/m<sup>2</sup> gemessen. Der größte Schalungsdruck betrug rd. 3,15 Mp/m<sup>2</sup> bei einer Betonhöhe von rd. 1,6 m über der Meßstelle. -

Bei der Sommermessung an einem Betonblock gleicher Abmessungen wurden Betontemperaturen von 18° bis 19° C bei Außentemperaturen von 18° C ermittelt. Das Ausbreitmaß des in gleicher Art zusammengesetzten Betons war im Mittel 41 cm. Die Betoniergeschwindigkeit betrug 1,23 m/Std. Die Meßergebnisse zeigten um rd. 10 % kleinere Ankerzugkräfte als bei der Wintermessung. Die an den Meßdosen ermittelten Schalungsdrücke waren sogar im Mittel um 24 % geringer als bei der Wintermessung. -

Bei einem anderen Bauwerk wurden Schalungsdruckmessungen an einer 9,65 m hohen Stahlschalung vorgenommen, über die auch M u h s (14) berichtete. Für den Beton wurden Portlandzement und Hochofenzement mit einem Zementgehalt von 435 kg/m<sup>3</sup> verwendet. Das Ausbreitmaß betrug 40,5 bis 54,4 cm, im Mittel 48 cm, und die Rohdichte 2,22 bis 2,39 t/m<sup>3</sup>, im Mittel 2,32 t/m<sup>3</sup>. Bei Außentemperaturen um den Gefrierpunkt lagen die Frischbetontemperaturen um 4° C. Der Beton wurde gepumpt und mit Innenrüttlern verdichtet. Die mittlere Betoniergeschwindigkeit betrug 0,55 m/Std. Die Schalungsdrücke wurden mit Meßdosen von 190 mm Ø und 500 mm Ø der Membranen gemessen. Dabei ergaben sich für die größeren Meßdosen etwas geringere Drücke. Der Größtdruck betrug bei einer Betonhöhe von rd. 4,0 m über den Meßpunkten 4,0 Mp/m<sup>2</sup> bei den kleinen und 3,6 Mp/m<sup>2</sup> bei den großen Meßdosen. -

- 2.10 H o f f m a n n (15) benutzte bei seinen Modellversuchen einen Schalungskasten von 1,03 m Höhe, 2,14 m Länge und 1,0 m Breite. Den Schalungsdruck ermittelte er aus der Dehnung von Meßankern. Der Beton wurde entsprechend einer vorgesehenen Bauausführung als Kernbeton und Schalenbeton für die 20 cm dicken Außenschichten ausgeführt. Er bestand aus 180 kg/m<sup>3</sup> (Kern) bzw. 250 kg/m<sup>3</sup> (Schale) Bindemittel, je zur Hälfte Portlandzement und Thurament. Die Zuschlagstoffe enthielten 2 % Thurament als Feinsand, 33 % Sand 0 - 7 mm, 30 % Feinkies 7 - 30 mm und 35 % Grobkies 30 - 60 mm (in Gewichtsprozenten). Der Wasseranteil war beim Schalenbeton 136 l, beim Kernbeton 126 l, das entspricht Wasserzementwerten von 0,54 bzw. 0,70. Der Beton wurde in drei gleich hohen Lagen eingebracht. Jede Lage wurde mit einem Innenrüttler verdichtet. Nach vollständiger Füllung des Modellkörpers wurden stufenweise Belastungen von je 5,85 t aufgebracht. Die Versuche dauerten 18 Stunden. Bei einer mittleren Betoniergeschwindigkeit von 0,35 m/h bzw. entsprechender Zusatzbelastung traten die größten Seitendrücke unter der ersten und zweiten Zusatzlast auf und erreichten rd. 1,2 Mp/m<sup>2</sup>. -

Bei der Auswertung der Versuche griff Hoffmann auf das Coulombsche Erddruckgesetz zurück, das für unendlich große Zellen gilt:

$$p_s = \gamma \cdot x \cdot \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\psi}{2} \right) = \gamma \cdot x \cdot \lambda$$

Bei gleichmäßigem Betonieren mit der Steiggeschwindigkeit  $v = \frac{x_0}{t_0}$  beträgt nach Ablauf der Zeiteinheit der Seitendruck in dem Ausgangspunkt

$$p_{st} = \gamma \cdot v \cdot \lambda$$

Da der Abbindevorgang des Betons nach T Stunden - bei Böhm 12 Stunden - abgeschlossen sein und danach keine Zunahme des Seitendruckes mehr erfolgen sollte, ersetzt Hoffmann den von Böhm vorgeschlagenen Rechenweg der schrittweisen Annäherung durch

$$p_0 = p_{st} \int_0^t \left(1 - \frac{t}{T}\right) dt = \gamma \cdot v \cdot \lambda \left(t - \frac{t^2}{2T}\right)$$

Diese Gleichung gilt für die Seitendruckänderung an der Sohle eines Betonblocks. In beliebiger Höhe x ist

$$p_x = \gamma \cdot v \cdot \lambda \left(t - \frac{x}{v} - \frac{\left(t - \frac{x}{v}\right)^2}{2T}\right); \quad (\text{für } t \leq T)$$

Aus den Versuchsergebnissen errechnet Hoffmann die  $\lambda$ -Werte, die insbesondere im Anfangsstadium sehr schwanken, in dem der Beton lose geschüttelt, danach gerüttelt und schließlich vom aufgehenden Beton belastet wird. Als rechnerischen Ausdruck für den  $\lambda$ -Wert zu einem beliebigen Zeitpunkt (t) und in beliebiger Höhe x über der Sohle wählt Hoffmann

$$\lambda = \lambda_0 \cdot e^{-a \left(t - \frac{x}{v}\right)}$$

wobei  $\lambda_0$  den Anfangswert von  $\lambda$  für Frischbeton und  $a = \frac{1}{T}$  einen reziproken Beiwert der Abbindezeit T bedeuten.

Die Meßwerte liegen zwischen zwei Asymptoten:  $\lambda_0 = 0,93$  für eingerüttelten Beton,  $\lambda_0 = 0,36$  für lose eingeschütteten Beton mit  $a = 0,1$  in beiden Fällen.

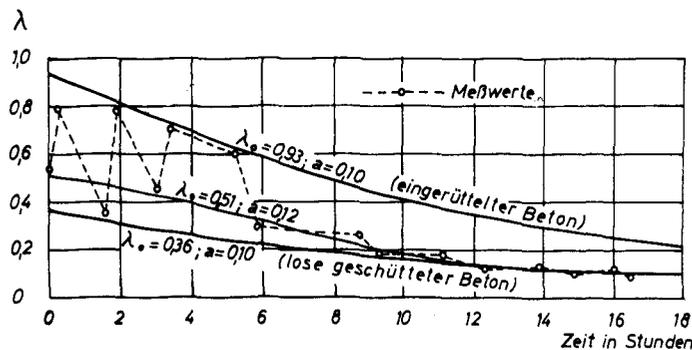


Bild 5  $\lambda$ -Werte nach Hoffmann

Mit dieser Gleichung für  $\lambda$  wird vorstehende Gleichung für den Seitendruck eines mit gleichmäßiger Geschwindigkeit aufsteigenden Betons in beliebiger Höhe

$$p_x = \gamma \cdot v \cdot \lambda_0 \left(t - \frac{x}{v}\right) e^{-a \left(t - \frac{x}{v}\right)}$$

Der Höchstwert für p wird für  $x = v \left(t - \frac{1}{a}\right)$  erreicht; er ist von x und t unabhängig und beträgt

$$\max p = \gamma \cdot \lambda_0 \cdot \frac{v}{a} \cdot e^{-1} = 0,368 \cdot \gamma \cdot \lambda_0 \cdot \frac{v}{a}$$

Für  $x = 0$  wird er nach der Zeit  $t = \frac{1}{a}$  erreicht.

In einer Zuschrift zu Hoffmanns Arbeit hat G a e d e (16) den Schalungsdruck eines Betons, der zur Zeit t bis zur Höhe y über einem Punkt 0 aufgebracht ist, mit p angesetzt. Wenn die Betonoberfläche mit der gleichbleibenden Geschwindigkeit  $v = \frac{dy}{dt}$  steigt, ändert sich gleichzeitig der Seitendruck um

$$dp = \lambda \cdot \gamma \cdot dy$$

Darin ist  $\lambda = \frac{p_{\text{waagrecht}}}{p_{\text{vertikal}}}$ . Er ist vom inneren Verformungswiderstand und von der Zeit  $t$  abhängig.

Gaede zeigt, daß die Annahme einer geradlinigen Verminderung der  $\lambda$  - Werte in der Abbindezeit  $T$  den Versuchsergebnissen von Hoffmann näher kommt als dessen komplizierter Ansatz einer  $e$  - Funktion. - Unter Hinweis darauf, daß Hoffmann die weiteren Auflasten auf seinen Versuchskörper als ruhende Lasten eingetragen hat, äußert Gaede Bedenken dagegen, die von Hoffmann ermittelten  $\lambda_0$  - Werte besonders bei großen Betonkörpern mit dichten Schalungen anzuwenden. Hoffmann verwies danach auf seinen Berechnungsvorschlag, in dem er die  $\lambda_0$  - Werte für eingerüttelten Beton durchgehend anwandte. Er erhielt z.B. für  $v = 0,353$ ,  $\lambda_0 = 0,93$ ,  $\gamma = 2,4 \text{ t/m}^3$  und  $T = 10 \text{ Std.}$  bzw.  $\frac{1}{a} = 10$  oder  $a = 0,1$

$$p_{\text{max}} = 0,368 \cdot 2,4 \cdot 0,93 \frac{0,353}{0,1} = 2,9 \text{ Mp/m}^2$$

2.11 Drechsel (17) behandelte in seinem Buch "Die Gleitschalung" den Schalungsdruck unter Berücksichtigung des Schalungsquerschnitts. - Die Form des Betonquerschnitts wird durch das Verhältnis von Querschnittsfläche ( $F$ ) und Umfang ( $U$ ) festgelegt (s. auch Noack und Böhm). Je kleiner  $F : U$ , desto kleiner ist der Betondruck. Für größere Querschnitte ( $F : U > 0,5$ ) setzte er - ohne Berücksichtigung des Betonerhärtens -

$$p_x = \gamma \cdot h \cdot k_1$$

mit  $\gamma$  = Betonrohddichte,  $h$  = Tiefe des betrachteten Punktes unter der Betonoberfläche und  $k_1$  einem Beiwert, der den Böschungswinkel des Frischbetons und den Reibungswinkel zwischen Beton und Schalung einschließt.

Für verschiedene Betonkonsistenzen werden die  $k_1$ -Werte angegeben, die nach den Angaben von Böhm errechnet sind.

Für schmale Querschnitte ( $F : U < 0,5$ ) übernahm Drechsel den Ansatz von Böhm unter Hinweis auf die Differentialgleichung für eine differentiale Scheibe.

Er errechnete

$$\max p = \frac{\gamma}{\mu'} \cdot \frac{F}{U}$$

mit  $\mu'$  = Reibungsbeiwert zwischen Schalung und Beton.

Nach Drechsel kann sich bei einem ununterbrochen durchgehenden Gleitbetrieb eine Verminderung des Betondrucks nicht auswirken. - Nach seinen Überlegungen über die Abbindezeit des Betons ist die wirksame Druckhöhe  $H = v \cdot T$  mit  $v$  = Betoniergeschwindigkeit und  $T$  = Abbindezeit des Betons. Für den Fall  $F : U > 0,5$  fand er für die Größe des Betondrucks

$$p_s = \gamma \cdot h \cdot k_1 \cdot \left(1 - \frac{h}{H}\right) \quad (\text{nach der Gleichung einer Parabel})$$

und 
$$p_{s \text{ max}} = 0,25 \gamma \cdot H \cdot k_1 \quad \text{für } h = \frac{H}{2}$$

Im Bereich des erhärtenden Betons (über  $H = v \cdot t$ ) ist der Gesamtdruck  $P = 2/3 \cdot \gamma \cdot H \cdot p_{s \text{ max}}$ .

Für den Fall  $F : U < 0,5$  gab Drechsel folgenden größten Schalungsdruck an:

$$p_{s \text{ max}} = \gamma \cdot k_1 \cdot R \left(1 - e^{-\frac{h}{4R}}\right)$$

mit 
$$k_1 = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$$

und 
$$R = \frac{F}{U \cdot \mu' \cdot k_1}$$

Drechsel empfahl, die Silodruckkurve nach Mörsch (s. Böhm) zu berechnen und die sich in jeder Tiefe  $h$  ergebenden Drücke mit dem Abminderungsfaktor

$$\gamma = \left(1 - \frac{h}{H}\right) \text{ zu multiplizieren.}$$

2.12 T o u s s a i n t (18) behandelte den Schalungsdruck von Betonkörpern, die so große Querschnitte haben, daß die stündliche Betonierhöhe zwischen 0,10 m und 1 m liegt. Nach seiner Annahme soll der Betondruck vom hydraulischen Druck linear bis zu dem Wert Null abnehmen. Die Abbindezeit soll für normale Verhältnisse mit  $T = 8$  Std. geschätzt werden. -

Toussaint untersuchte die Verhältnisse bei

- kontinuierlichem Betrieb
- lagenweisem Einbringen des Betons und
- lagenweisem Einbringen des Betons mit Rüttelverdichtung.

Beim kontinuierlichen Betrieb soll die Füllhöhe linear zunehmen, wie etwa bei Pumpbeton. Der Fall kommt zwar in der Praxis fast nicht vor, jedoch gehen die weiteren Überlegungen davon aus.

Bei einer stündlichen Mischerleistung  $M$  in  $m^3/h$  und einer wagerechten Querschnittsfläche  $F$  in  $m^2$  soll in der Tiefe

$$H = \frac{M}{F} \cdot T$$

nach  $T$  Stunden der Schalungsdruck  $p = 0$  betragen.

Dazwischen könne der Druck nach einer quadratischen Parabel verteilt sein. Für den Betondruck gilt zu einer Zeit  $t$  ( $< T$ ) und einer entsprechenden Betonhöhe  $h$  ( $< H$ )

$$p = \frac{T-t}{T} \cdot \gamma \cdot h \text{ bei}$$

$$h = \frac{M}{F} \cdot t \text{ bzw. nach } t = \frac{F}{M} \cdot h$$

Daraus folgt:

$$p = \gamma \left(1 - \frac{F}{MT} \cdot h\right) \cdot h = \gamma \cdot h \cdot \left(1 - \frac{h}{H}\right)$$

Der größte Seitendruck entspreche dem Parabelscheitel ( $h = \frac{H}{2}$ ) mit  $p_{\max} = \frac{\gamma \cdot H}{4}$

Wenn der Beton lagenweise in Schichtdicken  $h_1$  eingebracht, aber nicht gerüttelt wird, herrsche unmittelbar nach dem Einbringen der neuen Schicht ein rein hydrostatischer Seitendruck.

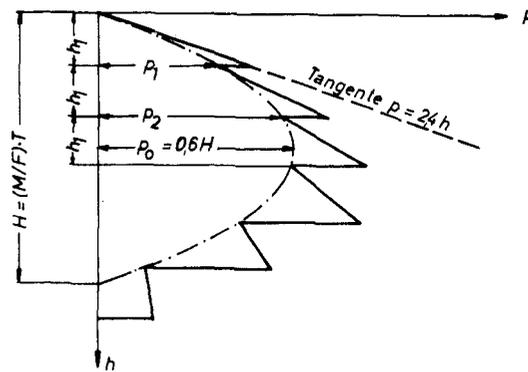


Bild 6 Betoneinbringung ohne Rütteln (Toussaint)

Bis zum Einbringen der zweiten Schicht sei der hydrostatische Seitendruck bis auf den einer Höhe  $h_1$  entsprechenden Punkt der Druckparabel  $p_1 = \left(1 - \frac{h_1}{H}\right) \gamma \cdot h_1$

abgefallen und steige dann wiederum hydrostatisch, wobei die Drucklinie durch den Nullpunkt und den Punkt  $p_1$  in der Betontiefe  $h_1$  verlaufen soll, bis sie in der Betontiefe  $h_2 = h_1 + h_1$  den Wert  $p_2^1$  erreicht:

$$p_2^1 = p_1 \cdot 2.$$

Hier falle der Druck wiederum bis auf den entsprechenden Parabelwert ab:

$$p_2 = \left(1 - \frac{2h_1}{H}\right) \gamma \cdot 2 \cdot h_1$$

Von diesem Punkt ausgehend erreiche der hydrostatische Druck der nächsten Schicht den Wert

$$p_3^1 = 1,5 \cdot p_2 \cdot h_1$$

Der Grundparabel ist also eine sägeförmige Druckverteilung überlagert, die zeichnerisch schnell zu ermitteln ist.

Bei lagenweise eingebrachtem Rüttelbeton, dem auf Ingenieurbaustellen am häufigsten Fall, wird angenommen, daß die Rüttelung zunächst noch voll in der vorher eingebrachten Schicht wirke. Dies ist bei Schichthöhen von 0,40 bis 0,70 m wahrscheinlich. - Wurde in den beiden vorauf behandelten Fällen ein mit der Zeit  $t$  linear abgeminderter Schalungsdruck  $p = \alpha \cdot \gamma \cdot h$  angenommen, wobei

$$\alpha = 1 - \frac{t}{T} = 1 - \frac{h}{H} \text{ beträgt,}$$

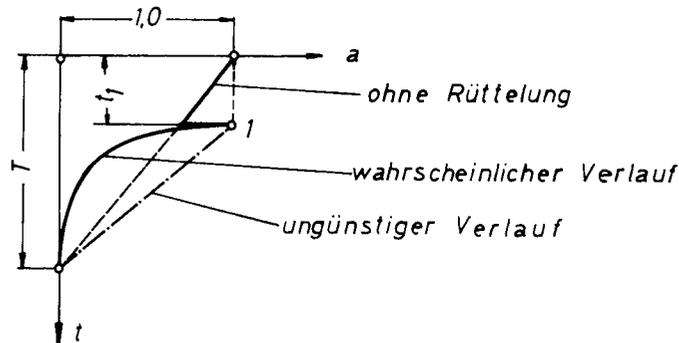


Bild 7 Zeitlicher Verlauf des Schalungsdruckes bei Rüttelung (Toussaint)

so tritt beim Rütteln jetzt der Wert  $\alpha = 1$  noch einmal bei  $t_1$  bzw.  $h_1$  auf. Der ungünstigste Verlauf des Abbindefaktors wird linear auf den Wert 0 bei  $T$  bzw.  $H$  abfallend angenommen. Gerüttelter Beton ist dagegen oft schon so standfest, daß nach wenigen eingerüttelten Lagen bereits kein Druckanstieg mehr zu verzeichnen ist. Für den hier angenommenen ungünstigsten Verlauf gilt

$$\alpha = 1 - \frac{t - t_1}{T - t_1} .$$

Daraus folgt die Gleichung einer neuen Grundparabel

$$\begin{aligned} p &= \left( 1 - \frac{t - t_1}{T - t_1} \right) \gamma \cdot h = \left( 1 - \frac{h - h_1}{H - h_1} \right) \gamma \cdot h \\ &= \gamma \cdot h \left( 1 - \frac{h}{H} \right) \frac{H}{H - h_1} . \end{aligned}$$

Das ist die um den Faktor  $\frac{H}{H - h_1}$  vergrößerte Grundparabel, die durch den Punkt  $(h_1 ; \gamma \cdot h_1)$  geht. Der größte Seitendruck der zweiten Schicht ist

$$p_2 = \gamma \cdot h_2 .$$

Er nimmt bis auf den entsprechenden Parabelwert ab, wenn die dritte Lage nach  $t_3$  eingebracht und gerüttelt wird. Der Druck der 3. Lage nimmt wieder hydrostatisch zu, wobei die Drucklinie durch den Nullpunkt und den Parabelpunkt für  $h_2$  bis zur Tiefe  $3 h_1$  läuft. Auch diese Druckfigur einer der neuen Druckparabel überlagerten sägeförmigen Verteilung läßt sich zeichnerisch einfach darstellen und auswerten. - (s. Bild 8)

Werden mehr als eine Schicht von der Rüttelstörung erfaßt, ist der Abminderungsfaktor entsprechend und eine neue Grundparabel zu berechnen (s. Bild 9). Der hydrostatische Druck wirkt dabei bis zu der insgesamt eingerüttelten Betontiefe. -

Toussaint weist aber abschließend darauf hin, daß in Wirklichkeit der Druck zwischen erhärtetem Beton und Schalung nicht bis auf Null abfällt. Nach der von Böhm entwickelten Methode kann sogar u.U. mit Höchstwerten gerechnet werden. Versuchsmessungen haben Zwischenwerte beider Verfahren ergeben.

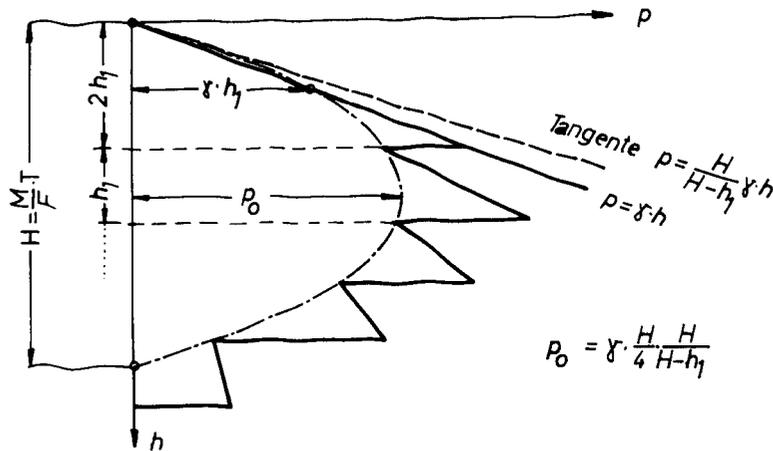


Bild 8 Schalungsdruck mit Rüttelung in einer Schicht

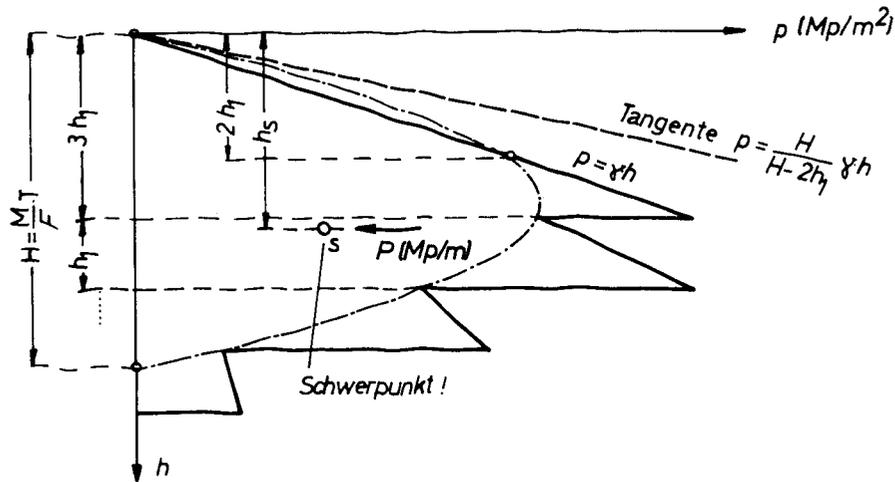


Bild 9 Schalungsdruck mit Rüttelung in mehr als einer Schicht

2.13 Macklin (19) untersuchte den Schalungsdruck von Beton mit dem Mischungsverhältnis 1 : 2 : 4 in Gewichtsteilen und einem Setzmaß 5". Dabei ermittelte er aus den Verformungen der vor dem Betonieren ausreichend durchfeuchteten Schalungsbretter die jeweils auftretenden Seitendrucke. Der Beton wurde durch Stochern und durch Rütteln verdichtet. Aus seinen Messungen und den vorher nach anderen amerikanischen Versuchen bekanntgegebenen Ergebnissen leitet er die Beziehung ab:

$$p = 150 R \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2\sqrt{R}} \right)$$

die für den gestocherten Beton gelten soll. Darin bedeuten

$p$  = größter Schalungsdruck in pound/sq.foot (psf)

$R$  = Betoniergeschwindigkeit in foot/h.

Für gerüttelten Beton wird ein Zuschlag von 300 psf empfohlen (s. Bild 10, S. 17). -

Außerdem werden graphisch dargestellte Faktoren zur Berücksichtigung der Betonzusammensetzung angegeben. Für die zementreichere Betonmischung 1 : 1 : 2 sei mit einem etwa 30 % größeren Seitendruck zu rechnen, für die mageren Betonmischungen mit einem geringeren. Zum Beispiel könne für das Mischungsverhältnis 1 : 4 : 8 mit dem um 35 % geringeren Schalungsdruck als für die Betonmischung 1 : 2 : 4 gerechnet werden. -

Teller hält in einer Zuschrift die nach Macklin errechneten Schalungsdrücke für zu gering. -

2.14 Sehr ausführlich behandelt Guerrin (20) die verschiedenen Erscheinungen des Schalungsdrucks. Er unterscheidet zwischen Gußbeton, plastischem Beton, erdfeuchtem Beton und Rüttelbeton bei großen Schalungsquerschnitten sowie bei kleineren Querschnitten mit Silowirkung. Guerrin rechnet für die verschiedenen Betonarten mit folgenden Böschungswinkeln:

Gußbeton	$\psi = 20^\circ$
erdfeuchter Beton	$\psi = 30^\circ$
Rüttelbeton	$\psi = 0^\circ$
durch Rütteln verdichteter Beton	$\psi = 50^\circ$
durch Stochern verdichteter Beton	$\psi = 30^\circ$

Als Wandreibungswinkel werden

für Holzschalungen	$\psi' = 23^\circ$ und
für Stahlschalungen	$\psi' = 14^\circ$

angegeben. (Zumindest für Gußbeton mit  $\psi = 20^\circ$  erscheinen diese Werte zu hoch. In anderem Zusammenhang haben Böhm und Drechsel darauf hingewiesen, daß  $\psi'$  kleiner als  $\psi$  angenommen werden müsse.) -

Alle Schalungsdrücke werden auf die Abbindehöhe  $H_p$  oder die Betonhöhe  $H < H_p$  bezogen.

$$H_p = v \cdot T$$

mit  $v =$  Steiggeschwindigkeit (m/h)  
des Betons (Betoniergeschwindigkeit)

und  $T =$  Abbindezeit des Betons.

Bei flüssigem und Gußbeton wird der Druck in eine Wasserkomponente und eine Feststoffkomponente zerlegt:

$p = p_w + p_b$ . Bei einer Betonrohddichte von  $2200 \text{ kg/m}^3$  wird  $\Delta_w = 1000 \text{ kg/m}^3$  und  $\Delta_b = 1200 \text{ kg/m}^3$  gewählt.

$\Delta_w$  wirkt als hydrostatischer Druck  $p_w$ , bei  $\Delta_b$  werden für  $p_b$  die Reibungseinflüsse auf den hydrostatischen Druck berücksichtigt. Danach folgt für große Bauteile ein bei der Betonhöhe  $h$  wirksamer Seitendruck

$$p = 1000 \cdot h + 1200 \cdot h \cdot c \quad \text{kg/m}^2$$

mit  $c = \text{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\psi}{2} \right) \cdot \text{tg} \psi'$

und mit den Zahlenwerten  $\psi = 20^\circ$   $\psi' = 23^\circ$  bzw.  $14^\circ$

$$p = 1.495 \cdot h \quad \text{für Holzschalung}$$

$$p = 1.535 \cdot h \quad \text{für Stahlschalung}$$

wobei  $h \leq H_p$  ist.

Der größtmögliche Seitendruck ergibt sich für  $h = H_p = v \cdot T$ .

Für flüssigen Beton wird ein hydrostatischer Schalungsdruck

$$p = \gamma \cdot h$$

angenommen.

Bei erdfeuchtem Beton mit  $\gamma = 2,240$  bis  $2,430 \text{ t/m}^3$  soll mit einem Wert  $c = 0,3$  unabhängig von der Schalungsart gerechnet werden, so daß der Schalungsdruck

$$p = 0,3 \cdot \gamma \cdot h$$

$$p = 675 \text{ bzw. } 730 \text{ h}$$

wird.

Bei Rüttelbeton wird angenommen, daß die wirksame Rütteltiefe  $0,80 \text{ m}$  beträgt und in diesem Bereich hydrostatischer Schalungsdruck wirkt ( $\psi = 0^\circ$ ).

Darunter habe der Beton einen Reibungswinkel  $\psi = 50^\circ$ .

Mit  $\gamma \sim 2.35 \text{ t/m}^3$  folgt  $p_1 = 2.35 \cdot 0,8 = 1,88 \text{ Mp/m}^2$

in der Rütteltiefe und darunter  $p_2 = 2.35 \cdot 0,13 (h - 0,8)$ ,

so daß sich ein Schalungsdruck

$$p = p_1 + p_2 = 1,88 + 2,35 \cdot 0,13 (h - 0,8)$$

oder

$$p = \gamma (0,8 + 0,13 (h - 0,8)) \text{ ergibt.}$$

Bei kleineren Betonquerschnitten wird der Einfluß der Silowirkung berücksichtigt. Nach M. Reimbert ist der Seitendruck auf eine Silowand

$$p = \frac{\gamma \cdot R}{\operatorname{tg} \varphi'} \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{A}{h} + 1 \right)^2} \right]$$

mit  $R = \frac{F}{U}$  (s. auch bei Drechsel Abs. 2.11)

$$A = \frac{R}{\operatorname{tg} \varphi' \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} = \frac{R}{a}$$

Daraus folgt

$$p_h = \frac{\gamma \cdot R}{\operatorname{tg} \varphi'} \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{h \cdot a}{R} + 1 \right)^2} \right]$$

Für die verschiedenen Querschnittsformen werden noch Formbeiwerte (k-Werte) angegeben, z. B. für

kreisförmiges Silo	$k = 1,0$
achteckiges Silo	$k = 1,055$
quadratisches Silo	$k = 1,127$
gleichseitig dreieckiges Silo	$k = 1,654$
unbegrenzt langes Silo	$k = 2,546$ u.a.m.,

mit denen der errechnete Silodruck zu multiplizieren ist.

Für den weichen Beton werden auch hier die beiden Druckkomponenten  $p_w$  und  $p_b$  ermittelt. Für  $\varphi = 20^\circ$  und  $\varphi' = 23^\circ$  bzw.  $14^\circ$  folgt:

$$p_w = 1,000 \cdot h$$

$$p_b = \frac{1,200 \cdot R}{\operatorname{tg} \varphi'} \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{0,49 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{R} + 1 \right)^2} \right]$$

$$p = p_w + p_b = 1,0 \cdot h + \frac{1,2 \cdot R}{\operatorname{tg} \varphi'} \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{0,49 \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{R} + 1 \right)^2} \right]$$

Das Maximum ergibt sich für  $H = \sqrt{T}$ , wenn die Schalungshöhe größer als  $H$  ist.

Bei flüssigem Beton wird die Silowirkung nicht berücksichtigt. Es gilt auch hier:  $p = \gamma \cdot h$

Bei erdfeuchtem Beton ( $\varphi = 30^\circ$ ,  $\varphi' = 27^\circ$  bzw.  $14^\circ$ ) gilt

$$p = \frac{\gamma \cdot R}{\operatorname{tg} \varphi'} \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{h \cdot a}{R} + 1 \right)^2} \right] \cdot k$$

Für Rüttelbeton mit  $\varphi = 30^\circ$ ,  $0^\circ$  und  $50^\circ$  gilt bei  $\gamma = 2,35 \text{ t/m}^3$

$$p_1 = 0,8 \cdot \gamma = 1,88 \text{ t/m}^2$$

$$p_2 = \frac{2,35 \cdot R}{\operatorname{tg} \varphi'} \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{(h - 0,8) a}{R} + 1 \right)^2} \right] \cdot k$$

insgesamt

$$p = 1,88 + \frac{2,35 \cdot R}{\operatorname{tg} \varphi'} \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{(h - 0,8) a}{R} + 1 \right)^2} \right] \cdot k$$

Guerrin stellt abschließend fest, daß die Betoniergeschwindigkeit bei Gußbeton und gestochertem Beton einen erheblichen, bei Rüttelbeton einen geringeren Einfluß hat. -

Die Silowirkung ist bei Rüttelbeton am geringsten und ergibt nur eine Druckminderung von etwa 10 % gegenüber großen Querschnitten. Dagegen nimmt der Schalungsdruck von erdfeuchtem Beton in siloartigen Schalungen bis zu 75 % ab. Der Einfluß des Schalungsmaterials ist sehr gering. Er ist bei steifem Beton und Holzschalung um 3 % geringer als bei Stahlschalung, während er bei den anderen Betonarten vernachlässigt werden kann.

2.15 Eine ausführliche Arbeit von Rodin (21) enthält zahlreiche Versuchsbeschreibungen, Meßergebnisse und Auswertungen, die teilweise bereits in den vorstehenden Abschnitten behandelt worden sind (z.B. von Shunk, Hoffmann, Teller, Macklin). -

Sehr anschaulich sind die hier aufgenommenen Schalungsdruckdiagramme von Maxton (22), in denen die Betoniergeschwindigkeit und die Betontemperaturen berücksichtigt sind (Bild 13). Die Diagramme sind nach Versuchsergebnissen der US Army Engineers und der Portland Cement Association aufgestellt und sollen für steifen Rüttelbeton in großen Schalungsquerschnitten ebenso wie für weichen gestocherten Beton in engen Schalungen gelten, während für Rüttelbeton in engen Schalungen empfohlen wird, mit vollem hydrostatischen Druck zu rechnen. -

Rodin wertet die ihm zur Verfügung stehenden, teilweise unter sehr unterschiedlichen Bedingungen erzielten Meßergebnisse aus, wobei er die unter extremen Temperaturbedingungen und bei besonders bindemittelreichen Betonmischungen ermittelten Ergebnisse ausschaltet. Er kommt zu dem Ergebnis, daß wegen der vielen Einflüsse auf den Schalungsdruck nur eine empirische Darstellung möglich sei, und schlägt für den größten Schalungsdruck  $p_{max}$  in der Tiefe  $h$  unter der Betonoberfläche sowie für die Zeit  $t_s$  bis zum Erreichen des Höchstdrucks bei gestochertem Beton folgende Gleichungen vor, wo die Betoniergeschwindigkeit  $v$  in m/h einzusetzen ist:

$$p_{max} = 2,92 \sqrt[3]{v} = 1,78 h \quad (\text{Mp/m}^2) \quad (\text{Bild 10})$$

$$h = 1,63 \sqrt[3]{v} \quad (\text{m}) \quad (\text{Bild 11})$$

$$t_s = 1,63 \frac{1}{\sqrt[3]{v^2}} \quad (\text{Stdn})$$

Für Innenrüttlung wird vorgeschlagen, bis zu der vorstehenden Höhe  $h$  mit vollem hydrostatischen Druck zu rechnen, wonach sich

$$p_{max} = 3,92 \sqrt[3]{v} = 2,4 h \quad (\text{Bild 12})$$

ergibt. Von dieser Höhe ab könne mit Druckabfall gerechnet werden. Für den Seitendruck am Boden eines Betonkörpers von der Höhe  $H$  wird

$$p_o = \frac{0,015 v - 0,005 (H-h)}{0,015 v}$$

angegeben.

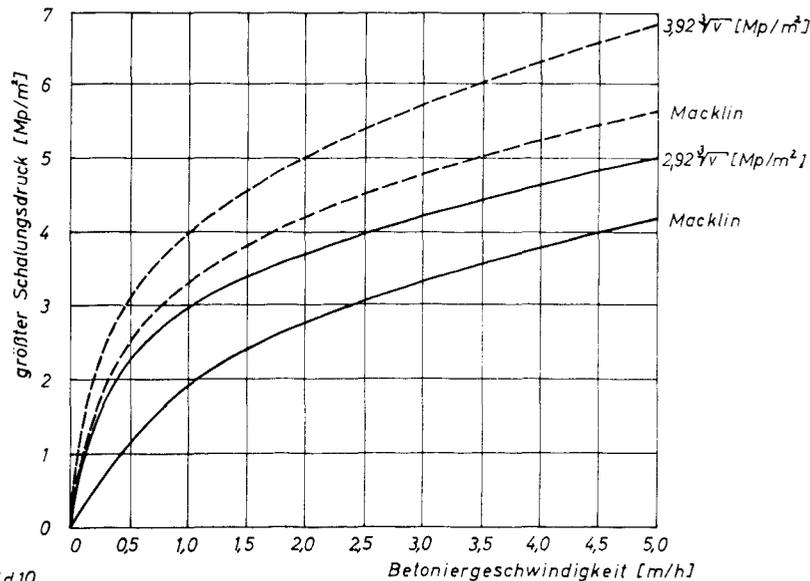


Bild 10

### Verhältnis zwischen größtem Schalungsdruck und Betoniergeschwindigkeit

nach Rodin und Macklin  
für Rüttelbeton (-----) und gestocherten Beton (———)

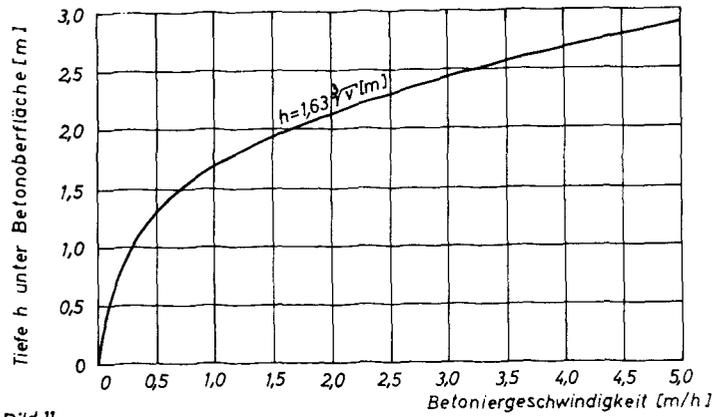


Bild 11  
**Betonhöhe bei größtem Schalungsdruck** nach Rodin

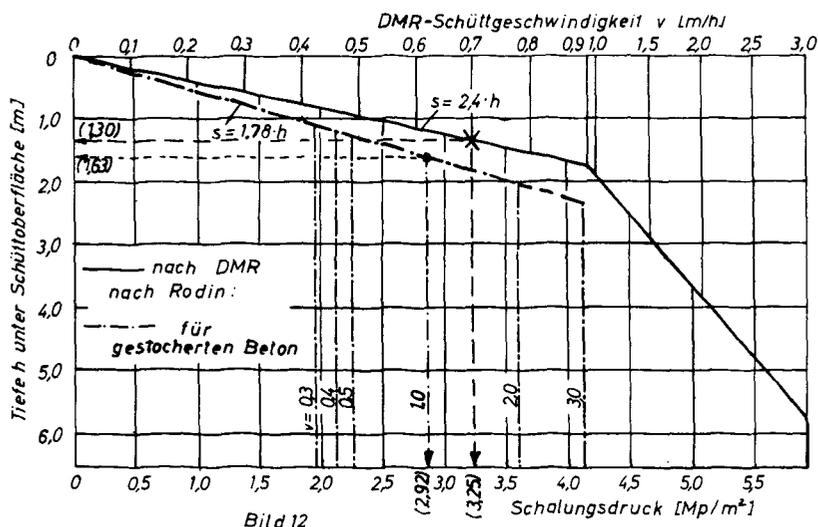


Bild 12  
 Schalungsdruck nach Vorschlag des Departement of Main Road  
 (New South Wales/Austral.) - DMR - und nach Rodin

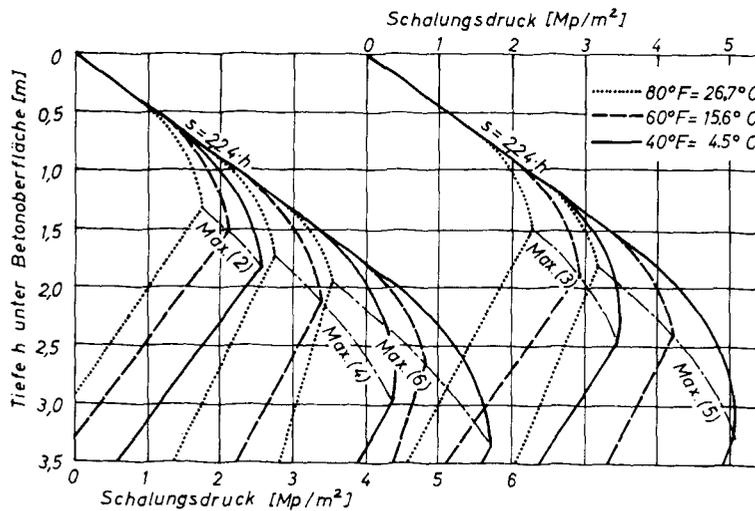


Bild 13  
Schalungsdruck nach Maxton  
 Klammerwerte = Schüttgeschwindigkeit in ft/h

2.16 S c h j ö d t (23) untersuchte den Schalungsdruck unter besonderer Berücksichtigung der Dichtigkeit der Schalung und des damit zusammenhängenden Porenwasserdrucks. Er verwandte die von T e r z a g h i (24) aufgestellte Gleichung für den Seitendruck einer kohäsionsfreien Masse an einer Stelle  $x$

$$p_x = (h \cdot \gamma - h_w \cdot \gamma_o) \lambda_1 + h_w \cdot \gamma_o = h \cdot \gamma \cdot \lambda_1 + h_w \cdot \gamma_o (1 - \lambda_1).$$

Darin bedeuten:

$$\begin{aligned} \gamma &= \text{Rohdichte des Materials (t/m}^3\text{)} \\ \gamma_o &= \text{Rohdichte des Wassers = 1 t/m}^3 \\ h_o &= \text{Tiefe unter der Oberfläche (m)} \\ h_w &= \text{Höhe des Porenwasserspiegels über der Stelle } x \text{ (m)} \\ \lambda_1 &= \text{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) = \text{Reibungskoeffizient des Materials.} \end{aligned}$$

Die Besonderheiten des Frischbetons und erhärtenden Betons werden für die verschiedenen Betontiefen bzw. Betonalter bei den Reibungskoeffizienten berücksichtigt. Bis zu der Bearbeitungstiefe  $h_1$  wird mit dem Flüssigkeitsdruck ( $\lambda_1 = 1$ ) des Frischbetons gerechnet. Sobald das Erstarren zur Zeit  $t = 0$  in der Tiefe  $h$  anfängt, stellt sich der Reibungswinkel  $\varphi$  ein, der sich bis zum Erstarrungsende mit ausreichender Annäherung an die vermutlichen Verhältnisse so ändert, daß  $\lambda_1$  zur Zeit  $t = 0$  ( $\lambda_1 = \lambda$ ) linear bis zum Erstarrungsende ( $t = t_s$ ) abnimmt ( $\lambda_1 = 0$ ). Die Tiefe des erhärteten Betons beträgt  $h_s = v \cdot t_s$  mit  $v =$  Steiggeschwindigkeit des Betons in der Schalung.

$$\text{Mit } \lambda_1 = \lambda \left( 1 - \frac{h}{h_s} \right) = \lambda \left( 1 - \frac{t}{t_s} \right)$$

und  $h_w = \alpha \cdot h$  ergibt sich für die obige Gleichung:

$$p_x = \left[ (\gamma - \gamma_o \cdot \alpha) \lambda \left( 1 - \frac{h}{h_s} \right) + \gamma_o \cdot \alpha \right] \cdot h;$$

darin ist der Dichtigkeitsfaktor:

für dichte Schalung  $\alpha = 1$

für durchlässige Schalung  $\alpha \approx 0$ .

Der Größtwert wird nach Ableitung gefunden mit

$$p_{\max} = \frac{1}{4} \left[ (\gamma \cdot \lambda + \gamma_o \alpha (1 - \lambda)) \left( 1 + \frac{\alpha}{\lambda} \frac{\gamma_o}{\gamma - \gamma_o \cdot \alpha} \right) \right] \cdot h_s.$$

Für  $\lambda = 1$  und  $\alpha = 0$  folgt  $p_{\max} = \frac{1}{4} \cdot \gamma \cdot h_s$ , eine bereits gebräuchliche Faustformel zur Berechnung des Schalungsdrucks und für  $\alpha = 1$  und  $\lambda = 1$

$$p_{\max} = \frac{1}{4} \frac{\gamma^2}{\gamma - 1} \cdot h_s.$$

Die Silowirkung berücksichtigt Schjöd t und entwickelt die auch von anderen Verfassern verwendeten Differentialgleichung

$$dp_v \cdot F = \gamma_1 \cdot F \cdot dh - p_1 \cdot U \cdot \text{tg } \varphi_1 \cdot dh$$

mit  $p_1 =$  waagerechter Druck ohne Porenwasserdruck

$$\gamma_1 = \gamma - \gamma_o \cdot \alpha$$

$\varphi_1 =$  Wandreibungswinkel

$F =$  waagerechter Querschnitt der Schalung

$U =$  Umfang des Schalungsquerschnitts.

$$\text{Mit } F/U = R, \frac{p_1}{p_v} = \lambda \left( 1 - \frac{h}{h_s} \right) \text{ und } \alpha = \lambda \cdot \text{tg } \varphi_1 \frac{h}{R}$$

ergibt sich

$$\frac{dp_v}{dh} = \gamma_1 - \frac{\alpha}{h_s} \left( 1 - \frac{h}{h_s} \right) p_v$$

mit der Lösung

$$p_v = \gamma_1 \cdot K \cdot h_s \text{ und nach Zufügen des Porenwasserdrucks}$$

$$p = \gamma_1 \cdot \lambda \cdot h_s \cdot K \left(1 - \frac{h}{h_s}\right) + \gamma_o \cdot h_w.$$

(Der Zahlenwert von K ist dem Bild 14 zu entnehmen)

Als Rechenwerte empfiehlt Schjödts zu wählen

$\varphi$  zwischen  $20^\circ$  für Massen- bis  $35^\circ$  für erdfeuchten Beton und  $50^\circ$  für gerüttelten Beton

$\psi_1$  für ungehobelte Schalung =  $\varphi$   
für glattere Schalung zwischen  $\varphi/2$  und  $\varphi/3$

$\alpha$  im Normalfall 0,8, bei dichter Schalung 1,0.

Schjödts hat auch den Einfluß der Kohäsion auf den Schalungsdruck untersucht. Er kommt zu dem Ergebnis, daß die größten Schalungsdrücke bereits auftreten, ehe die Kohäsion des erstarrenden Betons wirksam wird und daher ihr Einfluß unbedeutend ist.

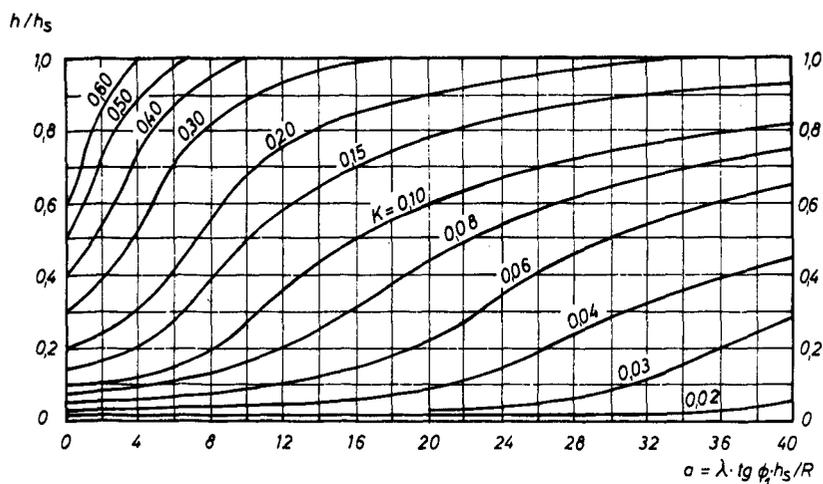


Bild 14 Diagramm zur Ermittlung des von Schjödts verwendeten Faktors K

2.17 O l s s o n (25) griff die auch von Schjödts u.a. angewandte Differentialgleichung für den Silodruck auf:

$$\frac{dp_v}{dh} = \gamma - \frac{U}{F} \cdot \operatorname{tg} \psi_1 \cdot \lambda_1 \cdot p_v$$

und löste sie mit den Ansätzen

a)  $\lambda_1 = \lambda \left(1 - \frac{h}{h_s}\right)$  - geradlinige Abnahme des Reibungskoeffizienten - und

b)  $\lambda_1 = \lambda \left(e^{-\frac{h}{h_s}}\right)$  - exponentielle Abnahme des Reibungskoeffizienten bis zur Zeit  $t_s =$  Erstarrungsende.

Zu a) Mit der Substitution

$$a = \frac{U}{F} \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) v \cdot t_s = \frac{v t_s}{R} \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \lambda$$

und der Veränderlichen  $x = \left( \frac{a}{2} \right)^{1/2} \left( 1 - \frac{h}{h_s} \right)$

ergibt die Lösung für den Seitendruck:

$$p = p_v \lambda \left( 1 - \frac{h}{h_s} \right) = \gamma \lambda v t_s \left( \frac{2x}{a} \right) \left( \frac{\Phi(x_0) - \Phi(x)}{\Phi'(x)} \right)$$

mit  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$  und  $\Phi'(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2}$ ,

deren Werte aus Funktionstabellen entnommen werden können.

Der größte Seitendruck wurde nach der Differentiation  $dp/dx = 0$  ermittelt:

$$p_{\max} = \lambda \gamma v t_s x_0^{1/2} (1 + 2 x_0^2)^{-1}$$

mit  $x_0 = \left( \frac{a}{2} \right)^{1/2}$ .

Zu b) Mit der Substitution von a wie vor und den Veränderlichen  $x = \frac{h}{h_s}$  und  $a \cdot e^{-x} = u$  lautet die Lösung für den Seitendruck:

$$p = p_v \cdot \lambda \cdot e^{-h/vt_s} = \lambda \cdot \gamma \cdot v \cdot t_s \cdot e^{-x} (E(-a) - E(-ae^{-x})) e^{ae^{-x}}$$

mit  $E(-u) = + \int_0^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$ .

Der größte Seitendruck wurde ermittelt zu

$$p_{\max} = \lambda \cdot \gamma \cdot v \cdot t_s \cdot \frac{u}{u_0} (1 + u_1)^{-1}$$

In beiden Rechnungsgängen wird a bestimmt und

bei a)  $x_0 = \sqrt{\frac{a}{2}}$  errechnet und damit tabellarisch  $x_1$ ,  $h_1$  (Betontiefe bei  $p_{\max}$ ) und  $p_{\max}$  sowie

bei b) für  $u_0 = a$  die zugehörigen Werte  $u_1$ ,  $h_1$  und  $p_{\max}$  ermittelt.

Die Berechnung des Schalungsdrucks nach Olsson setzt voraus, daß die angegebenen Tabellen verfügbar sind. - Der Vergleich der beiden Lösungen hat ergeben, daß im Koordinatensystem mit  $f$  ( $h/vt_s$ ) als Ordinate und  $h/vt_s$  als Abszisse die Tangente an die Funktion  $e^{-h/vt_s}$  im Punkte  $h/vt_s = 0$  auf der Abszissenachse den Wert  $t_s = 0,5$  schneidet, während die Gerade  $1 - h/h_s$  zur Zeit  $t_s$  den Wert 1 erreicht. Dies bedeutet, daß die exponentielle Erstarrungsfunktion eine doppelt so große Erstarrungsgeschwindigkeit voraussetzt wie die geradlinige, wenn bei schnellem Erreichen des Maximaldrucks die annähernd gleichen Werte gefunden werden sollten.

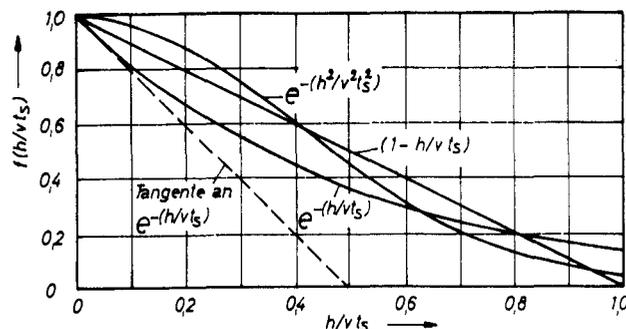


Bild 15 Verschiedene Funktionen für das Erstarren von Frischbeton (Olsson)

2.18 Eine im besonderen konstruktiven Fragen des Baues von Schalungen gewidmete Arbeit veröffentlichte K a h n (26). Der Abschnitt über den Schalungsdruck enthält ein Diagramm, in dem für Rüttelbeton mit einem Zementgehalt von  $300 \text{ kg/m}^3$  bei einer Betontemperatur von  $15^\circ \text{C}$  der Schalungsdruck in Abhängigkeit von der Betoniergeschwindigkeit, die Betontiefe unter der Oberfläche z. Zt. des Maximaldrucks und die entsprechende Zeit aufgetragen sind.

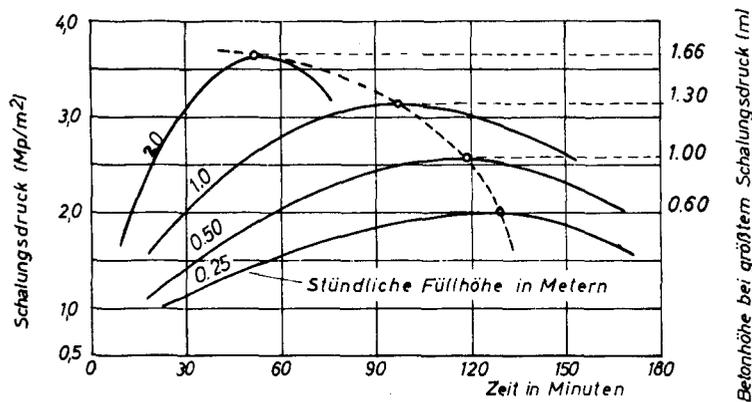


Bild 16

Schalungsdruck in Abhängigkeit von der Betoniergeschwindigkeit — Rüttelbeton mit  $300 \text{ kg/m}^3$  Zement — (Kahn)

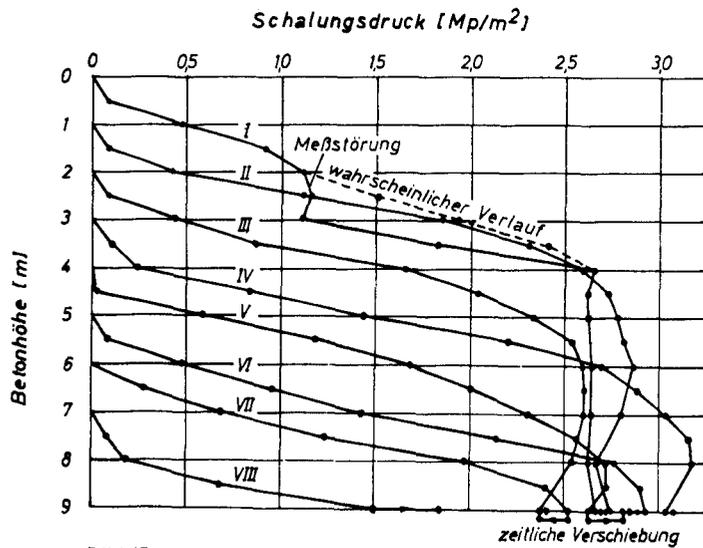


Bild 17

An einem Massenbetonkörper gemessene Schalungsdrücke (Muhs)

K a h n empfiehlt die Temperatureinflüsse wie folgt zu berücksichtigen. Ausgehend von  $15^\circ \text{C}$  sollte für jede um  $1^\circ \text{C}$  höher gemessene Temperatur mit einer Minderung des Seitendrucks von 1 % und für jede um  $1^\circ$  niedriger liegende Temperatur mit einem Druckanstieg um 2 % gerechnet werden (s. auch bei Roby Abs. 2.8 S. 6).

2.19 Muhs (27) hatte gleichzeitig mit Graf und Kaufmann an einem großen Betonbauwerk den Schalungsdruck auf Schalungstafeln ermittelt. Die Auflagerdrücke der Tafeln wurden mit Maihak-Druckdosen gemessen. Bei Außentemperaturen zwischen 0 - 3° C wurde Pumpbeton (Zement(Z 225) 492 kg/m<sup>3</sup>, Mursit 2 kg/m<sup>3</sup>, Wasser-Zementwert W/Z = 0,47) mit einer mittleren Betoniergeschwindigkeit von 0,75 m/Std. eingebracht und mit Innenrüttlern verdichtet.

Die Betontemperaturen betragen in der Mitte des Blocks 4 bis 13° C. Die aus den Auflagerdrücken ermittelten Seitendrücke des Frischbetons sind in Bild 17 aufgetragen. Die größten Werte liegen zwischen 2,6 und 3,15 Mp/m<sup>2</sup>. Die Druckzunahme ist im allgemeinen bis zu 3 m und 3,5 m, bei dem Größtwert bis zu 4,5 m Betontiefe festgestellt worden, doch wurde dieser Wert für unsicher erklärt. - Muhs verglich seine Meßwerte mit den von Rodin (21) und dem Departement of Main Roads, Neusüdwaales, Australien, empfohlenen Lastannahmen und fand, daß die danach ermittelten Seitendrücke stets größer als die Meßwerte waren. -

In einer theoretischen über den Schalungsdruck bei großen Betonquerschnitten angestellten Betrachtung wählte Muhs für den in beliebiger Tiefe x unter der Betonoberfläche angreifenden Seitendruck in Anlehnung an die Erddrucklehre die Gleichung:

$$p_x = \lambda \cdot \gamma \cdot x = \lambda \cdot \gamma \cdot v \cdot t,$$

worin

$\lambda$  = Reibungskoeffizient und

$\gamma$  = Betonrohddichte,

v = Betoniergeschwindigkeit und

t = Zeit

bedeuten.

Da sich die Frischbetoneigenschaften ändern, wurde eine mit der Zeit veränderliche Funktion angeführt. Bis zur Zeit  $t_0$  sollte mit Flüssigkeitsdruck ( $\lambda = 1$ ) und danach damit gerechnet werden, daß  $\lambda$  bei gleichmäßiger Betoniergeschwindigkeit nach der Form einer Hyperbel bis zur Erstarrung zur Zeit  $t_s$  abnimmt. Für t zwischen  $t_0$  und  $t_s$  wurde mit  $\lambda = \lambda_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-\alpha}$

$$p_x = \gamma \cdot v \cdot \lambda_0 \cdot t \cdot t^{-\alpha} \cdot t_0 = \gamma \cdot v \cdot \lambda_0 \cdot t_0^\alpha \cdot t^{(1-\alpha)}.$$

Bei gut verarbeitbarem Beton sollte  $\lambda_0 = 1$  gesetzt werden. Nach seinen Versuchsergebnissen gab Muhs folgende Werte an:

$$\lambda_0 = 1; t_0 = 0,75 \text{ (3/4 Std.) und } \alpha = 0,6.$$

Danach ist p max als gleichbleibender Wert für  $t_s$  zu ermitteln, wobei bei kurzer Betonierdauer

$$t_s = \frac{\text{Höhe des Bauteils}}{\text{Betoniergeschwindigkeit}} = \frac{H}{v} \text{ gesetzt werden kann: } p_{\text{max}} = 2,02 \cdot v \cdot t^{0,4} \sim 2 \cdot v \cdot t^{0,4}$$

Muhs empfahl diese Gleichungen jedoch nur zur Abschätzung empirischer Lösungen und verwies auf die einfache Ermittlung des Schalungsdrucks mit dem DMR-Diagramm, das auf der sicheren Seite liegende Schalungsdrücke ergeben würde.

2.20 Das Committee des American Concrete Institute (ACI) (1) hatte sich die Aufgabe gestellt, zur Vorbereitung brauchbarer Bemessungsvorschriften allgemein gültige Gleichungen für die größten Schalungsdrücke festzulegen. Es hat deshalb viele veröffentlichte Meßergebnisse, theoretische Abhandlungen sowie einzelne in der Praxis des Schalungsbaus bereits angewendete Bemessungsregeln gesammelt und ausgewertet. Die dabei erörterten Einflüsse auf den Schalungsdruck sind in Abs. 1 bereits genannt worden.

Die Betoniergeschwindigkeit wurde von allen Forschern und Praktikern als eine gleichförmige Steiggeschwindigkeit des Betons in der Schalung angesehen und hat auf den Schalungsdruck den größten Einfluß. Ohne Rücksicht auf die Gesamthöhe des Bauteils wurde der Schalungsdruck proportional zur Betoniergeschwindigkeit angesetzt.

Die Betonkonsistenz konnte aus den Angaben über das Setzmaß (slump test) verglichen werden. Allerdings ergaben sich dabei solche Unterschiede, daß die allgemeine Empfehlung gegeben wurde, in der Betonpraxis das Setzmaß von 4 inch, rd. 10 cm, nicht zu überschreiten.

Das Betongewicht (Betonrohddichte) lag in 95 % der Fälle zwischen 2300 und 2400 kg/m<sup>3</sup>. Deshalb wurde die Auswertung auf diesen Bereich beschränkt.

Der Einfluß der Korngröße der Zuschlagstoffe auf den Schalungsdruck wurde für den üblichen Beton als ebenso unbedeutend wie schwer erfaßbar nicht weiter verfolgt.

Die Frischbetontemperatur wurde in mehreren Veröffentlichungen als wichtiger Faktor angesehen und berücksichtigt.

Die Außentemperaturen wurden ebenfalls als wichtig anerkannt und den Frischbetontemperaturen gleichgesetzt, solange einzelne Bestandteile des Betons keine davon stark abweichenden Temperaturen aufwiesen (kaltes oder warmes Anmachwasser, angewärmte Zuschlagstoffe).

Die Rauigkeit und Dichtigkeit der Schalung waren in früheren Untersuchungen stark beachtet. Sie verloren aber an Bedeutung für den Rüttelbeton. Bei engen Wand- oder Säulenschalungen können die Einflüsse aber wieder zunehmen.

Die Rüttelwirkung wurde von verschiedenen Forschern berücksichtigt. Die Schalungsdrücke lagen bei Rüttelbeton um 10 bis 20 % über den für handverdichteten Beton ermittelten Werten.

Die Verarbeitung des lagenweise eingebrachten Frischbetons hat einen großen Einfluß auf den Schalungsdruck. Die Schichthöhen schwankten zwischen 40 und 60 cm. Größere Schichthöhen waren jedoch auch festgestellt worden. Ebenso wurden stellenweise 2 Schichten eingebracht, bevor der Beton gerüttelt worden ist. Die Rütteltiefe sollte jedoch rd. 1,20 m nicht überschreiten. Außenrüttlung wurde im allgemeinen abgelehnt, solange die Schalung dafür nicht besonders stark ausgebildet wäre.

Der Porenwasserdruck war als bestimmter Teil des Schalungsdrucks nur von Schjödts angegeben.

Als Zement war von den meisten Forschern und Firmen Portlandzement benutzt worden. Das Committee berücksichtigte nur ihn und empfahl eine Verminderung der Betoniergeschwindigkeit, wenn langsamer erhärtender Zement, Abbindeverzögerer oder sandreiche Betonmischungen verwendet werden sollten.

Die Gesamthöhe des Frischbetons in der Schalung hängt von der jeweiligen Konstruktion ab. Säulen sollten höchstens bis zu einer Höhe von 5,40 m in einem Zuge gefüllt werden. Wenn sie höher sind, sollte eine Pause von 2 Stunden eingelegt werden. Als Säulen wurden dabei Bauteile bis zu einer größten waagerechten Querschnittsabmessung von 1,80 m eingestuft. Bei Wänden und ähnlichen Bauteilen sollte die Betoniergeschwindigkeit etwa 2,0 m/h nicht überschreiten.

Als wichtigste Faktoren wurden die Betoniergeschwindigkeit  $v$ , die Betonrohddichte  $\gamma = 2,4 \text{ t/m}^3$ , die Betonkonsistenz und die Betontemperatur in den vorgeschlagenen empirischen Gleichungen für den größten Schalungsdruck berücksichtigt.

Aus der allgemeinen Gleichung

$$p = C_1 \left( 1 + \frac{C_2 R}{T} \right)$$

mit  $C_1$  = Gewichtsfunktion (lb/cu. ft.)  
 $C_2$  = Konstante für die Betonkonsistenz  
 $R$  = Betoniergeschwindigkeit (ft/h) und  
 $T$  = Temperatur in Fahrenheit (°F)

wurden folgende Bemessungsformeln entwickelt:

für Säulen:

Höhe < 5,40 m

mit  $v$  (m/h) und  $T_o$  (°C)

$$p = 0,735 + \frac{80 v}{T_o + 17,8} \quad (\text{Mp/m}^2)$$

(mit einem Größtwert bis zu  $p = 14,7 \text{ Mp/m}^2$ ),

für Wände und ähnliche Bauteile:

a) mit einer kontrollierten Füllgeschwindigkeit bis zu 2m/h.

$$p = 0,735 + \frac{80 v}{T_o + 17,8} \quad (\text{Mp/m}^2)$$

b) mit einer Füllgeschwindigkeit von mehr als 2 m/h

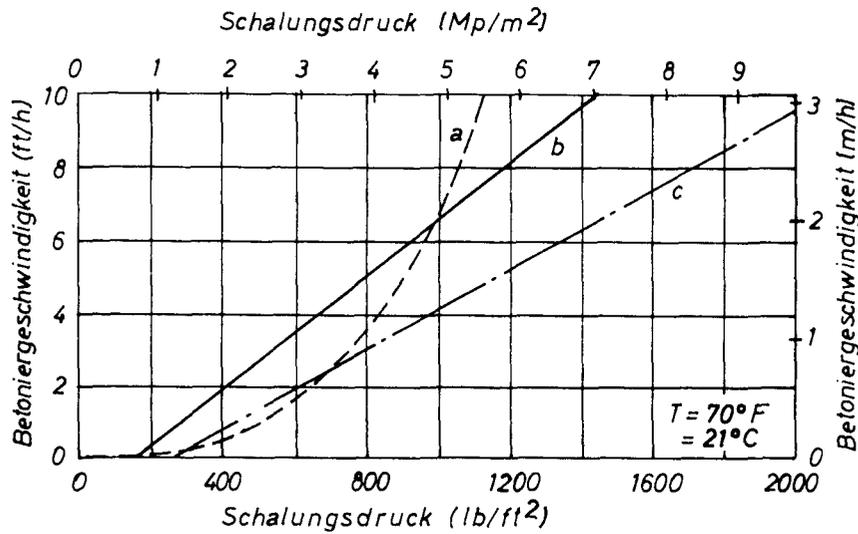
$$p = 3,7 + \frac{25 v}{T_o + 17,8} \quad (\text{Mp/m}^2) \quad (\text{bis zu } 9,6 \text{ Mp/m}^2)$$

$$\text{bzw. } p = 0,735 + \frac{118 + 250 v}{T_o + 17,8} \quad (\text{Mp/m}^2),$$

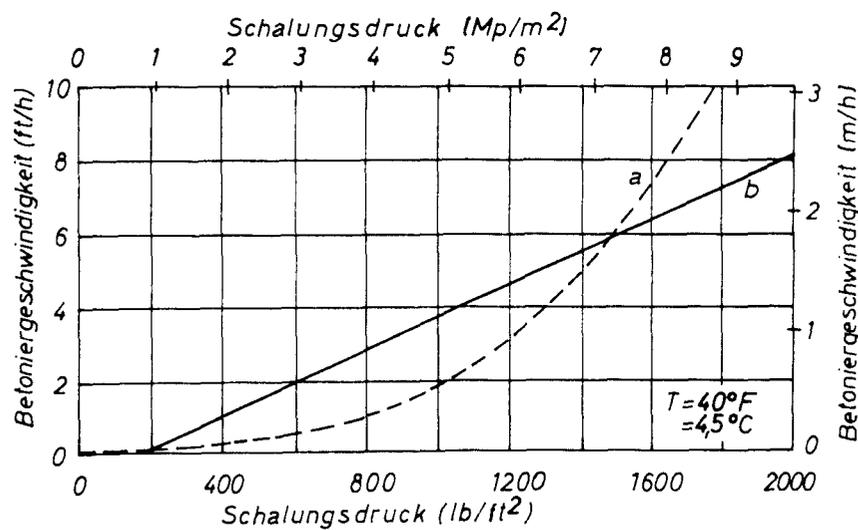
wie in einem späteren Bericht angegeben worden ist (28). Dort wurde außerdem für *M a s s e n b e t o n* (Gewichtstaumauern und -dämme) mit einer Betonrohddichte  $\gamma = 2,4 \text{ t/m}^3$ , einem Setzmaß bis höchstens 4 inch, Schichtdicken bis zu 0,50 m und Betoniergeschwindigkeiten bis zu 0,60 m/h der größte Schalungsdruck angegeben mit:

$$p = 0,585 + \frac{64 v}{T_o + 17,8} \quad (\text{Mp/m}^2).$$

In den Bildern 18 und 19 werden die nach den für Säulen und Wände (a) errechneten Schalungsdrücke mit bekannt gewordenen Meßergebnissen bzw. den nach den Vorschlägen von *Schjöd t* und *Rod in* ermittelten Werten verglichen (Temperatur rd. 21° C und rd. 4° C).



**Bild 18** Vergleich der Lastannahmen nach Vorschlägen von  
a) Rodin  
b) ACI  
c) Schjöd t



**Bild 19** Vergleich der Lastannahmen nach Vorschlägen von  
a) Rodin  
b) ACI

2.21 In einer im Cementbulletin (29) veröffentlichten Abhandlung werden für die Wirkung des Schalungsdrucks von gerütteltem Beton drei Zonen unterschieden:

- A. In den eben eingebrachten und gerüttelten Schichten ( $h$ ) wirkt ein hydrostatischer Druck:  $p = 2,4 \cdot h$ .
- B. In den darunter liegenden Schichten wirkt die Rüttelung nur noch in abgeschwächtem Maße. Deshalb steigt der Schalungsdruck nicht mehr in dem Verhältnis, wie die Frischbetonauflast erhöht wird.
- C. In den tieferen Schichten, in denen der Abbindeprozeß eingesetzt hat, wirkt nur der Schalungsdruck, der sich in den Zonen A oder B entwickelt hat. Ein Druckzuwachs tritt bei steigender Betonhöhe nicht mehr ein.

Bei fortschreitender Betonierung wird der größte Schalungsdruck an der Grenze zwischen den Zonen A und B erreicht. Die hierzu gehörende Betontiefe wird zunächst zeitlich festgelegt. Bei normalen Abbindeverhältnissen und Temperaturen von 15 bis 20° C entspricht sie dem bei einem Betonalter von 2 Stunden erreichten Abstand von der Betonoberfläche. Die Betontiefe nimmt mit sinkenden Temperaturen zu, so daß in der Nähe des Gefrierpunktes nicht mit einer Druckverminderung (Zone B) gerechnet werden soll.

Die Druckzunahme in der Zone B ist veränderlich und überwiegend vom Betonquerschnitt abhängig. – Bei *M a s s e n b e t o n*, d.h. in großen Betonquerschnitten, kann bei Betoniergeschwindigkeiten ( $v$ ) von höchstens 1 m/h sowohl in der Zone A als auch in der Zone B mit hydrostatischem Druck gerechnet werden. Danach folgt bei der 2-Stunden-Grenze

$$p_{\max} = 2 \cdot v \cdot 2,4 \text{ (Mp/m}^2\text{)}$$

Bei anderen Bauten mit kleineren Betonquerschnitten können größere Schüttgeschwindigkeiten auftreten, so daß der Druckzuwachs in der Zone B (z.B. infolge äußerer Reibung und Gewölbewirkung) geringer wird. Wenn als die Grenze zwischen den Zonen A und B die Rütteltiefe, z.B. 1 m, und in der Zone B nur noch eine Druckzunahme um 1/3 des hydrostatischen Wertes angenommen wird, ergibt sich bei normalen Abbindeverhältnissen und Temperaturen für eine Betoniergeschwindigkeit  $v$

$$p_{\max} = 2,4 + \frac{1}{3} (h - 1) \cdot 2,4 \text{ und mit } h = 2v$$

$$p_{\max} = 1,6 + 1,6v.$$

2.22 Die holländischen Richtlinien für Rüttelbeton (30) enthalten folgende Vorschläge zur Ermittlung des Schalungsdrucks:

- a) Während des Rüttelns muß mit hydrostatischem Druck gerechnet werden. Als Betontiefe ist dabei die doppelte Dicke einer gerüttelten Schicht  $d$  anzusetzen:

$$p_0 = 2 \cdot \gamma \cdot d.$$

- b) Nach dem Rütteln kann für den Beton ein innerer Reibungswinkel  $\psi = 50^\circ$  angenommen werden ( $\lambda = 0,13$ ).

Bei sehr langsamer Steiggeschwindigkeit der Betonoberfläche kann der Beton unter den beiden obersten Schichten erstarrt sein. Dann genügt es, den nach a) zu ermittelnden hydrostatischen Schalungsdruck allein anzusetzen. Wenn infolge größerer Betoniergeschwindigkeit der Beton aber noch nicht erstarrt ist, sollen der hydrostatische Druck der beiden obersten Schichten und der reduzierte Druck der tieferen Schichten addiert werden:

$$p = 2 \cdot \gamma \cdot d + 0,13 (H - 2d) \gamma$$

Dabei bedeutet  $H$  die Betontiefe des noch nicht erstarrten Betons, die sich aus der Betoniergeschwindigkeit  $v$  und der Abbindezeit des Betons  $T$  als  $H = v \cdot T$  ergibt. Die Abbindezeit ist vom verwendeten Zement und der Temperatur abhängig und kann zwischen 1 und 15 Stunden schwanken. Über die Betontiefe  $H$  hinaus ist ein Zuwachs des Schalungsdrucks nicht mehr zu erwarten. Ist die Höhe der Schalung niedriger als sich aus  $v \cdot T$  ergibt, so ist die Schalungshöhe  $H'$  in die Formel einzusetzen.

Fall 1:  $H = v \cdot T < H'$  :

$$p = 2 \cdot \gamma \cdot d + 0,13 (H - 2d) \gamma$$

Der größte Druck ergibt sich in der Tiefe  $H$  und bleibt rechnerisch konstant bis zu der Tiefe  $H'$ .

Fall 2:  $H' < vT = H$  :

$$p = 2 \cdot \gamma \cdot d + 0,13 (H' - 2d) \gamma$$

Der größte Druck ergibt sich rechnerisch in der tiefstgelegenen Schicht, entsprechend  $H'$ . (s. Abs. 2.14 bei Guerrin S. 15)

2.23 van Eyle und Boersma (31) führten während des Betonierens einer kreisförmigen Behälterwand (Innendurchmesser 9,96 m, Höhe 7,07 m, Dicke 0,20 m) Schalungsdruckmessungen durch und ermittelten die Zugspannungen in einem Ringanker (Profil [ 8). - Der Beton enthielt  $400 \text{ kg/m}^3$  Zement, hatte das Mischungsverhältnis 1 : 3,88, den Wasserzementwert 0,5 und wurde in rd. 0,40 m hohen Schichten mit einer Füllgeschwindigkeit zwischen 0,5 bis 0,6 m/h eingebracht. Nachdem bei einer Betontiefe von 1,53 m der größte Schalungsdruck  $p_{\max} = 2,16 \text{ Mp/m}^2$  etwa nach  $3 \frac{1}{4}$  Std. aufgetreten war, zeigten sich noch eine Stunde lang Druckschwankungen. Nach  $4 \frac{1}{2}$  Std. fiel der Druck ab, so daß zu diesem Zeitpunkt der Erstarrungsbeginn des Betons angenommen wurde. Die Zugspannung im Ringanker zeigte bis zum Erstarrungsbeginn einen ähnlichen Verlauf wie der Schalungsdruck ( $\sigma = 900 \text{ kp/cm}^2$ ), fiel dann aber nur geringfügig ab ( $\sigma = 800 \text{ kp/cm}^2$ ) und stieg nach 9 Std. erneut um 20 %, als die Schalung wieder angeätzt wurde ( $\sigma_{\max} = 955 \text{ kp/cm}^2$ ), -

Die Meßergebnisse wurden mit den in den holländischen Rüttelrichtlinien (30) enthaltenen Vorschriften über die Berechnung des Schalungsdrucks verglichen.

Bei Lagendicken von 0,4 m,  $T = 4,25$  Std. und  $v = 0,6 \text{ m/h}$  wurde hiernach  $p_{\max} = 2,46 \text{ Mp/m}^2$  errechnet. Die zugehörige Betontiefe ist  $H_w = 2,55 \text{ m}$ . Gemessen war  $p_{\max} = 2,16 \text{ Mp/m}^2$  bei einer Betontiefe von 1,53 m. Die für den gemessenen Schalungsdruck errechnete Ringankerzugspannung betrug  $550 \text{ kp/cm}^2$ , gemessen wurde dabei  $800 \text{ kp/cm}^2$ . Der Unterschied wurde auf das Quellen der Schalung, die Abkühlung des Stahlringes infolge des Windes und darauf zurückgeführt, daß die Schalung insgesamt höher mit Beton angefüllt war als über der Druckmeßdose.

2.24 Uspenskij (32) berichtete von russischen Vorschriften und Veröffentlichungen über den Seitendruck von Frischbeton.

Nach den gültigen Vorschriften TU 117-55 sollte der größte Schalungsdruck angenommen werden:

1. bei Rüttelbeton

$$\text{mit } p_{\max} = \gamma \cdot R \text{ (Mp/m}^2\text{), für } H \geq R,$$

wobei  $\gamma = \text{Frischbetonrohddichte (2,5 t/m}^3\text{)}$   
 $R = \text{Wirkungsradius des Rüttlers (~ 0,75 m)}$   
 $H = \text{Höhe des Bauteils bedeuten.}$

2. bei normal verdichtetem Schüttbeton

$$\text{mit } p_{\max} = 1,1 \cdot 4 \cdot v \text{ (Mp/m}^2\text{), für } H \geq 4 \cdot v,$$

mit  $v = \text{Betoniergeschwindigkeit (m/h).}$

Weil die Formel 1 einen Größtwert von  $p_{\max} = 1,875 \text{ Mp/m}^2$  bei  $\gamma = 2,5 \text{ t/m}^3$  und  $R = 0,75 \text{ m}$  ergibt, wurde ihre Richtigkeit angezweifelt. - Der Formel 2 soll ein Beton mit  $\gamma = 2,5 \text{ t/m}^3$  und einem (inneren) Reibungswinkel  $\varphi = 23^\circ$  zugrunde gelegt sein, der 4 Stunden nach der Verarbeitung keinen Druckzuwachs mehr erwarten läßt.

Aus der Stellungnahme zu anderen Veröffentlichungen russischer Forscher kann gefolgert werden, daß die Formel 1 für Massenbetonbauten (mit geringer Steigegeschwindigkeit der Betonoberfläche) berechtigt sein kann. Beim Bau des Kraftwerks Kuibyschew wurde z.B. für Rüttelbeton mit  $p_{\max} = 0,75 \gamma$ , für gestocherten Beton mit Betonverflüssiger (BV) mit  $p_{\max} = 4,4 \cdot v$  und ohne BV mit  $p_{\max} = 2,2 \cdot v$  gerechnet. Einzelne Forscher erwarten den Abbindebeginn des Frischbetons früher als in Formel 2 angegeben zwischen  $t = 1 \frac{1}{4}$  und  $1 \frac{2}{3}$  Std. Für ungerüttelten Unterwasserbeton rechnete Kuročkin bei  $t = 1 \frac{1}{2}$  Std. mit  $p_{\max} = 1,5 \cdot \gamma \cdot v$ , während Neporožnij-Silaev für Rüttelbeton  $p_{\max} = 1,25$  (bis 1,65)  $\cdot \gamma \cdot v$  angegeben haben.

Uspenskij untersuchte neben dem größten Schalungsdruck auch den zeitlich abhängigen Druckverlauf. Dabei wurden die Frischbetonrohddichte ( $\gamma$ ), die Betoniergeschwindigkeit ( $v$ ) und der Abbindebeginn ( $t$ ) in

$$p_{\max} = f(\gamma, t, v)$$

berücksichtigt.

In der Rüttelzone, die mit dem Wirkungsradius  $R$  des Rüttlers begrenzt wurde, sollte mit dem hydrostatischen Druck des Frischbetons gerechnet werden:  $p = \gamma \cdot x$  ( $0 < x < R$ ). Unterhalb der Rüttelzone wurde eine verminderte Druckzunahme infolge der inneren Reibung des Betons mit  $\gamma \cdot \lambda = \gamma \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$  berücksichtigt. Für plastischen Beton wurde mit  $\gamma = 2,5 \text{ t/m}^3$  und  $\varphi = 23^\circ$

$$\gamma \cdot \lambda = 1,1 \text{ t/m}^3$$

und für steifen Beton mit  $\varphi = 28^\circ$

$$\gamma \cdot \lambda = 0,9 \text{ t/m}^3$$

angegeben. Diese zweite Zone wurde von der Rütteltiefe  $R$  an bis zu der bei Abbindebeginn erreichten Betontiefe  $h = t \cdot v$  gerechnet. Der Abbindebeginn sollte für Betone mit Betonverflüssigern bzw. -verzögerern

zwischen 3 bis 4 Stunden, ohne Zusatzmittel zwischen 1 1/2 bis 2 Stunden angenommen werden. Die Drucklinien sind nach den Steifigkeitsverhältnissen der Schalung verschieden. - Bei steifen, dichten Schalungen mit eng angeordneten Kranzhölzern und Riegeln und starker Verankerung sowie bei Schalungen mit Betonplatten und starrer Abstützung soll nach dem Erreichen des größten Schalungsdrucks keine Druckverminderung in Rechnung gestellt werden. Dagegen wurde für nachgebende Schalungen, die sich elastisch verformen können und an einzelnen Punkten abgestützt sind, mit einem vollständigen Druckabfall bis  $p = 0$  gerechnet. Die größten Schalungsdrücke wurden wie folgt angegeben:

1. für Rüttelbeton

1.1 wenn  $R \leq t \cdot v$   
 $p_{max} = \gamma R + \gamma \cdot \lambda \cdot (t \cdot v - R)$ ,

1.2 wenn  $R \geq t \cdot v$   
 $p_{max} = \gamma \cdot t \cdot v$ ,

2. für nicht gerüttelten Beton

$p_{max} = \gamma \cdot \lambda \cdot t \cdot v$ .

Die Drucklinien sind in Bild 20 für steife und nachgebende Schalungen dargestellt. Die Wirkungstiefe des Schalungsdrucks auf nachgebende Schalungen wurde mit einer gewissen Sicherheitsreserve mit  $h = 10$  bis  $12 v$  angenommen.

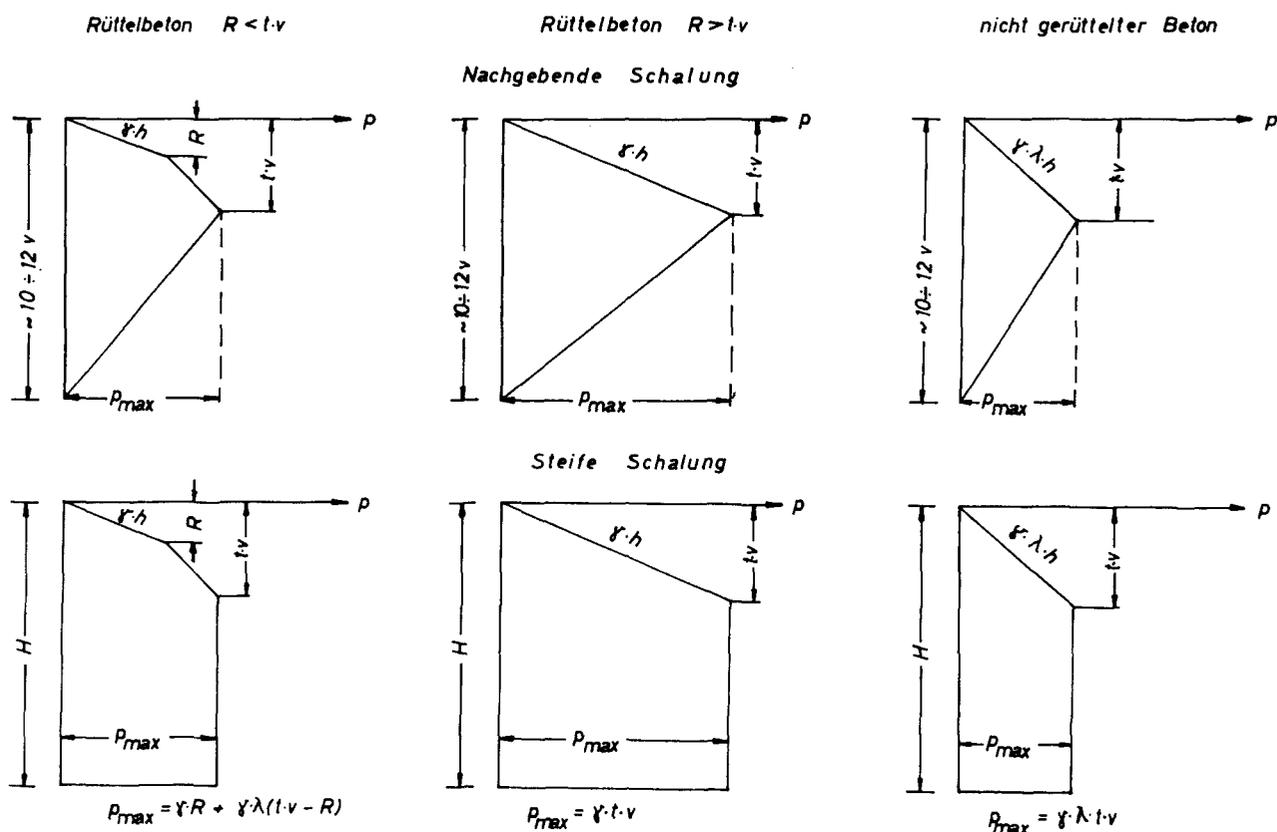


Bild 20 Schalungsdruck nach Uspenskij

2.25 A d a m (33) wertete die ihm bekannt gewordenen amerikanischen, deutschen und französischen Meßergebnisse und Berechnungsvorschläge aus und veröffentlichte ein Diagramm zur Ermittlung des Schalungsdrucks.

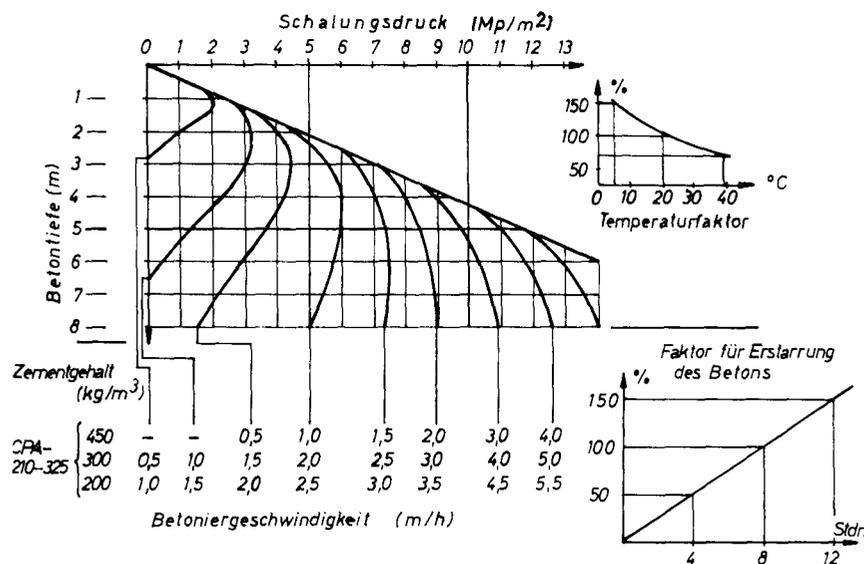


Bild 21 Schalungsdruck nach Adam

Darin können für Betone mit bestimmten Zementgehalten (CPA - 210 - 325) die bei verschiedenen Betoniergeschwindigkeiten in jeder Tiefe unter der Betonoberfläche zu erwartenden Seitendrucke abgelesen werden. Die Diagrammwerte gelten für Außentemperaturen von 20°C und einen Erstarrungsbeginn des Betons nach 8 Stunden. Für andere Temperaturen und Erstarrungszeiten des Betons wurden Korrekturfaktoren in zwei graphischen Darstellungen angegeben, die auf die Arbeit von R o d i n zurückgehen.

2.26 W i t t e (34) untersuchte in seiner Arbeit im wesentlichen die in mehreren Veröffentlichungen (1) (3) (6) (10) (11) (15) (20) (21) (23) (30) enthaltenen Angaben über den Verlauf der Betonerhärtung. In der Technischen Hochschule Delft nahm er erstmalig dreiachsige Druckversuche an Frischbeton in mehreren Zeitabständen vor, um die Verminderung des inneren Reibungswinkels zu untersuchen. In gleicher Weise werden neuerdings mit Bodenproben Standversuche ausgeführt. Aus den Verhältnissen des seitlich (radial) wirkenden und des vertikalen Drucks ( $\Delta\sigma_2$ ,  $\Delta\sigma_1$ ) wird der Reibungsfaktor ermittelt.

$$\lambda = \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} = \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

Über die Versuche wird im Abschnitt 3.14 berichtet.

Außerdem hielt W i t t e folgende Einflüsse auf die Größe des Schalungsdrucks für wesentlich:

- 1.) Die Fallhöhe des Betons beim Einbringen in die Schalung. - Sie soll so gering wie möglich gehalten werden, damit der Beton nicht aufgelockert oder gar entmischt wird und infolgedessen in der Erhärtung eine Verzögerung eintritt.
- 2.) Die Verdichtungsart. - Bei Rüttelverdichtung verhält sich der Beton wie eine Flüssigkeit mit entsprechender Rohdichte. Unmittelbar nach dem Rütteln besitzt der Beton einen großen inneren Reibungswinkel. - Bei nicht durch Rütteln verdichtetem Beton erreicht der innere Reibungswinkel zwar nach dem Einbringen einen beträchtlichen Wert, jedoch wächst dieser nur langsam im Vergleich zu dem des Rüttelbetons.

- 3.) Das Erstarrungsende des Zements. - Daraus kann auf die Erhärtung des Betons geschlossen werden. Bei kurzer Erstarrungszeit des Zements bindet der Beton schneller ab, so daß danach der Schalungsdruck nicht mehr weiter ansteigen kann. Bei Verwendung eines verhältnismäßig schnell erstarrenden Zements kann deshalb eine größere Betoniergeschwindigkeit gewählt werden.
- 4.) Die Betoniergeschwindigkeit. - Die Geschwindigkeit, mit der die Betonoberfläche in der Schalung aufsteigt, hat einen großen Einfluß auf den Seitendruck. Bei großen Betoniergeschwindigkeiten ergeben sich größere Schichtdicken, die zu verdichten sind und dabei als flüssige Schichten einen umso größeren hydrostatischen Schalungsdruck erzeugen.

W i t t e hat die dreiachsigen Druckversuche an einem gerüttelten Frischbeton bei einer Temperatur von 20° C vorgenommen. Bei der Auswertung seiner Ergebnisse hat er, die von Roby, Rodin und Hoffmann bei anderen Temperaturen ermittelten Zeiteinflüsse auf die  $\lambda$ -Werte berücksichtigt. Er fand für den Reibungsbeiwert  $\lambda$  zur Zeit  $t$  und für eine Temperatur  $T$  die Gleichung

$$\lambda = \lambda_0 \cdot e^{-At} = e^{-0,03 T t}$$

worin bei  $t = 0$  :  $\lambda_0 = 1$  gesetzt wurde.

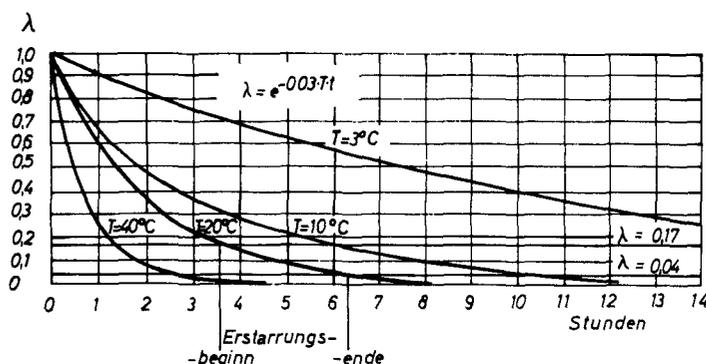


Bild 22  $\lambda$ -Werte für gerütteltes Frischbeton in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit nach Witte

Damit wurden für den Schalungsdruck von Rüttelbeton die allgemeine Gleichung

$$p = \gamma \cdot v \cdot t \cdot e^{-0,03 T \left(t - \frac{1}{v}\right)}$$

gefunden und für den nach einer Zeit

$$t' = \frac{1}{0,03} \cdot T$$

wirkenden größten Seitendruck die Gleichung

$$p_{\max} = \frac{\gamma \cdot v}{0,03 T} \cdot e^{-1 + \frac{0,03 T}{v}}$$

Die vorstehenden Gleichungen sollen für Portlandzement gültig sein. Bei Verwendung anderer Zemente wurde empfohlen, bei verschiedenen Temperaturen (z.B. 20° C und 40° C) die Erstarrungszeiten eines Probebetons zu ermitteln und damit den Faktor  $A$  des  $\lambda$ -Wertes zu berechnen. Für Hüttenzement wurde  $A = 0,025$  und

$\lambda = e^{-0,025 T t}$  angegeben. Der Zementgehalt des Betons ist nach Wittes Angaben zwischen 250 kg/m<sup>3</sup> und 400 kg/m<sup>3</sup> noch ohne Bedeutung. Bei größerem Zementgehalt wirkt sich die erhöhte Abbindewärme günstig auf den Schalungsdruck aus. Der Silowirkung bei engen Querschnitten und der Wandreibung zwischen Schalung und

Beton wurde unter Hinweis auf die Verflüssigung des Frischbetons infolge der Rüttelwirkung keine Bedeutung gegeben.

Abschließend wurden für den Schalungsdruck von Injektionsbeton (Colcrete, Prepakt) folgende Gleichungen angegeben:

a) für den Seitendruck der Zuschlagstoffe:

$$p = H (1 - \varrho) \cdot \gamma_z \cdot \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_1}{2} \right)$$

b) für den Seitendruck des Betonmörtels:

$$p_2 = \gamma_m \cdot v \cdot t \cdot e^{-0,03 Tt}$$

c) für den Auftrieb infolge des Betonmörtels:

$$p_3 = - (1 - \varrho) \cdot v \cdot t \cdot (\gamma_t - \gamma_m).$$

Darin bedeuten:

H = Höhe der groben Zuschlagstoffe in der Schalung,

$\varrho$  = Hohlraumvolumen zwischen den Zuschlagstoffen,

$\gamma_z$  = (Spez. Gewicht) Reindichte der Zuschlagstoffe ( $t/m^3$ ),

$\varphi_1$  = Winkel der inneren Reibung der Zuschlagstoffe,

$\gamma_m$  = Rohdichte des Betonmörtels ( $t/m^3$ ),

v = Steiggeschwindigkeit des Mörtels (m/h),

t = Zeit nach Injektionsbeginn (Stdn.),

T = Mörteltemperatur in °C.

2.27 Ritchie (35) untersuchte bei seinen Schalungsdruckmessungen an Betonsäulen folgende Einflüsse: die Betonzusammensetzung und -konsistenz, die Betonverdichtung (Stochern und Rütteln), die Größe und Form der Schalung.

Die Schalzelle hatte einen Querschnitt von  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  und war 2,40 m hoch. Die Innenseiten waren glatt und mit einer Kunststoffhaut abgedichtet. In einer Seite der Schalung waren 4 Membrandruckmeßdosen in den Abständen 7,5 cm, 45 cm, 85 cm und 122 cm über der Bodenfuge eingebaut. Der Betondruck wurde mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen aus den Membranverformungen ermittelt. - Der für die Untersuchungen verwendete Beton wurde aus gewöhnlichem Portlandzement und einem Kiessandgemisch mit festgelegter Sieblinie in den Gewichtsteilen 1 : 3 und 1 : 6 zusammengesetzt und das Wasser zugewogen.

#### Zahlentafel

Angaben über den Frischbeton

Mischungsverhältnis in Gtln.	Wasser-Zementwert	Compacting Factor	Verarbeitbarkeit
1 : 3	0,39	0,82	schlecht
	0,43	0,93	gut
1 : 6	0,61	0,88	schlecht
	0,65	0,95	gut

Eine Seite der Schalung bestand aus vier abnehmbaren Teilen, so daß der Beton ohne wesentliche Fallhöhe eingebracht und durch Stochern oder mit einem Tauchrüttler verdichtet werden konnte. Die Schichten waren 15 cm dick. Der Rüttler wurde 30 cm tief in den Frischbeton getaucht. - Es wurden 20 Säulen betoniert. Die mittlere Frischbetontemperatur betrug bei allen Versuchen rd. 20° C. Die Untersuchungsergebnisse sind in nachstehender Zahlentafel zusammengestellt.

### Zahlentafel

Betonmischung	Verarbeitbarkeit <sup>+</sup>	Verdichtungsart	Betoniergeschwindigkeit (m/h)	Größter Schalungsdruck (Mp/m <sup>2</sup> )	Zugehörige Betonhöhe (m)
1 : 3	gut	Stochern	3,05	2,73	1,22
	gut	"	6,10	3,09	1,37
	schlecht	"	3,05	2,92	0,92
	schlecht	"	6,10	3,30	1,37
	gut	Rütteln	1,22	2,28	1,01
	gut	"	3,05	3,09	1,22
	gut	"	6,10	3,30	1,28
	gut	"	21,4	3,66	1,43
	schlecht	"	3,05	2,70	1,01
	schlecht	"	6,10	2,95	1,22
1 : 6	gut	Stochern	3,05	0,99	0,43
	gut	"	6,10	1,62	0,61
	schlecht	"	3,05	1,41	0,61
	schlecht	"	6,10	2,21	0,76
	gut	Rütteln	1,22	0,85	0,49
	gut	"	3,05	1,62	0,73
	gut	"	6,10	2,40	1,07
	gut	"	21,4	3,23	1,43
	schlecht	"	3,05	1,34	0,58
	schlecht	"	6,10	1,98	0,91

<sup>+</sup> siehe vorhergehende Zahlentafel.

Aus den in vorstehender Zahlentafel und den Bildern 23 bis 26 dargestellten Untersuchungsergebnissen ist folgendes zu erkennen:

Die Betoniergeschwindigkeit hatte auf die Größe des Schalungsdrucks einen wesentlichen Einfluß (Bild 23). Bei beiden Betonmischungen zeigte sich bis zu einer Betoniergeschwindigkeit von rd. 6 m/h ein steiler Anstieg des Schalungsdrucks, der bei höheren Betoniergeschwindigkeiten flacher wurde. Wenn hier zum Vergleich die theoretischen Bemessungsvorschläge von Rodin und dem ACI angegeben worden sind, muß dabei berücksichtigt werden, daß Ritchie zu seinen Versuchen sehr kleine Schalungsquerschnitte verwendet hat, bei denen die Wandreibung einen abmindernden Einfluß gehabt hat. -

Zwischen den Schalungsdrücken der Betone M.V. 1 : 3 und 1 : 6 bestehen jedoch besonders im Bereich der niedrigen Betoniergeschwindigkeiten erhebliche Unterschiede, die sich bei höheren vermindern. (Bild 24) - Bei den beiden Betonmischungen wurde der Einfluß der Verdichtungsart auf den Schalungsdruck untersucht. (Bild 25) In beiden Fällen wurde der größte Druck bei der Rüttelverdichtung festgestellt. Die Unterschiede zwischen den Schalungsdrücken des durch Stochern bzw. durch Rütteln verdichteten Betons waren jedoch trotz fast übereinstimmender Compacting-Faktoren beträchtlich. Bei dem Beton 1 : 6 war der Schalungsdruck nach dem Rütteln um 56 %, bei dem Beton 1 : 3 nur um 10 % größer als bei der Verdichtung durch Stochern. Eine interessante Erscheinung konnte bei den durch Stochern verdichteten Betonmischungen beobachtet werden. Hier ergaben sich die größeren Schalungsdrücke bei den schlechter verarbeitbaren Betonen. Dies wurde damit erklärt, daß durch das Einstoßen eines Stabes die Zuschlagstoffe in einem steifen Beton stärker verkeilt werden als in einem weichen. Diese Annahme wird dadurch erhärtet, daß die Schalungsdruckunterschiede zwischen dem gut und dem schlecht verarbeitbaren mageren Beton (M.V. 1 : 6) größer sind als bei dem bindemittelreichen (M.V. 1 : 3).

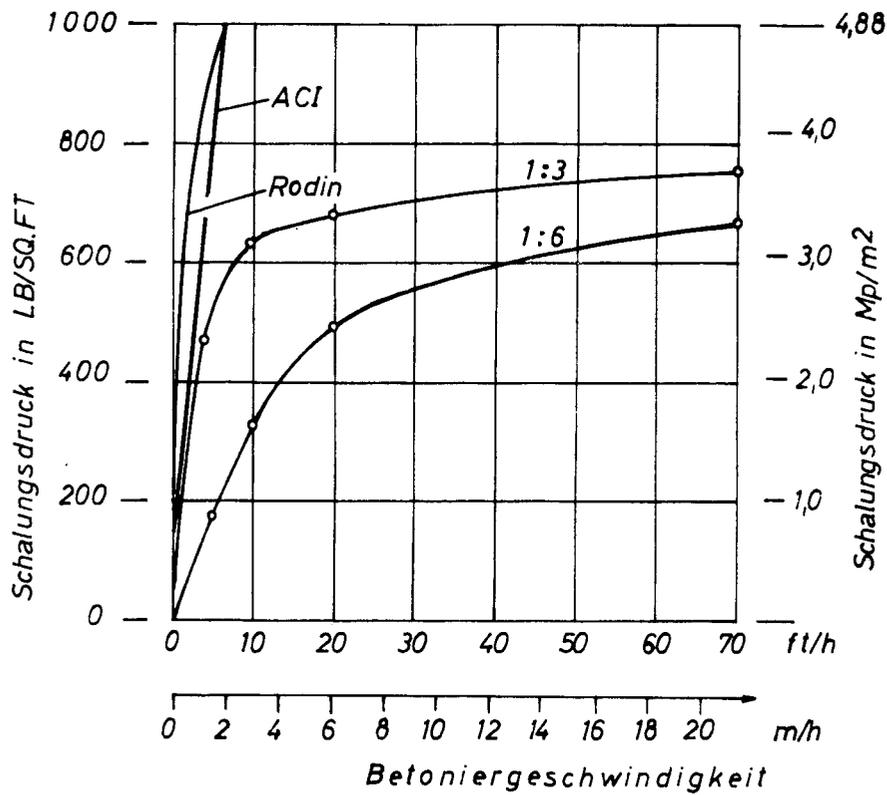


Bild 23 Vergleich der gemessenen Schalungsdrücke für gut verarbeitbaren Rüttelbeton mit den Rechenwerten nach Rodin und ACI (Ritchie)

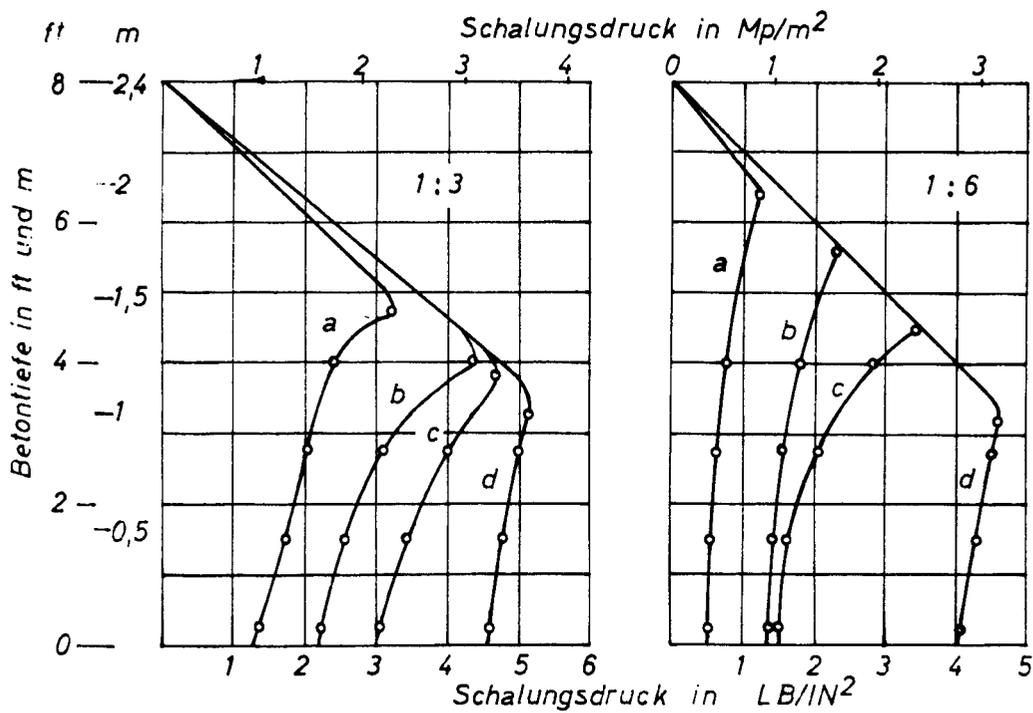


Bild 24 Schalungsdruck für gut verarbeitbaren Rüttelbeton bei verschiedenen Betoniergeschwindigkeiten:

a = 1,22 m/h      b = 3,05 m/h  
c = 6,10 m/h      d = 21,4 m/h

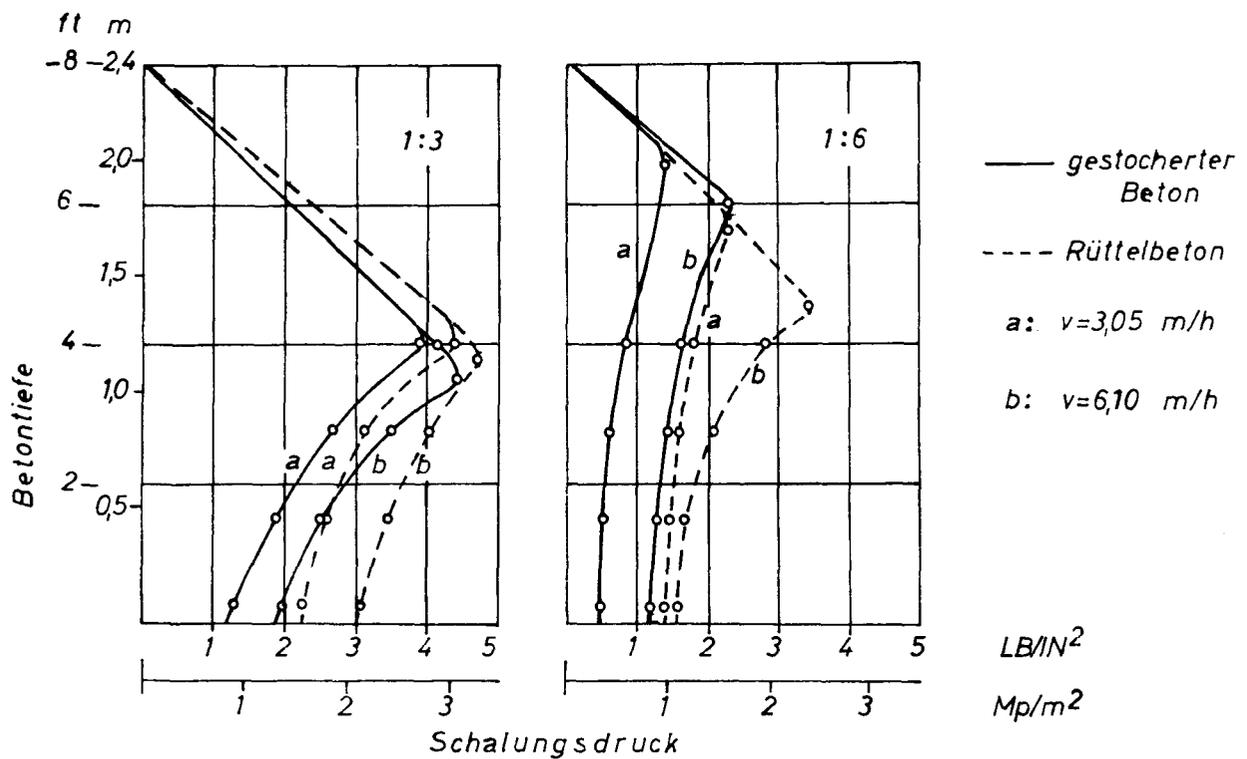
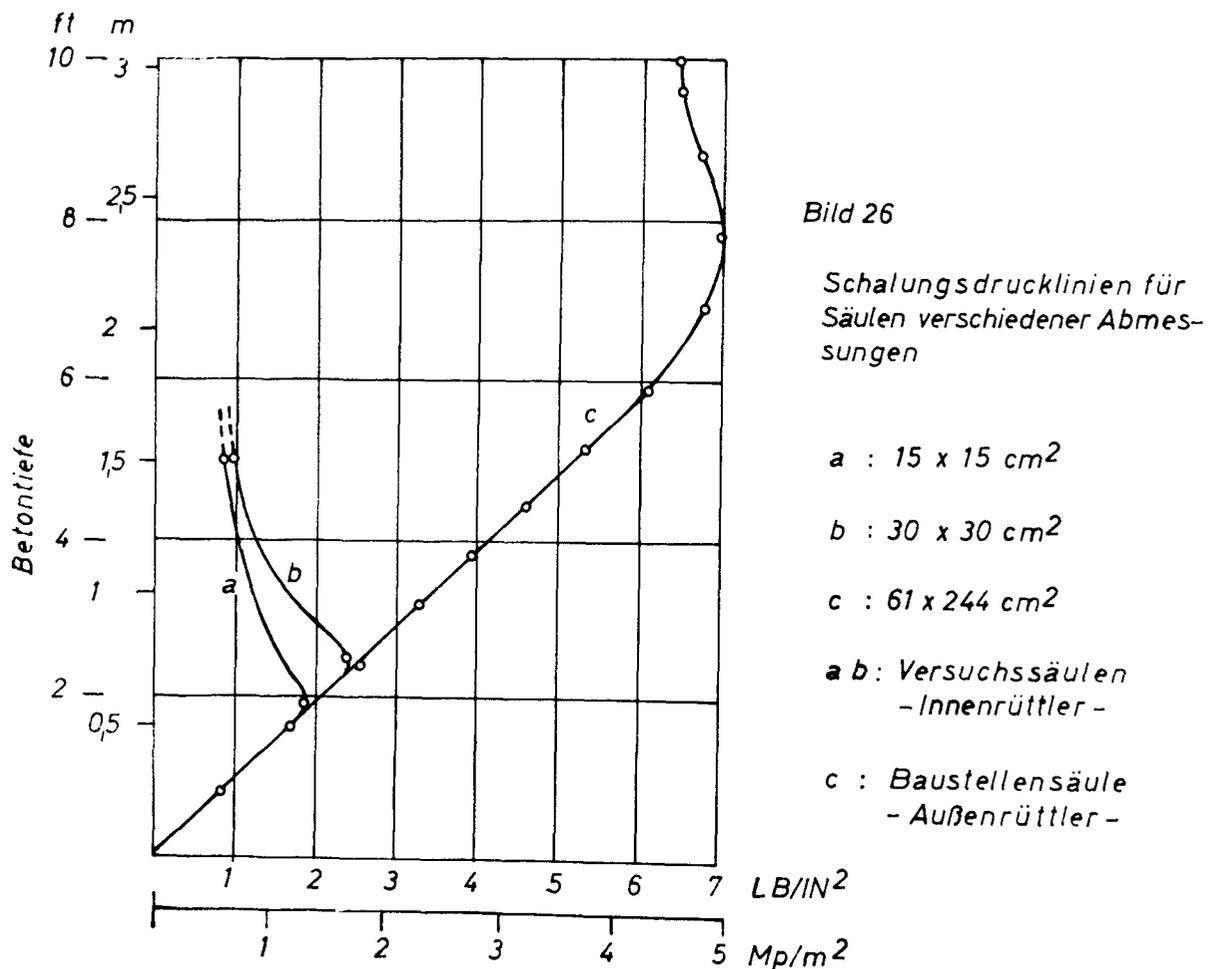


Bild 25 Schalungsdrucklinien für gestocherten und Rüttelbeton bei verschiedenen Mischungsverhältnissen und zwei Betoniergeschwindigkeiten (Ritchie)



Um den Einfluß der Schalungsgröße zu untersuchen, wurde der Säulenquerschnitt von  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  auf  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  vergrößert. Es wurde ein schlecht verarbeitbarer Beton (M.V. 1 : 6, w/z = 0,61, compact. fact. 0,88 bzw. 0,89) mit einer Füllgeschwindigkeit von 3,05 m/h eingebracht und mit Innenrüttler verdichtet. Im kleineren Säulenquerschnitt wurde ein Größtwert des Schalungsdrucks von  $1,33 \text{ Mp/m}^2$ , im größeren von  $1,68 \text{ Mp/m}^2$  ermittelt (Bild 26). Die Vergrößerung des Drucks betrug rd. 26 %. Bei einer in diese Untersuchungen einbezogenen Baustellenprüfung an einem Pfeiler  $61 \times 244 \text{ cm}^2$  mit starker Bewehrung wurden ähnliche Betonmischungsverhältnisse (1 : 2 : 4) (W/Z = 0,65) und Verarbeitungskennzeichen - c.f. = 0,89 - angetroffen. Die Betoniergeschwindigkeit betrug 3,65 m/h. Bis zu einer Betontiefe vom 1,8 m folgte der Schalungsdruck dem hydrostatischen Gesetz und erreichte den Größtwert von  $4,92 \text{ Mp/m}^2$  bei einer Schütthöhe von rd. 2,4 m. Es ist jedoch zu beachten, daß auf der Baustelle Außenrüttler zur Betonverdichtung eingesetzt waren, so daß die Werte nicht vorbehaltlos vergleichbar sind. - Bei der Gegenüberstellung der Betonmischungsverhältnisse mit guter Verarbeitbarkeit ergab sich für Rüttelbeton bei dem bindemittelreichen M.V. 1 : 3 ein größerer Schalungsdruck als bei dem mageren M.V. 1 : 6. Bei einer Betoniergeschwindigkeit von 3,05 m/h betrug die Druckdifferenz 91 % und bei 6,1 m/h noch 38 %.

Die Verarbeitbarkeit bewirkt bei jedem einzelnen Betonmischungsverhältnis mit zunehmendem compacting factor (c.f.) einen größeren Schalungsdruck des Rüttelbetons, bei Verdichtung durch Stochern dagegen einen kleineren Druck. Die Verarbeitungsfaktoren c.f. allein geben jedoch keinen Anhalt über die Größe des Schalungsdrucks. - Ritchie ermittelte deshalb für die einzelnen Betonmischungen in dreiachsigen Druckversuchen die Winkel der inneren Reibung. Obwohl beide Betongruppen je nach Verarbeitbarkeit etwa übereinstimmende Compacting-Faktoren hatten, waren die Unterschiede der Reibungswinkel erheblich.

#### Zahlentafel

Mischungsverhältnis	Verarbeitbarkeit	Compact-Factor	Setzmaß (cm)	Vebe-Zeit (sec.)	Innerer Reibungswinkel $\varphi$	$\lambda = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$
1 : 3	gut	0,93	7,6	2,5	$10^\circ$	0,70
	schlecht	0,82	3,8	4,0	$14^\circ$	0,61
1 : 6	gut	0,95	3,6	2,5	$28^\circ$	0,36
	schlecht	0,88	2,5	6,0	$30^\circ$	0,33

Nach Rankin beeinflußt der innere Reibungswinkel eines Bodens den Erddruck in einer bestimmten Tiefe in dem Verhältnis

$$\lambda = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

Ritchie zeigte, daß für Beton annähernd das gleiche Verhältnis für den Schalungsdruck gelten könnte, da mit ansteigendem inneren Reibungswinkel der Zuwachs des Schalungsdrucks gemindert wird.

Die für eine Betoniergeschwindigkeit von 3,05 m/h gemessenen Schalungsdrücke von Rüttelbeton sind den in vorstehender Zahlentafel angegebenen  $\lambda$  = Werten proportional, bei anderen Betoniergeschwindigkeiten sind aber z.T. größere Abweichungen festzustellen.

Ritchie wies darauf hin, daß in engen Schalungen die Wirkung des zunehmenden inneren Reibungswinkels nicht allein für einen verminderten Schalungsdruck maßgebend wäre. Die Gewölbewirkung und das Ineinandergreifen der Zuschlagstoffe reduzierten die wirksame Druckhöhe und damit den Schalungsdruck.

### 3. Die Eigenschaften des Frischbetons

Die in mehreren vorstehend genannten Arbeiten angegebenen Kennwerte des Frischbetons, insbesondere die inneren Reibungswinkel, sind zum Teil nach Vergleichen mit Bodenarten und Schüttgütern angenommen oder beruhen auf nachträglich angestellten Berechnungen. Die gebräuchlichen Verfahren zur Prüfung der Betonkonsistenz ("Plasticité de mise en oeuvre", "Workability") wie Ausbreitmaß, Setzmaß, Eindringmaß, compacting-factor, Powers-Schlagzahl, Vebe-Zeit u.a. geben darüber auch keine ausreichenden Auskünfte. Erst L'Hermite, Witte und Ritchie haben mit Frischbeton Scherversuche oder dreiachsige Druckversuche zur Ermittlung seiner mechanischen Eigenschaften vorgenommen.

### 3.1 Auszüge aus einzelnen Veröffentlichungen

3.11 L'Hermite (36) hat umfassende Untersuchungen an Rüttelbeton durchgeführt und dabei u.a. die inneren Reibungswinkel und die Kohäsion von Frischbeton ermittelt. Hierzu benutzte er ein Gerät, in dem eine ringförmige Frischbetonprobe von 50 cm Außendurchmesser, 20 cm Breite und 20 cm Höhe einer vertikalen Last und einem Drehmoment ausgesetzt werden konnte. Darin konnten die Versuchsproben vor, während und nach der Rüttelverdichtung mit und ohne Auflast in halber Höhe abgeschert werden. Der Beton bestand in jedem Fall aus einem mit gleicher Sieblinie aus 4 Korngruppen zusammengesetzten Zuschlagstoffgemisch (größter Korndurchmesser 25 mm), das nach DIN 1045 in den "besonders guten" Bereich einzuordnen wäre, und aus  $300 \text{ kg/m}^3$  Portlandzement (etwa PZ 375), während das Anmachwasser für Wasserzementwerte W/Z zwischen 0,45 bis 0,65 zugemessen wurde. Bei den Versuchen stellte L'Hermite fest, daß sich die Rotationsgeschwindigkeit auf die maximale Scherfestigkeit  $f$  nicht wesentlich auswirkte und außerdem der Unterschied zwischen  $f_0$  (ohne Auflast) und der Kohäsion  $\eta$  so gering war, daß  $f_0 \approx \eta$  gesetzt werden konnte. Daraufhin wurde für die maßgebenden Versuche eine Umfangsgeschwindigkeit von  $0,04 \text{ cm/s}$  gewählt.

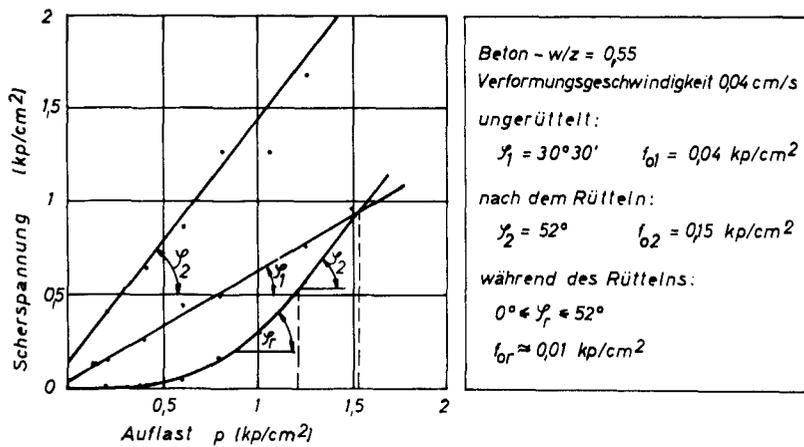


Bild 27 Verhältnisse von Scherspannung und Auflast vor, während und nach der Rüttelung von Frischbeton ( $w/z = 0,55$ ) (L'Hermite)

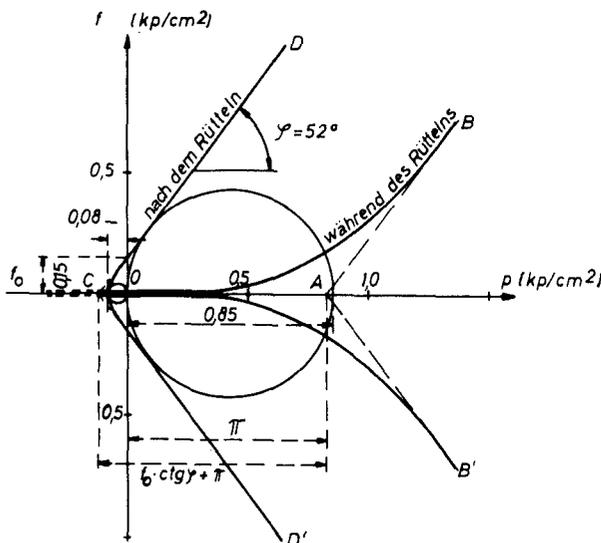


Bild 28 Mohr'scher Spannungskreis für Rüttelbeton ( $w/z = 0,55$  - Verformungsgeschwindigkeit  $0,04 \text{ cm/s}$ )

In Bild 27 sind für den Versuchsbeton ( $W/Z = 0,55$ ) die bei jeder Auflast  $p$  ermittelten Scherfestigkeiten aufgetragen worden. Darin gelten die Linien 1) für den ungerüttelten, 2) für den gerüttelten Beton und 3) für den Beton während des Rüttelns. Die Rüttelzeit wurde auf 15 sec. begrenzt, nachdem in Vorversuchen zwischen den Ergebnissen nach einer Rüttelzeit von 15 und 30 sec. keine wesentlichen Unterschiede festgestellt waren. - Die Reibungswinkel  $\varphi$  werden von den einzelnen gemittelten Linien bzw. der Tangente an Linie 3 und der Waagerechten eingeschlossen. Die Kohäsion  $f_0$  ist der jeweilige Ordinatenabschnitt bei der Belastung  $p = 0$ . - Die an diesem Frischbeton vorgenommenen Festigkeitsprüfungen ergaben:

Druckfestigkeit	$0,93 \text{ kp/cm}^2$
Zugfestigkeit	$0,08 \text{ kp/cm}^2$

Nach den in Bild 27 dargestellten Versuchsergebnissen wurde der Mohr'sche Spannungskreis gezeichnet. Dabei ergab sich eine Druckfestigkeit  $\sigma = 0,85 \text{ kp/cm}^2$ . Mit der ermittelten Zugfestigkeit konnte die Zeichnung hinreichend vervollständigt werden. (Bild 28)

Es ist zu erkennen, daß die Rüttelverdichtung auf die Kohäsion und die innere Reibung einen großen Einfluß hat. Bei diesem Versuchsbeton stieg die vor dem Rütteln ermittelte Kohäsion von  $0,05 \text{ kp/cm}^2$  nach dem Rütteln auf  $0,15 \text{ kp/cm}^2$  und der innere Reibungswinkel von  $30,5^\circ$  auf  $52^\circ$  an. Auf diese wichtigen Zusammenhänge kann es zurückgeführt werden, daß Betonfertigteile unmittelbar nach dem Rütteln entformt werden können, ohne sich unter der Last des Eigengewichts zu verformen. Nach l'Hermite entspricht die im Beton allein aus der Rüttelwirkung resultierende Druckfestigkeit dem im Mohrschen Spannungskreis als Abschnitt O A gemessenen Wert.

Zusammenfassend wurde festgestellt, daß ein Beton mit normaler Sieblinie und erdfeuchter Konsistenz vor der Rüttelung einen inneren Reibungswinkel  $\varphi \sim 30^\circ$  hat. Der Wasserzementwert hat darauf keinen wesentlichen Einfluß (zwischen  $0,45 < W/Z < 0,65$ ). Die Kohäsion ist dagegen mit dem Wasserzementwert veränderlich und erreicht ihren Höchstwert bei  $W/Z = 0,52$  mit  $0,07 \text{ kp/cm}^2$ . Während des Rüttelns ist die Kohäsion praktisch gleich Null und der innere Reibungswinkel im wesentlichen von der Auflast abhängig und erreicht bei deren Anwachsen, d.h. mit zunehmender Betontiefe, auch den nach dem Rütteln erreichten Wert  $\varphi = 50^\circ$ ; im Beispiel bei  $p = 1,2 \text{ kp/cm}^2$ . Dieser Wert entspricht dem Gewicht einer ständig gerüttelten Betonmenge von rd. 5 m Höhe. Andererseits kann ein gerüttelter Beton eine Auflast von  $0,85 \text{ kp/cm}^2$  entsprechend einer Betonmenge von rd. 3,5 m Höhe verformungsfrei tragen, wenn der Rütteldruck etwa gleichgroß ist.

Mit dem beschriebenen Versuchsbeton ( $W/Z = 0,55$ ) führte l'Hermite auch Versuche zur Bestimmung der Wandreibung durch. Die Holzschalung war sägerauh und die Stahlschalung unbearbeitet. Er ermittelte für die Wandreibungswinkel von Beton auf Holz:

	für ungerüttelten Beton $\varphi' = 23^\circ$
	für gerüttelten Beton $\varphi' = 30^\circ$
von Beton auf Stahl:	für ungerüttelten Beton $\varphi' = 14^\circ$
	für gerüttelten Beton $\varphi' = 19^\circ$

Über den Einfluß der Zeit auf die Betoneigenschaften machte l'Hermite noch keine Angaben.

3.12 Ø f j o r d (37) untersuchte an Betonprobewürfeln von 10 cm Kantenlänge, die durch Stampfen verdichtet worden sind, die Anfangsdruckfestigkeiten in Abhängigkeit von Betonzusammensetzung, Wasserzementfaktor und Temperatur. Für den Beton wurden drei norwegische Portlandzemente und drei typische norwegische Zuschlagstoffsorten verwendet. Der daraus hergestellte weiche Beton hatte bei den Mischungsverhältnissen 1 : 2 : 2, 1 : 2,4 : 2,4 bzw. 1 : 3 : 3 und den Wasserzementwerten 0,556, 0,600 bzw. 0,685 die gleiche Konsistenz, die durch das Eindringmaß bestimmt wurde. Die Betonwürfel wurden bei den Versuchen um 1,5 % zusammengedrückt, weil an festeren, 24 Stunden alten Würfeln diese Bruchverformung ermittelt worden war. Die ersten Proben konnten 4 Stunden nach der Anfertigung geprüft werden und ergaben etwa übereinstimmende Festigkeiten von  $0,2 \text{ kp/cm}^2$  bei allen Mischungsverhältnissen und Temperaturstufen.

In Bild 29 sind die Druckfestigkeiten in den ersten 4 - 10 Stunden aufgetragen, die an dem Beton mit dem MV. 1 : 2,4 : 2,4 ( $W/Z = 0,6$ ) bei Beton- und Außentemperaturen von  $6^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $15^\circ$  und  $19^\circ \text{ C}$  ermittelt wurden. Bei der niedrigsten Temperatur stieg die Festigkeit in 10 Stunden nur um 50 % an, während der Zuwachs bei allen anderen Temperaturen schon nach rd. 7 Stunden 100 % betrug und sich danach noch erheblich vergrößerte. In Bild 30 ist der Einfluß des Mischungsverhältnisses bzw. Wasserzementfaktors auf die Festigkeitsentwicklung bei einer Temperatur von  $12^\circ \text{ C}$  aufgetragen. Der Festigkeitszuwachs ist danach umso größer, je kleiner der Wasserzementwert ist.

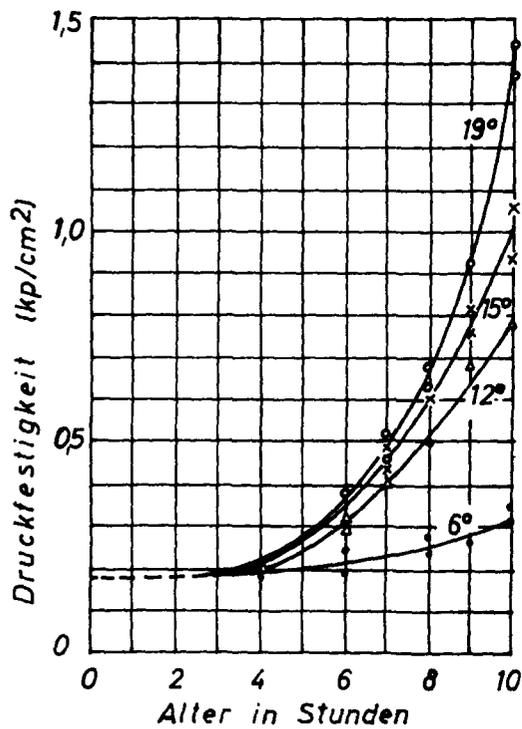


Bild 29

Temperatureinfluß auf die Festigkeitsentwicklung von Beton (M.V. 1:24:24)

(Øfjord)

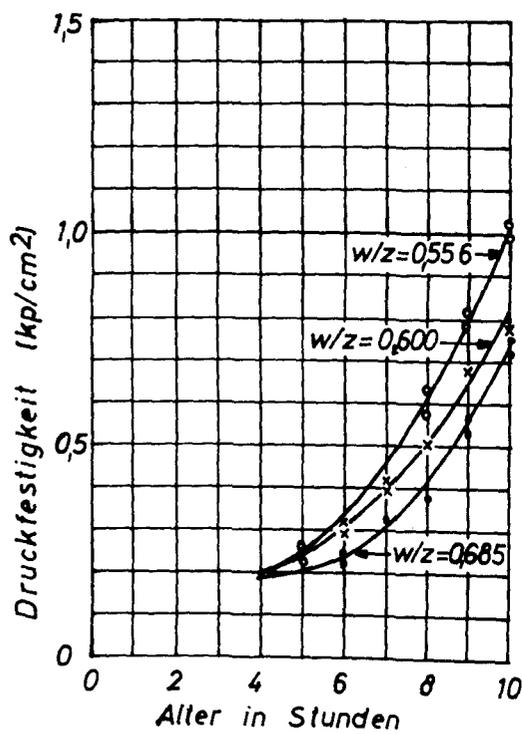


Bild 30

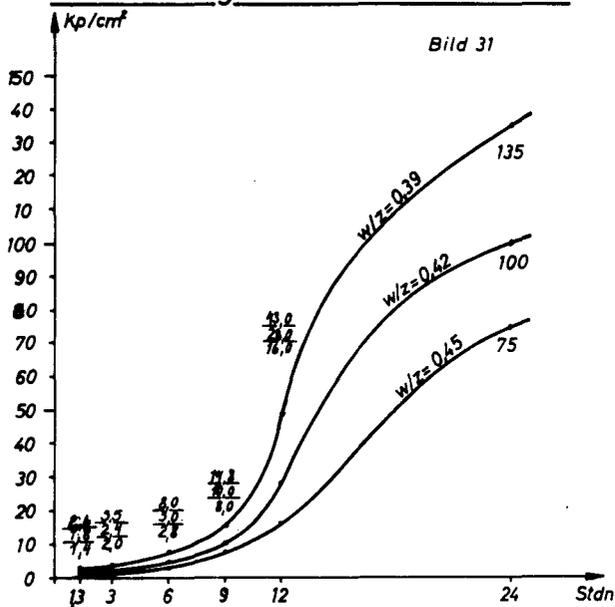
Einfluß des Wasser-zementwerts auf die Festigkeitsentwicklung von Beton mit einer Temperatur von 12°C

(Øfjord)

3.13 N e n n i g (38) berichtete im Rahmen einer Arbeit über "Gleitschalung" von ähnlichen Versuchen. An Betonprobewürfeln wurden die Druckfestigkeiten nach 1,3; 3; 6; 9; 12; 24 und 48 Stunden geprüft. Für den Beton verwendete er gewöhnlichen Eisenportlandzement. Die Bestandteile der einzelnen Mischungen sind unter den Bildern 31 bis 34 angegeben. -

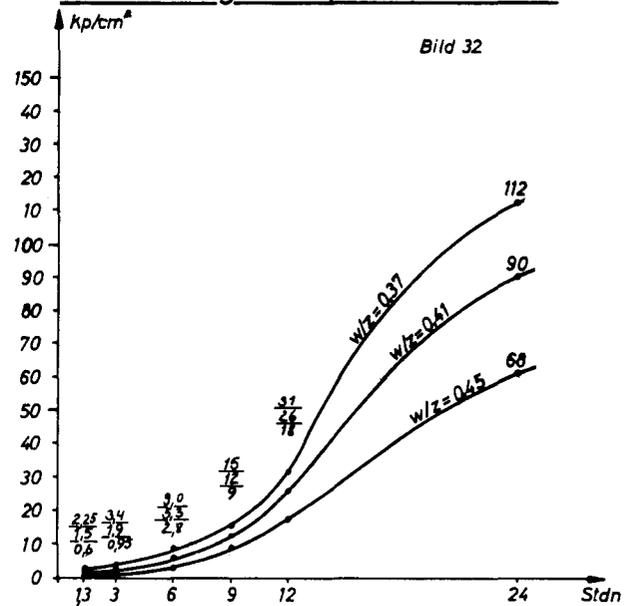
Untersucht wurde die Entwicklung der Anfangsfestigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Wasserzementwert. Je nach dem Zementgehalt und dem Wasserzementwert wurden bei den ersten Versuchen Druckfestigkeiten zwischen 0,8 und 2,6 kp/cm<sup>2</sup> ermittelt. Die Aufzeichnung der weiteren Versuchsergebnisse ergab eine anfangs schwach geneigte Kurve, die je nach Betontemperatur und Wasserzementwert nach 9 bis 12 Stunden Erhärtungsdauer steil ansteigt und nach einem Wendepunkt so weiterläuft, daß eine gestreckte S-Form entstanden ist. - Nennig führte die in den ersten Stunden vorhandenen Festigkeiten auf die Betonkohäsion zurück, die vor der eigentlichen Erhärtung wirksam wäre. Aus den Prüfungsergebnissen folgerte er, daß die Temperatur den größten Einfluß auf die Entwicklung der Anfangsfestigkeit hätte, der Wasserzementwert von geringer Bedeutung wäre und der unterschiedliche Zementgehalt sich fast gar nicht auswirkte.

**Würfel­festigkeit von Frischbeton**

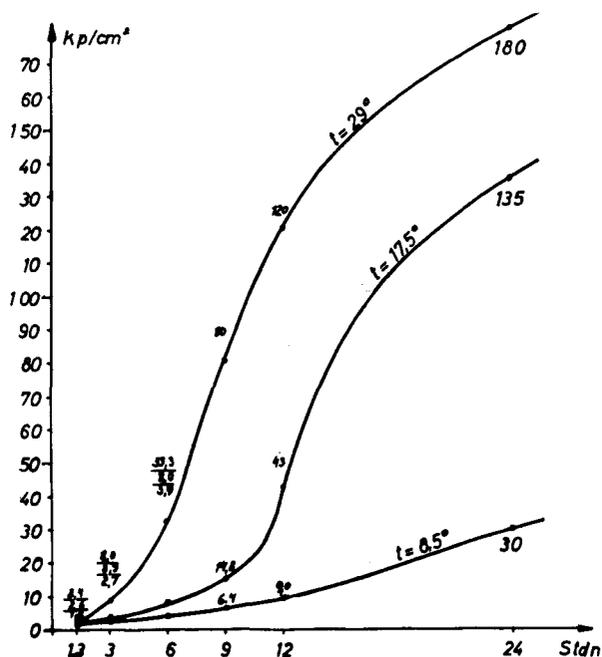


Betonzusammensetzung			Temperaturen	
Sand	520 l		Zuschlagstoffe	17°
Kies	830 l		Zement	18°
Zement	410 kg		Wasser	18°
Wasser	160 l	173 l   185 l	Beton	17,5°
w/z	0,39	0,42   0,45		
Ausbreitmass	29 cm	34 cm   38 cm		

**Würfel­festigkeit von Frischbeton**



Betonzusammensetzung			Temperaturen	
Sand	520 l		Zuschlagstoffe	17°
Kies	830 l		Zement	19°
Zement	309 kg		Wasser	16°
Wasser	114 l	127 l   140 l	Beton	18°
w/z	0,37	0,41   0,45		
Ausbreitmass	29 cm	34 cm   38 cm		

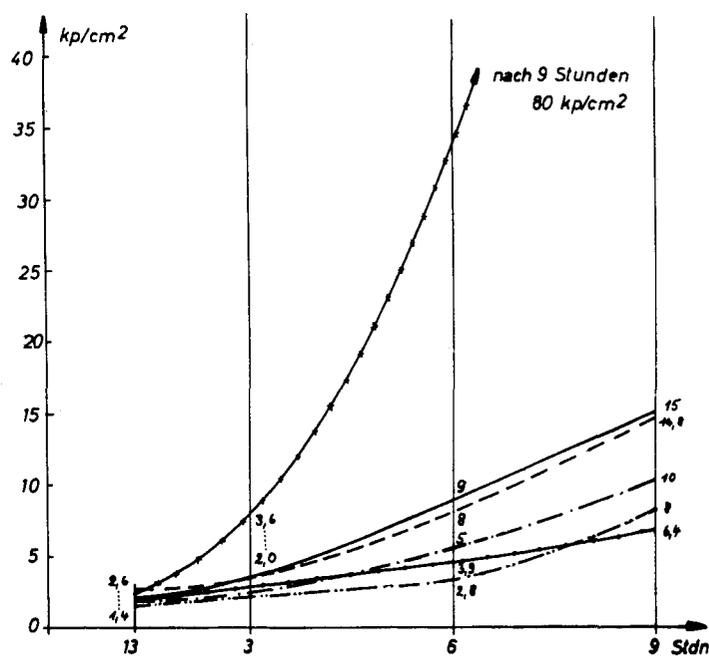


**Betonzusammensetzung**

Sand 520 l      Wasser 150 l  
 Kies 830 l      w/z 0,37  
 Zement 410 kg

**Bild 33**

**Würfelfestigkeit von Frischbeton in Abhängigkeit von der Temperatur**



Kurve	1	2	3	4	5	6
z (kg/m³)	410	410	410	410	410	309
w/z	0,37	0,37	0,42	0,45	0,37	0,37
T (°C)	29	17,5	17,5	17,5	8,5	18

**Bild 34**

**Würfelfestigkeit von Frischbeton in Abhängigkeit von Temperatur und Wasserzementwert**

3.14 W i t t e (34) berichtete von dreiachsigen Druckversuchen an Frischbeton. Hierzu wurden aus einem Kiessandgemisch mit bestimmter Sieblinie – nach DIN 1045 im "besonders guten" Bereich – und Portlandzement mit einem Wasserzementwert  $W/Z = 0,5$  Proben hergestellt, die in Gummibeuteln durch Rütteln verdichtet wurden. Diese Proben wurden nach bestimmten Zeitabständen in die Prüfmaschine eingesetzt und einer Vertikalbelastung unterworfen. Dabei wurde der Druck in der die Probe umgebenden Wasserfüllung so gesteuert, daß er einer Verformung infolge der Vertikallast entgegenwirkte. Aus dem Quotienten  $\sigma_2 / \sigma_1 = \lambda$  ergab sich der Reibungsbeiwert unmittelbar. Für den Beton wurde zur Zeit des Rüttelns  $\lambda_0 = 1$  angesetzt, jedoch wurden unmittelbar anschließend bemerkenswert geringere Werte als erwartet gemessen. Dies wurde auf die Reibungsverluste in der Maschine im Bereich der kleinsten Lasten zurückgeführt, während die nach zwei und mehr Stunden bei verhältnismäßig größeren Spannungen gemessenen Werte den Erwartungen entsprachen. Die nach zwei Versuchen ermittelten  $\lambda$ -Werte sind in Bild 35 wiedergegeben. Die gesuchte Kurve sollte eine Exponentialfunktion in Abhängigkeit von der Zeit mit der allgemeinen Gleichung

$$\lambda_t = \lambda_0 \cdot e^{-At} = e^{-At} \quad (\text{mit } \lambda_0 = 1)$$

ergeben. Die Korrelationsrechnung mit den Versuchsergebnissen lieferte  $A = 0,57$  und somit für den bei 20°C geprüften Beton mit einem Korrelationskoeffizienten  $r = 0,80$  :  $\lambda_t = e^{-0,57 t}$

Um die Temperatur in dem Ausdruck  $\lambda_t$  zu berücksichtigen, verglich W i t t e seine Ergebnisse mit den von R o b y , R o d i n und H o f f m a n n ermittelten Werten. Er fand bei dieser Auswertung, daß die Betontemperaturen  $T$  (°C) in der folgenden Gleichung in ausreichender Annäherung erfaßt werden können:

$$\lambda_t = e^{-0,03 T \cdot t}$$

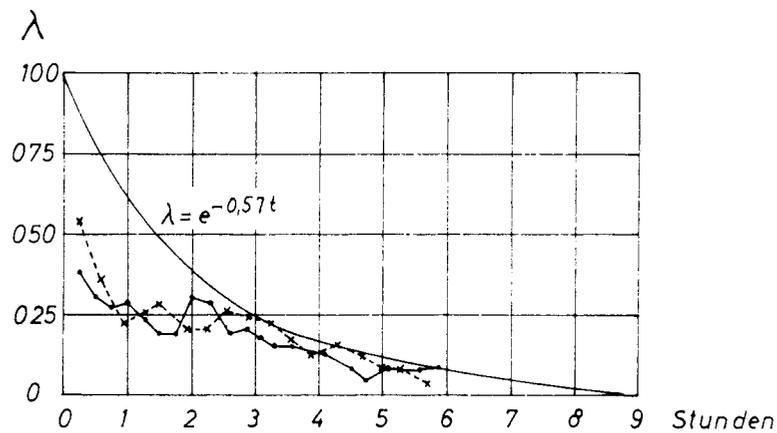


Bild 35  $\lambda$ -Werte für gerüttelten Frischbeton nach den Ergebnissen des dreiachsigen Druckversuchs bei  $T = 20^\circ\text{C}$

Zu bemerken ist hierzu, daß L'Hermite für gerüttelten Beton den Reibungsbeiwert  $\lambda = 0,13$  ( $\psi = 50^\circ$ ) gefunden hat und einen funktionellen Übergang der Reibungsbeiwerte für Beton während des Rüttelns zu denen für gerüttelten Beton nur infolge zunehmender Auflast ermittelte.

3.15 Ritchie (39) stellte eingangs seines Berichts über dreiachsige Druckversuche an Frischbeton fest, daß die einfachen vergleichenden Prüfungen der Betonkonsistenz nicht für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit ausreichen. Hierbei müßten auch die rheologischen Eigenschaften eines Frischbetons berücksichtigt werden. Die Verarbeitbarkeit sollte deshalb nach zwei fundamentalen Kennzeichen, der "Compactability", der "Verdichtungswilligkeit" und der "Mobility", der "Beweglichkeit" beurteilt werden. Als "Compactability" wird die Betoneigenschaft definiert, mit der die für eine vollständige Verdichtung notwendige innere Arbeit dargestellt wird. Sie ist nicht unmittelbar, sondern mit vergleichenden Messungen zu ermitteln, z.B. mit dem "compacting factor"-Versuch. Hierdurch wird ein Maß für den Hohlraum- bzw. Porengehalt des verdichteten Betons im Vergleich zu der aus den spezifischen Gewichten der Bestandteile ermittelten größten Rohdichte gegeben. Daraus können Schlüsse auf die Beständigkeit, Undurchlässigkeit bzw. Festigkeit des erhärteten Betons gezogen werden.

Als "Mobility" wurde die Eigenschaft der Betonmischung bezeichnet, die dem einer Verformung entgegenwirkenden Anfangswiderstand umgekehrt proportional ist. Dieser Widerstand sollte von der Größe und Oberflächenbeschaffenheit der Zuschlagstoffe, dem Zementgehalt der Betonmischung, dem Wasserzementwert und der Zementart abhängig sein. - Der Versuch, dieses rheologische Kennzeichen zu finden, wurde anfangs mit dem Vebe-Meßgerät gemacht; jedoch konnte dabei die hier auftretende Verdichtung nicht ausgeschlossen und außerdem keine direkte Kenngröße ermittelt werden. L'Hermite hatte in seinen (unter Abs. 3.1 beschriebenen) Versuchen erstmalig den Winkel der inneren Reibung und die Kohäsion von Frischbeton ermittelt. Ritchie fand, daß mit den zu bodenmechanischen Prüfungen verwendeten dreiachsigen Spannungsmeßgeräten die von L'Hermite begonnenen rheologischen Untersuchungen einfach fortgesetzt werden könnten. Er wählte dafür mehrere Betonmischungen, die in den Mischungsverhältnissen 1:3; 1:4,5; 1:6 und 1:7,5 aus einem Kiessandgemisch mit festgelegter Sieblinie und Portlandzement angefertigt wurden.

Der Wasserzementwert wurde so gewählt, daß bei jedem Mischungsverhältnis die compacting factor-Werte (c.f.) 0,95; 0,92 und 0,85 erreicht werden konnten, die einer guten, mittleren und schlechten Verarbeitbarkeit entsprechen. - Die Betonproben wurden gestochert, in die Prüfmaschine eingesetzt und mit einer Ummantelung aus Gummi versehen. Danach erfolgte die Belastung durch eine vertikale Last mit konstanter Stauchgeschwindigkeit. Der radial wirkende Flüssigkeitsdruck wurde auf einer bestimmten Stufe gehalten und die Stauchungen bis zu einer Verkürzung der Probe von 20 % oder ihrer Zerstörung gemessen. Der Prüfungsvorgang wurde an den Proben gleicher Mischungen in mehreren Druckstufen wiederholt. Die Ergebnisse wurde mit Hilfe des Mohr'schen Spannungskreises ausgewertet und die Winkel der inneren Reibung ermittelt. Dabei zeigte sich, daß die Belastungsgeschwindigkeit nicht zu groß gewählt werden durfte, weil bei bindemittelreichen Mischungen eine erhebliche Verminderung des

Reibungswinkels eingetreten war. Die Proben wurden daraufhin so belastet, daß sie in einer Minute um 2,1 % gestaucht wurden. Die für die einzelnen Betonsorten gefundenen Werte sind für den c.f. = 0,85 in den Mohr's Spannungskreisen dargestellt.

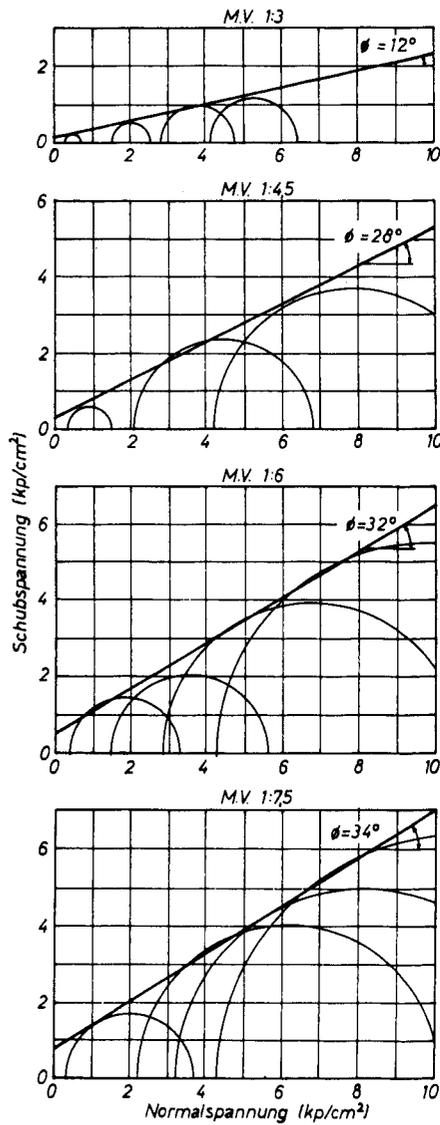


Bild 36

Mohr'sche Spannungskreise für Frischbeton mit verschiedenen Mischungsverhältnissen (M.V.)

Die Tangenten und die Parallelen zur Abszisse schließen jeweils den inneren Reibungswinkel  $\psi$  ein und treffen die als Ordinaten aufgetragenen Scherspannungen bei  $\sigma = 0$  an dem Wert, der in der Bodenmechanik als "scheinbare Kohäsion" bezeichnet wird. Die Reibungswinkel und die Kohäsionswerte nehmen zu, je magerer der Beton wird, obwohl die geprüften Proben übereinstimmend einen c.f. = 0,85 hatten. - Bei den leichter verarbeitbaren Betonsorten (c.f. = 0,92 und 0,95) nahm der Reibungswinkel mit wachsendem Wasserzementwert ab. Die Kohäsionswerte waren nicht einheitlich.

Die Versuchsergebnisse sind in der folgenden Zahlentafel zusammengestellt.

### Zahlentafel

Zusammenstellung der bei konstanter Belastungsgeschwindigkeit erzielten Ergebnisse.

Mischung	Verarbeitbarkeit	Compacting factor	W/Z	Setzmaß (cm)	Vebe-Zeit (sec)	$\varphi$ (°)	Kohäsion f (kp/cm <sup>2</sup> )
1 : 3	schlecht	0,85	0,452	8,9	3,5	12	0,14
	mittel	0,92	0,477	12,7	2,0	11	0,35
	gut	0,95	0,485	12,7	1,5	8	0,28
1 : 4,5	schlecht	0,85	0,512	3,2	7,5	28	0,21
	mittel	0,92	0,549	5,1	6,5	28	0,28
	gut	0,95	0,561	7,0	4,0	25	0,49
1 : 6	schlecht	0,85	0,557	0	9,0	32	0,56
	mittel	0,92	0,665	5,7	4,5	30	0,56
	gut	0,95	0,690	5,7	2,5	-	-
1 : 7,5	schlecht	0,85	0,676	0	10,0	34	0,70
	mittel	0,92	0,775	1,9	5,0	34	0,49
	gut	0,95	0,805	3,8	4,5	-	-

Der zunehmende Wasseranteil machte den Beton beweglicher.

Das wirkte sich besonders bei den bindemittelreichen Mischungen aus, wo die Zuschlagstoffe von einer dickeren Zementleimschicht umgeben sind. Bei den mageren Betonmischungen (M.V. 1 : 7,5) ist ein Unterschied der Beweglichkeit jedoch nicht mehr festzustellen. - Den Einfluß der Zeit auf die Verarbeitbarkeit des Frischbetons hat Ritchie nicht untersucht.

3.16 Kühl (40), Würzner (41), Francmanis (42), Czernin (43) und andere haben ausführlich über die an dem System Zement + Wasser (Zementleim) und an Zementmörtel beobachtete Volumenkontraktion berichtet. Während in den frühen Veröffentlichungen diese Erscheinung noch als Teil des Schwindprozesses eines erhärtenden Zements betrachtet worden ist, wird sie in den neueren Arbeiten als Schrumpfung bezeichnet und vom Schwinden getrennt behandelt. Als Schrumpfung wird die Volumenverminderung im abgeschlossenen System Zement + Wasser angesehen, die bei der chemischen Bindung des Wassers an die Komponenten des Zements eintritt. Dagegen wird das Schwinden mit Austrocknungsvorgängen erklärt, bei denen das Wasser aus dem Zementleim entweicht. Die Verhältnisse sind jedoch noch verwickelter, weil neben den chemischen noch physikalische Einflüsse wirksam sind. Die Schrumpfung der Mörtelmasse beginnt nach Feststellung von Spindel (44) bereits unmittelbar nach dem Zusammenbringen von Zement und Wasser infolge der Oberflächenadsorption des Zements.

In dem aus Wasser und Zement bestehenden Zementleim beginnen außerdem die festen Bestandteile eines Mörtel- oder Betongemischs, die Zuschlagstoffe, nach dem Stockes'schen Fallgesetz zu sinken, worauf G a e l (45) hingewiesen hat. Es lautet  $v = a \cdot d^2 (\gamma_{o1} - \gamma_{o2}) \cdot b : w$ . Darin bedeuten

$v$  = Fallgeschwindigkeit (cm/sek.)

$d$  = Kugeldurchmesser (cm)

$\gamma_{o1}$  = Reinwichte des sinkenden Körpers (g/cm<sup>3</sup>)

$\gamma_{o2}$  = Reinwichte der Sedimentationsflüssigkeit (g/cm<sup>3</sup>)

$w$  = Zähigkeit der Sedimentationsflüssigkeit in Poise

$a$  = Konstante

$b$  = Gravitationskonstante =  $n \cdot 981$  cm/sek.<sup>2</sup>

Bei etwa gleicher Reinwichte wächst die Sinkgeschwindigkeit der Gesteinskörner mit dem Quadrat der Korndurchmesser. Die sinkenden Gesteine verdrängen ein entsprechendes Volumen der Sedimentationsflüssigkeit, das sich in entgegengesetzter Richtung auf die freie Betonoberfläche zu fortbewegt. Hierdurch entsteht an der freien Oberfläche eine dünnflüssige Zementleimschicht, in der noch feinste Gesteinsteilchen enthalten sind.

Der Vorgang wird durch das Rütteln des Betons beschleunigt, weil dabei die Zähigkeit des Zementleims nahezu aufgehoben wird. Infolge der auch im Zementleim eintretenden, jedoch mit geringerer Geschwindigkeit verlaufenden Sedimentation tritt hierbei ein Teil des als Sedimentationsflüssigkeit wirkenden Wassers an der Oberfläche aus. Diese Erscheinung kann in den ersten zwei bis drei Stunden nach dem Anmachen des Betons beobachtet werden.

Francmanis berichtete, daß die Volumenkontraktion der Mischung Zement + Zuschlagstoffe + Wasser vom Augenblick des Anmachens bis zur Zeit von 15 bis 30 Minuten schnell anwächst und vorübergehend aufhört, wenn die aus Bestandteilen der Zementklinkermineralien und aus dem Wasser entstandene Lösung gesättigt wird. Nach Kuhl handelt es sich dabei vorwiegend um eine kolloidale Lösung, die als Sol bezeichnet wird. Von Francmanis mitgeteilte Kurven der Volumenänderung und der Temperatur einer frischen Betonmasse sind zueinander proportional, so daß das Steigen beider Kurven während der ersten Minuten auf die chemische Einwirkung des Anmachwassers auf den Zement, die Hydrolyse, zurückgeführt werden kann. Nach einer Zeit von 2 bis 3 Stunden setzt sich die Volumenkontraktion fort, sobald die Koagulation der Kolloidlösung, die Umwandlung des Sols in das Gel, beginnt. Sie tritt noch vor dem mit der Vicat-Nadel ermittelten Erstarrungsbeginn des Zements ein und ist außer an einer Temperaturerhöhung des Frischbetons auch daran zu erkennen, daß der Beton Wasser ansaugt. Die sich um jedes Zementklinkerteilchen bildende Gelhaut bindet das Wasser und verfestigt sich dadurch, daß für die weitere Hydratation der Klinkerteile Wasser der Gelhaut entzogen wird. Die dabei eintretende Vakuumentwicklung verursacht nach Francmanis etwa 60 % der in den ersten 24 Stunden gemessenen Schrumpfungen.

Die mitgeteilten Schrumpfmäße schwanken erheblich und enthalten nur unvollständig die unmittelbar nach dem Anmachen eines Mörtels aufgetretenen Volumenänderungen. Kuhl gibt für Portlandzement Schrumpfungen von 1,1 bis 2,4 cm<sup>3</sup>/100 g Zement nach einem Tag und von 3,7 bis 5,4 cm<sup>3</sup>/100 g Zement nach 28 Tagen an. Die von Czernin beobachteten Werte stimmen damit gut überein.

(Nach 1 Tag: 2,14 - 2,29 cm<sup>3</sup>/100 g Z., nach 28 Tagen: 5,04 - 5,16 cm<sup>3</sup>/100 g Z.) Czernin berichtet weiterhin von Schrumpfmessungen an Mörtelprismen, die nach 24-stündiger Erhärtung luft- und wasserdicht umhüllt worden sind. Bei den Versuchen wurde der Wasserzementwert des Mörtels zwischen 0,6 und 0,3 gewählt. Die Messungen ergaben nach 28 Tagen für

w/z	0,6	0,5	0,4	0,3
Kontraktionen von	0,05	0,10	0,15	0,3 mm/m.

Bei niedrigen Wasserzementwerten ist die Schrumpfung folglich größer als bei höherem w/z.

Diese Werte gelten für die Zeit nach der 24-stündigen Erhärtung der Proben bis zu dem Alter von 28 Tagen.

Die von Kuhl und Czernin an Zement-Wasser-Gemischen nach einem Tag festgestellten Schrumpfmäße betragen das rd. 0,4-fache der 28-Tage-Werte und das rd. 0,8-fache der nach dem ersten bis zum 28. Tage beobachteten Kontraktion.

Nach Francmanis können während der ersten 24 Stunden etwa 60 % der Volumenkontraktion nach dem Erstarrungsbeginn des Zements und 40 % vorher, schon rd. 30 Minuten nach der Mörtelherstellung, beobachtet werden. Nach diesen Angaben über Verlauf und Größe der Volumenänderung können die Schrumpfmäße von Frischbeton geschätzt werden. Die am System Zement/Wasser volumenometrisch ermittelten Ergebnisse sind aber nicht unmittelbar auf Frischbeton übertragbar, wie es die folgende Überschlagsrechnung zeigt:

z.B. müßte einem Schrumpfmäß von 1,5 cm<sup>3</sup>/100 g Zement, das 24 Stunden nach dem Mischen gemessen worden ist, bei einem Beton mit 300 kg/m<sup>3</sup> Zementgehalt eine Volumenverminderung um 4500 cm<sup>3</sup> oder 0,45 Vol. %, folglich eine lineare Kontraktion von 1,5 mm/m entsprechen. Dieser Betrag ist aber unwahrscheinlich groß. Es ist anzunehmen, daß die Werte, die Czernin an den aus Zement, Quarzmehl und Wasser hergestellten Prismen beobachtet hat, angenähert auch für Frischbeton gelten können. Die Umrechnung der an 28 Tage alten Proben gemessenen linearen Kontraktionen ergibt Schrumpfmäße für die einen Tag alten Proben von etwa 0,8 . 0,15 = 0,12 mm/m für w/z = 0,4 und 0,08 mm/m für w/z = 0,5.

Hiernach können schon 30 Minuten nach Herstellung des Mörtels Schrumpfungen um 0,05 mm/m oder 0,014 Vol. % für w/z = 0,4 und um 0,03 mm/m oder 0,01 Vol. % für w/z = 0,5 möglich sein. -

Diese wenn auch sehr kleinen Volumenänderungen können als eine der Ursachen dafür angesehen werden, daß der Schalungsdruck nach dem Erreichen seines Größtwertes wieder fällt.

### 3.2 Eigene Untersuchungen

Um die Verfestigung eines Frischbetons zu beobachten, wurden im Jahre 1961 im Institut für Steine und Erden der Bergakademie Clausthal (Direktor: o. Prof. Dr. Ing. H. Lehmann) Versuche vorgenommen, über die in Anlage 1 berichtet wird. Dabei wurden an Frischbetonproben, die in Balkenformen (Länge 56 cm, Breite 13 cm, Höhe 10 cm) eingebracht worden sind, Stempeldruckversuche bei einem Probalter zwischen etwa 1 3/4 und 8 Stunden vorgenommen. Aus einem Kiessandgemisch mit 15 mm Größtkorn mit einer nach Bolomey errechneten Sieblinie und Portlandzement Z 275 wurden folgende Versuchsbetone hergestellt:

Versuchsreihe	1	2	3	4	5	6
Zementgehalt (kg/m <sup>3</sup> )	299	301	304	362	360	363
Wasseranteil (kg/m <sup>3</sup> )	164	196	244	163	178	218
Wasser-Zement-Wert w/z	0,55	0,65	0,80	0,45	0,495	0,60
Frischbetontemperatur (°C)	14,0	14,9	13,9	15,8	15,4	16,2

Die in Formen zweilagig eingebrachten und durch Stochern bzw. leichtes Rütteln verdichteten Frischbetonproben wurden bei Raumtemperaturen von rd. 6° C, 15° C und 20° C gelagert. Mit einer Druckpresse von 600 kp Höchstkraft wurde ein kegelförmiger Stahlstempel von 40 mm Ø mit einem Spitzenwinkel von 45° in die abgeglichenen Probenoberflächen 50 mm tief eingepreßt und die hierzu erforderlichen Prüflasten ermittelt.

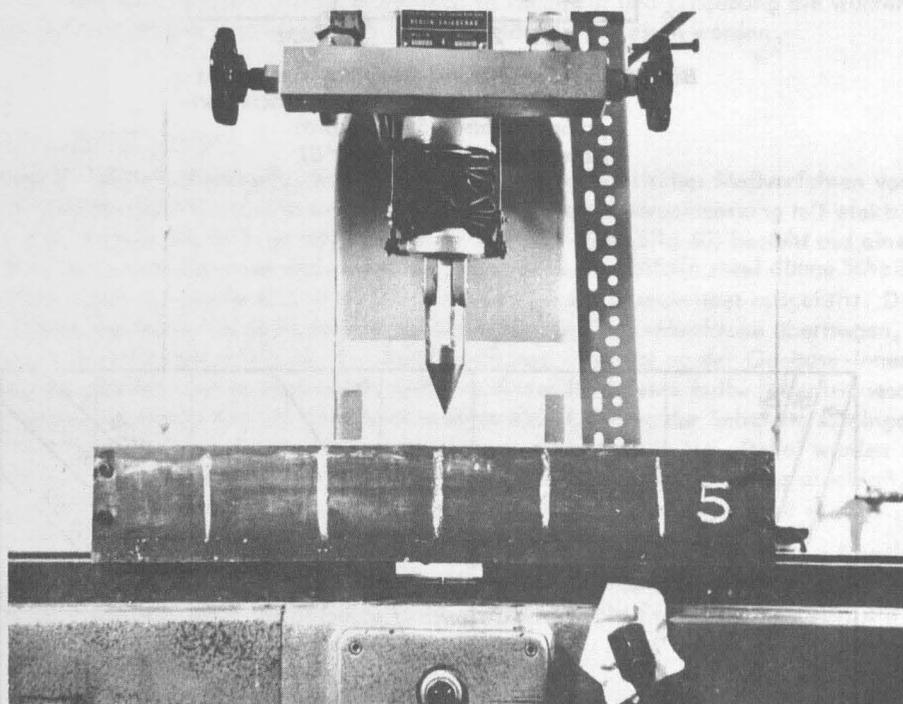


Bild 37 Prüfmaschine, eingerichtet für den Stempeldruckversuch

Zu den in Anlage 1 wiedergegebenen Versuchsergebnissen ist folgendes zu bemerken: Einer Stempelast von 100 kp entsprechen eine auf den Stempelquerschnitt bezogene Spannung von rd. 8 kp/cm<sup>2</sup> bzw. eine auf die Kegeloberfläche bezogene Spannung von rd. 3 kp/cm<sup>2</sup>. Etwa zu den Zeitpunkten, als diese Stempelasten ermittelt wurden, konnten an einzelnen Betonprobewürfeln Druckfestigkeiten zwischen 0,65 und 1,01 kp/cm<sup>2</sup> festgestellt werden. Solchen Werten entsprechen die Eigengewichte von 2,7 m bis 4,2 m hohen Betonsäulen.

Die im Frischbeton enthaltene Wassermenge hat einen wesentlichen Einfluß auf die Entwicklung seiner Frühfestigkeit. In Bild 38 (S. 46) sind für die bei rd. 20° C gelagerten Proben die Prüflasten aufgetragen worden, die zur Zeit des Erstarrungsbeginns des verwendeten Portlandzements ermittelt worden sind. (Prüfung nach DIN 1164: Erstarrungsbeginn 4 Std. 17 Min., Erstarrungsende 5 Std. 37 Min.) Bei der Versuchsreihe 4 mit dem geringsten Wasseranteil  $w = 163 \text{ kg/m}^3$  ergab sich die für den Stempeldruck notwendige Kraft mit rd. 275 kp, während bei der Versuchsreihe 3 mit dem größten Wasseranteil  $w = 244 \text{ kg/m}^3$  nur die Stempelast von rd. 70 kp nötig war. - Bei der graphischen Auswertung aller Versuchsreihen fanden sich die in Bild 39, S. 46, dargestellten Zusammenhänge zwischen der Eindruckkraft des Prüfstempels, dem Betonalter, dem Wassergehalt des Frischbetons und der Lagerungstemperatur. Die bei Reihe 1 ( $w = 164 \text{ kg/m}^3$ ) und Reihe 4 ( $w = 163 \text{ kg/m}^3$ ) gefundenen

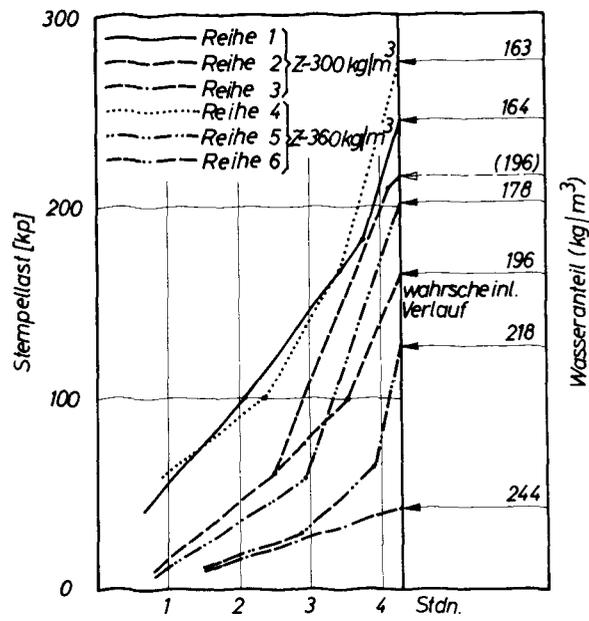


Bild 38 Bis zum Zeitpunkt des Erstarrungsbeginns des Zements (4 Std. 17 Min.) an Frischbetonproben ermittelte Stempellasten. (Lagerungstemperatur  $t_L=20^\circ\text{C}$ ).

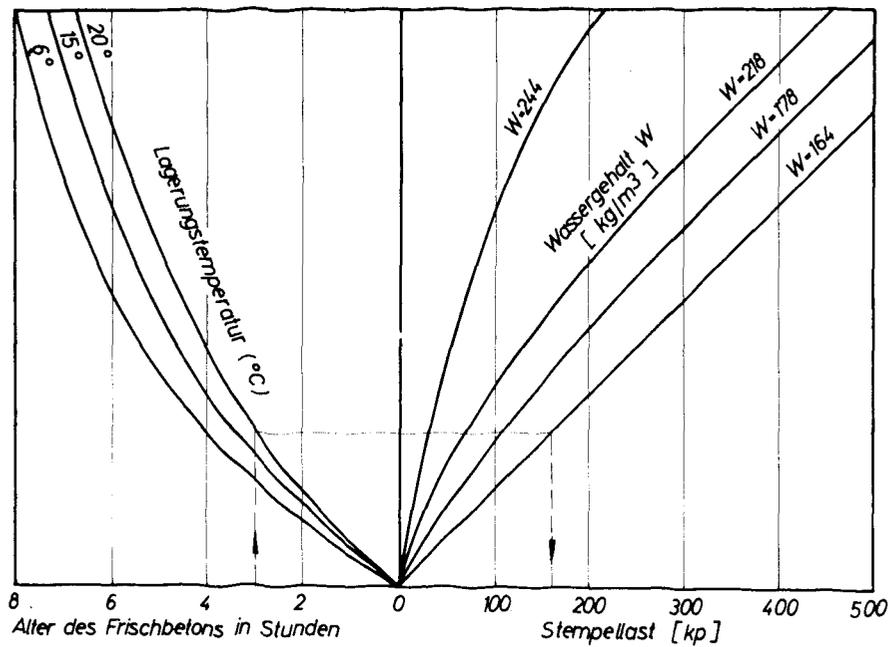


Bild: 39 Zusammenhänge zwischen Stempellast, Alter und Wassergehalt des Frischbetons und Lagerungstemperatur. (Frischbetontemperatur bei Herstellung der Proben  $15^\circ\text{C}$ )

Ergebnisse konnten zusammengefaßt werden. Auf die Wiedergabe der Werte aus Reihe 2 ( $w = 196 \text{ kg/m}^3$ ) wurde wegen der besseren Übersichtlichkeit verzichtet. - Es zeigt sich, daß die Verfestigung des Frischbetons von seinem Wassergehalt und der Lagerungstemperatur abhängt. Unter Verwendung dieser beiden Parameter kann in dem Diagramm der zu einer bestimmten Zeit zu erwartende Verformungswiderstand (als Stempellast) ermittelt werden. -

Die im Versuchsbeton enthaltenen Zementmengen ( $300 \text{ kg/m}^3$  und  $360 \text{ kg/m}^3$ ) sowie die Wasserzementwerte  $w/z$  zeigten keine kennzeichnenden Einflüsse auf die Betonverfestigung während der ersten Stunden.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, daß der Beton bei der Probenherstellung nur einmal durch leichtes Rütteln oder Stochern verdichtet worden ist. Es kann angenommen werden, daß sich die Anfangsfestigkeiten eines Gußbetons oder eines durch Stochern verdichteten Betons ähnlich entwickeln. Die in Abschn. 4 beschriebenen Schalungsdruckmessungen sind an Bauwerken durchgeführt worden, bei denen ausschließlich Rüttelbeton ( $z = 300 \text{ kg/m}^3$ ,  $w < 160 \text{ kg/m}^3$ ) verwendet worden ist. Jede Schicht wurde dort mit steigender Betonhöhe mehrfach verdichtet.

Dabei verfestigte sich der Beton so sehr, daß der Schalungsdruck nicht mehr stetig zunahm, sondern nach Erreichen des Größtwertes entweder konstant blieb oder wieder abfiel. Dieser Größtwert wurde fast immer früher erreicht, als nach dem Verlauf der hier dargestellten Kurven der Festigkeitsentwicklung eines nur einmal und schwach verdichteten, wasserreicheren Betons anzunehmen wäre (vgl. Abs. 5.2, S. 68 ).

#### 4. Messungen von Schalungsdrücken an Bauwerken

Im Jahre 1962 konnten an verschiedenen Bauwerken in Hannover und Umgebung die während des Betonierens auftretenden Schalungsdrücke an lotrechten Schalungsflächen gemessen werden.

##### 4.1 Meßgeräte

##### 4.11 Druckmeßdose, Bauart Glöztl

Von der Firma F. Glöztl, Karlsruhe, wurden einige für ein hydraulisches Meßverfahren von Spannungen entwickelte Meßdosen (46) für die Versuche so umgebaut, daß die Schalungsdruckmessung mit elektrischer Anzeige auf einer Hottinger- bzw. Peekel-Meßbrücke möglich war. - Die Meßdose (Bild 40) besteht aus einem Druckkissen, das durch ein Rohr mit einem Gehäuse verbunden ist. Das Druckkissen bilden zwei dünne Scheiben von  $200 \times 100 \text{ mm}^2$ , die an den Rändern zusammengeschweißt sind. Der Hohlraum ist mit Quecksilber ausgefüllt. Die auf das Druckkissen wirkenden Lasten werden auf eine in das Gehäuse eingebaute Titan-Membrane übertragen, an deren Unterseite ein Dehnungsmeßstreifen angeklebt ist. Ein Kompensationsstreifen ist an der Gehäuse-Innenseite angebracht. Die Dehnungsmeßstreifen sind so geschaltet, daß ihre Widerstände eine halbe Wheatstonesche Brücke bilden. - Die Meßdosen wurden einen Tag vor dem Betonieren in eine Öffnung der Schalung so eingebaut, daß die freie Seite des Druckkissens mit der Innenseite der Schalung in einer Fläche lag. Dabei wurden die Rückseite und ein Teil des Rohres in Gipsmörtel eingebettet, der mit der Außenfläche der Schalung abschloß. Danach wurde die Aussparung mit hölzernen Laschen überdeckt, die auf die Schalung aufgeschraubt wurden.

Die Meßdosen wurden für die Eichung wie auf der Baustelle in Mörtel eingebettet und nach dessen Erhärtung auf der freien Seite über eine Frischmörtelschicht in einer Prüfmaschine belastet. Vier dieser Meßdosen wurden an vier Bauwerken eingesetzt. Sie fielen jedoch nach und nach durch Fehlmessungen aus, die auf Beschädigungen infolge der Rüttelbeanspruchungen zurückzuführen sein dürften.

##### 4.12 Membrandruckmeßdose der Bundesanstalt für Wasserbau ( BAW )

Die Meßdose (Bild 41) besteht aus einem ringförmigen Messinggehäuse, dessen Vorderseite mit einer aufgelöteten dünnen Messingmembrane ( $140 \text{ mm } \varnothing$ ) abgeschlossen ist. Nach dem Einbau der Meßvorrichtung ist eine Bodenplatte aufgeschraubt worden. An der Membranunterseite sind 4 Fühlstifte befestigt. Sie übertragen die Durchbiegungen der Membrane auf einseitig eingespannte Zungen, deren Verformungen mit Dehnungsmeßstreifen gemessen werden können (Schalung wie bei 4.11). Die entsprechenden Belastungen wurden aus einer von der BAW zur Verfügung gestellten Eichkurve ermittelt. Nach gemeinsamen Versuchen am 29.5.1963 hat die BAW eine Meßdose für die Schalungsdruckmessungen bereitgestellt. Die Meßdose wurde jeweils in eine kreisförmige Öffnung der Schalung (rd.  $15 \text{ cm } \varnothing$ ) eingesetzt und mit drei Schrauben befestigt.

Bild 40

# Spannungsmessdose

## Bauart Glötzl

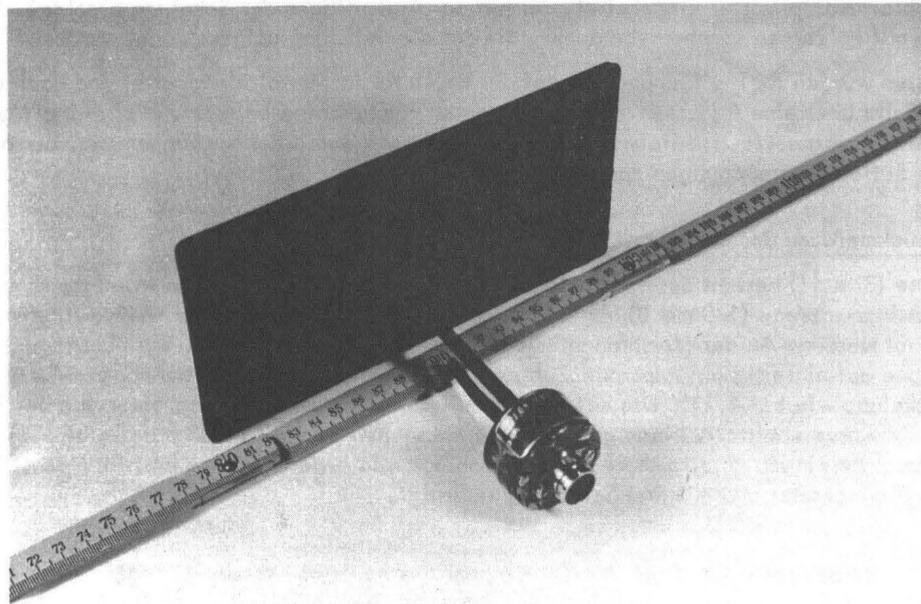
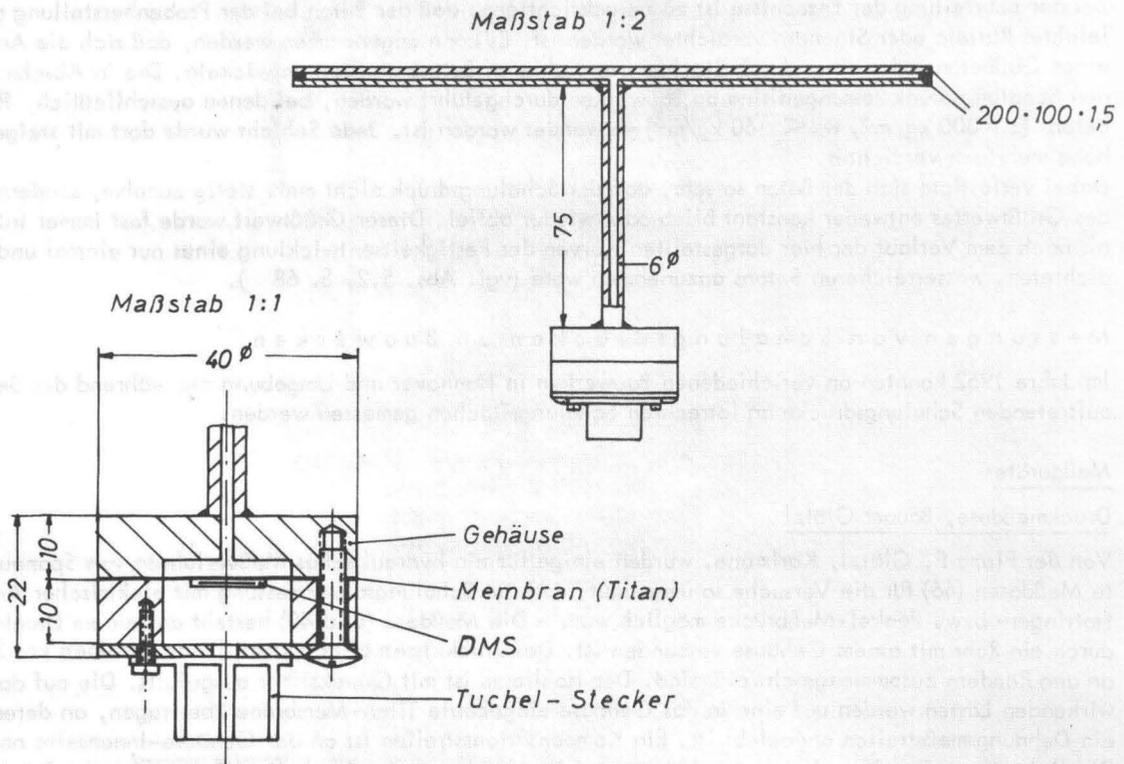
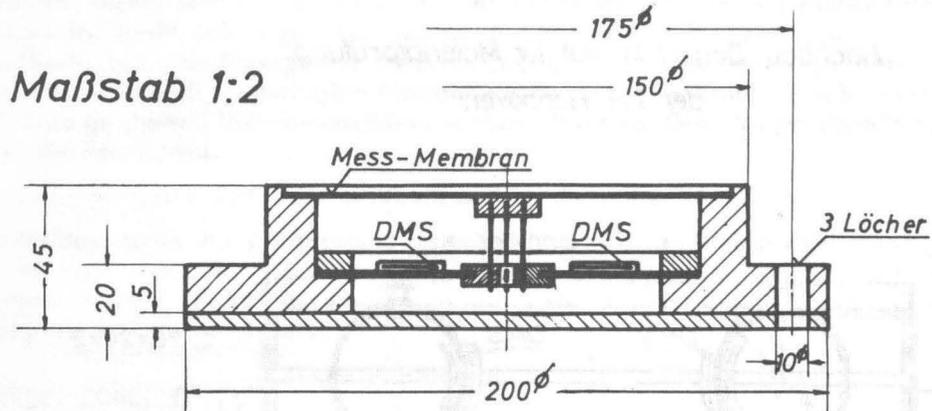


Bild 41

# Membran-Druckmeßdose der Bundesanstalt für Wasserbau



Maßstab 1:1

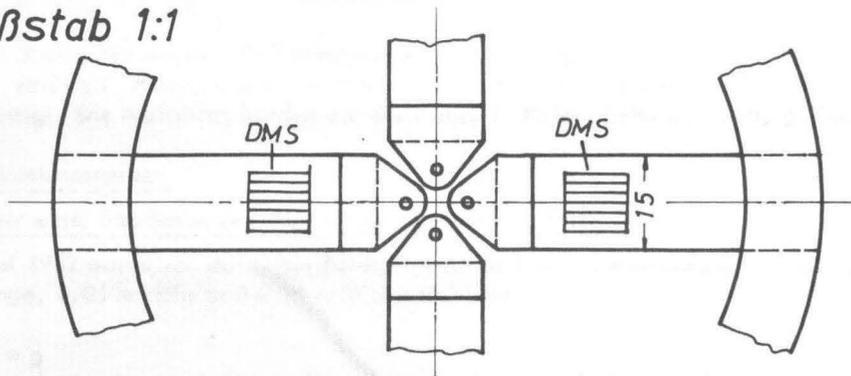
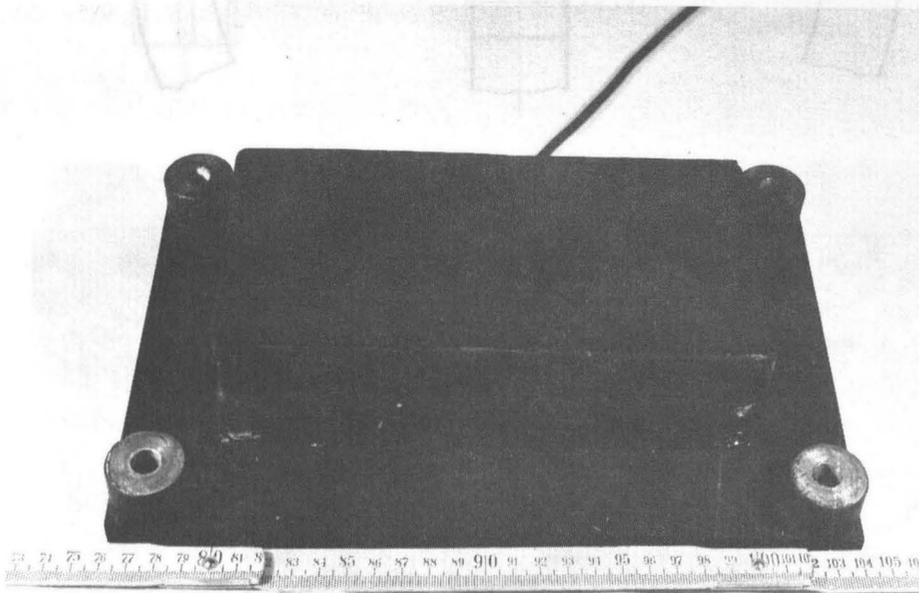
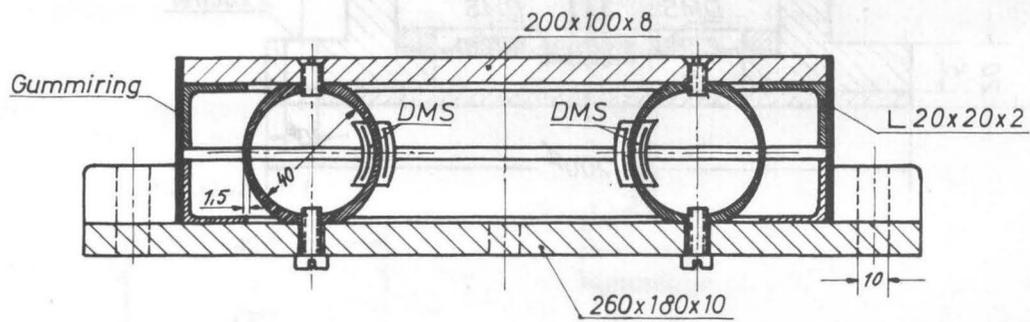


Bild 42

# Platten - Druckmeßdose

Nachbau "Bauart Institut für Materialprüfung  
der T.H. Hannover:"



Bibl. d. TH.  
Braunschweig

#### 4.13 Plattendruckmeßdose - Nachbau Bauart Institut für Materialprüfung und Forschung des Bauwesens der TH Hannover

In der Bauart der im Institut für Materialprüfung und Forschung des Bauwesens der TH Hannover (Direktor: o. Prof. Dr. techn. habil. W e i n h o l d ) für Untersuchungen von Straßenbauweisen (47) entwickelten Meßdosen wurden für die Schalungsdruckmessungen drei Plattendruckmeßdosen nachgebaut. Jede Meßdose besteht aus einer Druck- und einer Bodenplatte, die durch zwei exzentrisch gedrehte Lagerstützen verbunden sind. An jeder Stütze sind im Bereich der geringsten Wanddicke außen und innen Dehnungsmeßstreifen angeordnet und zu einer Vollbrücke geschaltet. Die Druckmeßdosen wurden mit breiten Gummiringen abgedichtet, die auf Winkelprofile aufgeklebt worden sind.

In einer Eichmaschine wurden die Meßdosen geeicht. Ihre Kennlinien waren linear.

Jede Meßdose wurde in die Schalung so eingebaut, daß zwischen Druckplattenrand und Schalholz mindestens 3 mm Zwischenraum blieben und die Druckplatte in der Schalungsfläche lag. An der Innenseite der Schalung wurde die Meßstelle mit einer etwa 30 x 40 cm<sup>2</sup> großen Plastikfolie überspannt, damit kein Frischbeton in den genannten Zwischenraum eindringen konnte.

#### 4.14 Temperaturmeßgeräte

Die Luft- und Frischbetontemperaturen wurden mit Widerstandsthermometern aus Nickel (Nennwiderstand 100 Ohm bei 0° C) gemessen, die von der Firma Degussa, Hanau, bezogen worden sind. Die Anzeigen wurden auf einem Kreuzspulensinstrument abgelesen.

#### 4.15 Meßuhren

Bei einigen Bauwerken wurden die Verformungen der Schalungsbretter bzw. des Schalgerüstes im Bereich der Meßstellen ermittelt. Hierzu wurden Meßuhren mit einem Anzeigebereich bis zu 50 mm an freistehenden Bockgerüsten befestigt. Die Meßuhren wurden von der Firma J. Käfer, Schweningen, geliefert.

#### 4.2 Schalungsdruckmessungen

##### 4.21 Mittelpfeiler einer Straßenbrücke über einen Autobahnabschnitt

Am 11. Mai 1962 wurde von der Firma Polensky und Zöllner, Niederlassung Hannover, ein Stahlbetonpfeiler von 6,50 m Länge, 6,01 m Höhe und 0,75 m Dicke errichtet.

##### 4.211 Schalung

Die Schalung bestand aus gehobelten 27 mm dicken Brettern mit Nut und Feder, die waagrecht aufeinander gesetzt waren. Der Aufbau des Schalgerüstes ist aus Bild 43 ersichtlich. Die Schalwände wurden gegen 75 cm lange Kantholzspreizen mit Stahldrähten St 37 Ø 6 mm verspannt, die auf Ankerplatten verkeilt wurden. Mit kräftigen Rundhölzern wurde das Gerüst zusätzlich abgestützt.

##### 4.212 Baustoffe

Nach den von der Baufirma durchgeführten Eignungsprüfungen war folgende Zusammensetzung für 1 m<sup>3</sup> Frischbeton vorgesehen:

300 kg Portlandzement Z 275 (Hannoversche Portlandzementfabriken A.G., Misburg)  
135 kg Wasser (Grundwasser)  
0,6 l Betonverflüssiger Novoc-flüssig  
1980 kg Kiessand (Leinekies) in 4 Korngruppen

Für den Z e m e n t wurden nach DIN 1164 der Erstarrungsbeginn nach 3 Std. 55 Min. und das Erstarrungsende nach 5 Std. 14 Min. ermittelt.

Ferner ergaben sich  
im Alter von

	1 Tag	7 Tagen	und 28 Tagen
die Druckfestigkeit zu	95	348	542 kp/cm <sup>2</sup>
die Biegezugfestigkeit zu	21	65	93 kp/cm <sup>2</sup> .

Der Z u s c h l a g s t o f f wurde nach Gewichtsteilen zugegeben in den Korngruppen

0 -	3 mm	27,5 %
3 -	7 mm	17,1 %
7 -	15 mm	11,9 %
15 -	30 mm	43,5 %

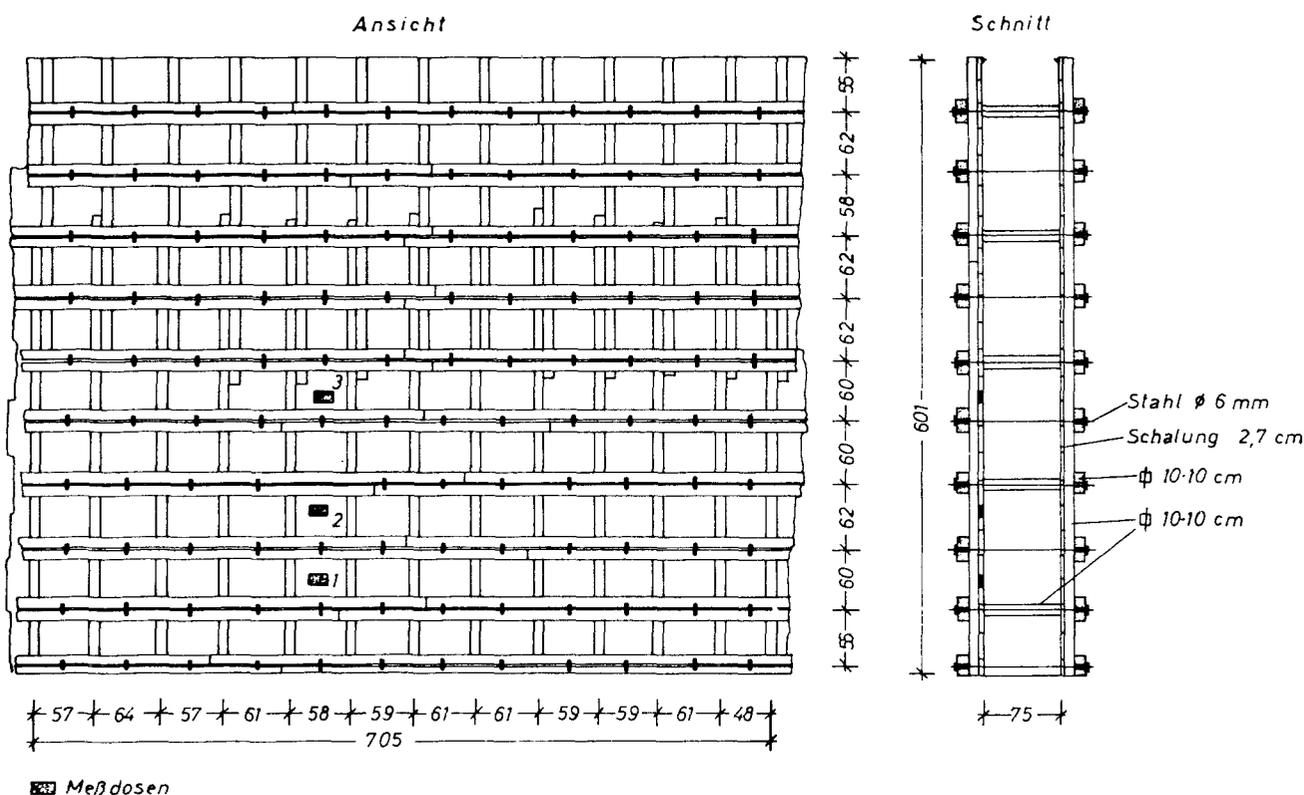


Bild 43 Schalung eines Brückenpfeilers

Für den an der Einbaustelle entnommenen Frischbeton wurde ein Ausbreitmaß von i. M. 43 cm und eine Rohdichte von  $2393 \text{ kg/m}^3$  ermittelt.

#### 4.213 Betonverarbeitung

Der Beton wurde in einem  $300 \text{ dm}^3$  fassenden Zwangsmischer hergestellt und in Kübeln mit einem Turmdrehkran auf das Schalgerüst befördert. Dort wurden die Kübel durch Öffnen der Bodenklappen über Trichtern entleert, durch die der Beton in Hosenrohren bis etwa 1,5 m über die Einbaustelle rutschte und dann frei fiel. Die sich dort bildenden Kegel wurden teils mit Schaufeln aber auch durch kurzes Eintauchen eines Rüttlers eingeebnet und anschließend mit Innenrüttlern (3000 U/min) verdichtet. Wegen des schnellen, fast stetigen Betonierfortschritts konnten keine stufenartigen Füllhöhen festgestellt werden. Die Rütteltiefe betrug etwa 90 cm. Nach dem Betonierbeginn um 7.45 Uhr wurde bis um 9.00 Uhr die Füllhöhe von 2,95 m erreicht. Im folgenden Arbeitsabschnitt wurde die Schalung zwischen 9.55 Uhr und 11.20 Uhr bis auf 5,30 m gefüllt. Nach dem Einbau des Bewehrungskorbes für die Auflagerbank wurde der Pfeiler von 12.25 Uhr bis 13.00 Uhr bis zur Höhe von 6,01 m fertig betoniert.

#### 4.214 Meßverfahren

Etwa bei einem Drittel der Pfeilerlänge wurden drei Glötzl-Druckmeßdosen in Abständen von 0,92 m, 1,68 m und 2,67 m über der Bodenfuge in die Schalung eingebaut. Während des Betoniervorgangs wurde die Füllhöhe an Bohrlöchern festgestellt, die in Abständen von 10 cm neben den Meßdosen angebracht worden waren. Betonhöhen von mehr als 3 m wurden von der Oberkante der Schalung aus gemessen. - Die Schalungsdrücke konnten ermittelt werden, sobald die Betonhöhe während der für die Messungen benötigten Zeit unverändert blieb. Die Verschiebungen des Schalgerüstes wurden von zwei neben den beiden Meßdosen in den Höhen von 0,92 m und 2,67 m auf-

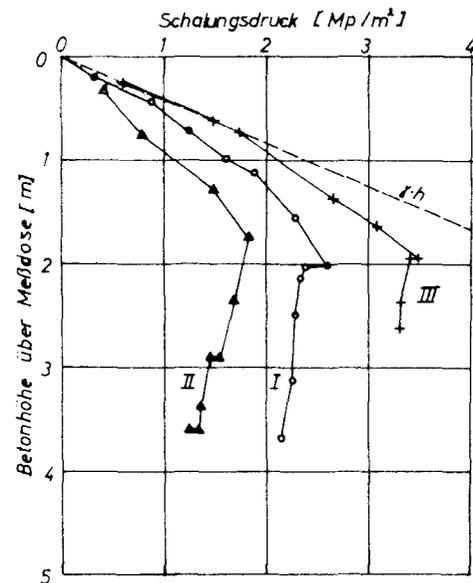
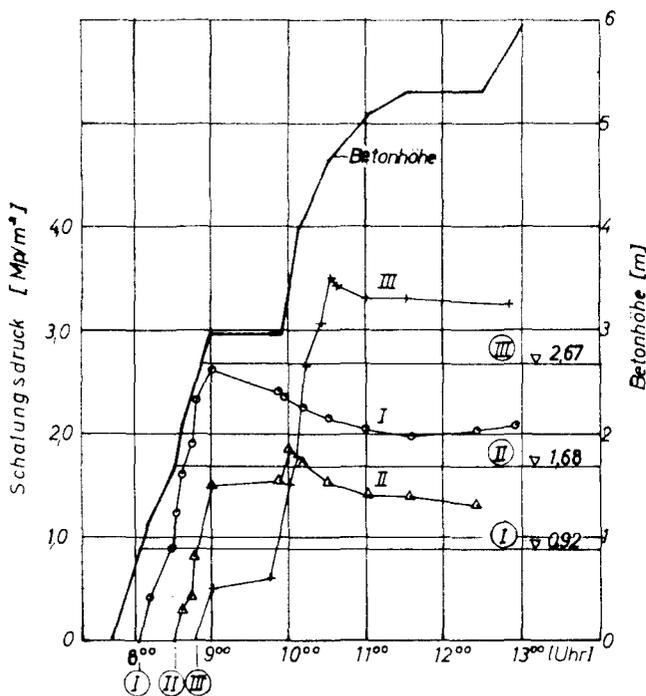


Bild 44 Messung des Schalungsdrucks beim Betonieren eines  
0,75 m dicken Brückenpfeilers am 11. Mai 1962

gesetzten Meßuhren angezeigt. Zur Messung der Frischbetontemperatur wurde ein Widerstandsthermometer in Höhe der mittleren Meßdose in Pfeilermittte zwischen zwei Spanndrähten befestigt.

#### 4.215 Meßergebnisse

In Bild 44 sind die Füllhöhen, Schalungsdrücke und Betonhöhen über den Meßdosen aufgetragen. Die von den einzelnen Meßdosen angezeigten Schalungsdrücke weichen stark voneinander ab. Bei einer Höhe von 2,03 m über der unteren Dose wurde kurz vor Beginn der ersten Pause der Schalungsdruck mit  $p = 2,63 \text{ Mp/m}^2$  bei einer Füllgeschwindigkeit von 2,20 m/h ermittelt. Nach der Betonierpause stieg der Druck nicht mehr weiter an. Dagegen nahm der Schalungsdruck auf die in mittlerer Lage eingebaute Meßdose bei dem Ansteigen des Betons nach der Pause noch etwas zu, blieb aber mit nur  $1,84 \text{ Mp/m}^2$  hinter dem an der tiefer angebrachten Dose gemessenen Betrag erheblich zurück. Die obere Druckmeßdose war im ersten Betonierabschnitt nur 0,28 m hoch überschüttet, so daß der Schalungsdruck nach dem nächsten Rütteln zuerst hydrostatisch weiter anstieg und bei einer Höhe von 1,94 m über der Meßstelle den Größtwert von  $3,49 \text{ Mp/m}^2$  erreichte. Die Füllgeschwindigkeit betrug zwischen Wiederbeginn der Arbeiten und dem Zeitpunkt, an dem der Größtwert gemessen wurde, etwa 2,6 m/h. Danach trat ein Druckabfall bis auf  $3,24 \text{ Mp/m}^2$  ein. Die an der Schalung gemessenen Verschiebungen betragen an der unteren Meßstellen (+0,92 m) 16,15 mm und an der oberen (+2,67 m) 19,15 mm. Bei den jeweiligen größten Seitendrücken wurden die Verschiebungen von 14,75 mm bzw. 17,80 mm ermittelt. Die Differenzen zwischen diesen und den nur wenig später festgestellten und während der letzten drei Stunden unveränderten Größtwerten dürften mit dem Nachquellen des vorher nicht angenäßten Schalholzes zu erklären sein.

Die Außentemperatur betrug um 7.45 Uhr  $7,2^\circ \text{ C}$ , um 9.00 Uhr  $9,0^\circ \text{ C}$  und stieg bis 13.00 Uhr auf  $13,5^\circ \text{ C}$  an. Die Frischbetontemperatur wurde um 9.00 Uhr mit  $13,3^\circ \text{ C}$  und um 13.00 Uhr mit  $14,4^\circ \text{ C}$  gemessen.

#### 4.22 Widerlager einer Straßenbrücke über einen Autobahnabschnitt

Am 16. und 17. Mai 1962 wurden Schalungsdruckmessungen an der Stirnseite eines Brückenwiderlagers von 6,37 m Höhe, 13,8 m Länge und 0,70 m Dicke vorgenommen, das von der Firma Polensky und Zöllner, Niederlassung Hannover, gebaut wurde.

##### 4.221 S c h a l u n g

Die Schalung entsprach im wesentlichen der im Abschnitt 4.211 beschriebenen. An der Rückseite des Widerlagers waren die Schalbretter jedoch durch 2,0 cm dicke Schalplatten aus Holz (50 x 125 cm<sup>2</sup>) ersetzt.

##### 4.222 B a u s t o f f e

Der Beton wurde aus den bereits im Abschnitt 4.21<sup>2</sup> beschriebenen Bestandteilen und Mengen zusammengesetzt. Die Frischbetonrohddichte betrug i.M. 2405 kg/m<sup>3</sup>. Die Ausbreitmaße lagen zwischen 36,2 und 40,7 cm, i.M. bei 37,8 cm.

##### 4.223 B e t o n v e r a r b e i t u n g

Für die Betonbereitung stand ein 500 l-Zwangsmischer zur Verfügung. Der Transport und der Einbau des Frischbetons erfolgten wie am vorher beschriebenen Bauwerk. Insgesamt wurden 340 m<sup>3</sup> Beton in rd. 30 Stunden verarbeitet. Die einzelnen Schichten hatten unterschiedliche Dicken. Die Rüttler sind etwa 20 cm tief in die vorher eingebrachte Betonschicht getaucht worden, so daß sich Rütteltiefen von etwa 0,50 bis 0,90 m ergeben haben.

##### 4.224 M e ß v e r f a h r e n

Etwa in der Mitte der Widerlager-Stirnwand sind 4 Glötzl-Druckmeßdosen in Ausschnitte der Bretterschaltung eingebaut worden, davon 3 übereinander 0,95 m, 1,58 m und 2,09 m hoch über der Oberkante des Fundaments, eine weitere im Abstand von rd. 1,20 m neben der oberen Meßdose. In rd. 1,0 m Höhe wurden zwei Widerstandsthermometer zur Messung der Betontemperaturen, das eine in der Mitte der Betonwand und das andere 2 cm von der Schalfläche entfernt, angebracht.

Neben der unteren (+0,95 m) und der oberen Meßdose (+2,09 m) waren Meßuhren angesetzt, um die Verschiebungen der Schalung zu ermitteln.

##### 4.225 M e ß e r g e b n i s s e

Die während der Betonierarbeiten im Laufe von mehr als 24 Stunden ermittelten Schalungsdrücke sind im Bild 45 dargestellt. Die untere Meßdose wurde von der ersten Schicht nur 14 cm hoch überdeckt. Bei dem folgenden Umlauf ergab sich hier bereits der größte Schalungsdruck von 1,23 Mp/m<sup>3</sup> bei einer Betonhöhe h = 0,79 m über der Meßstelle, der nach dem Einbringen der nächsten Schicht mit p = 1,20 Mp/m<sup>2</sup> bei h = 1,34 m fast wieder erreicht worden ist. Der größte Schalungsdruck wurde an der mittleren Meßstelle (+1,58 m) bei einer Betonhöhe h = 0,71 m mit p<sub>max</sub> = 1,67 Mp/m<sup>2</sup> ermittelt. An der einen in 2,09 m Höhe eingebrachten Meßdose wurde mit p = 1,64 Mp/m<sup>2</sup> ein fast ebenso großer Druck gemessen, jedoch betrug hier die Betonhöhe h über der Meßstelle 0,96 m. An der in gleicher Höhe 1,20 m entfernt eingebauten Meßdose trat bei derselben Füllhöhe ein geringerer Druck auf: p = 1,38 Mp/m<sup>2</sup>. Die Ursache für diesen Unterschied dürfte entweder eine geringere Betonverdichtung oder ein Nachgeben der Schalung sein. An dieser Stelle war nach vorübergehendem Druckabfall beim Einbringen der nächsten Schicht ein kurzer Wiederanstieg des Drucks zu verzeichnen. Wegen der zum Teil bis zu fast drei Stunden dauernden Zeitabstände, nach denen eine nächste Schicht betoniert worden ist, konnte nur eine mittlere Betoniergeschwindigkeit von 0,22 m/h angegeben werden.

Die Frischbetontemperatur wurde bei Erreichen der Füllhöhe von 1,09 m mit 10,8° C bei einer gleichzeitigen Außentemperatur von 10,2° C ermittelt. In den folgenden 8 Stunden stieg die Betontemperatur in Bauwerkmitte auf 19,3° C und in Schalungsnähe auf 16,5° C an. Sie erreichte nach 24 Stunden 33,0° C bzw. 26,1° C. Die Außentemperaturen schwankten zwischen 10,2° C am 16.5. nachmittags, 7,2° C tiefster Nachttemperatur am 17.5. um 3.00 Uhr früh und 12,3° C um 14.00 Uhr nur wenig. An den beiden Meßstellen "unten" (+0,92 m) und "oben" (+2,09 m) wurden folgende Verformungen der Schalung ermittelt:

bei einer Füllhöhe der Schalung

von	0,45	1,09	1,74	2,29	2,75	3,05	3,70	4,28 (m)
in 0,92 m Höhe	0,5	5,8	10,2	10,2	10,3	10,3	10,3	10,3 (mm)
in 2,09 m Höhe	0,8	1,5	6,2	10,6	15,3	17,2	17,3	17,3 (mm)

Die größten Werte wurden für die Füllhöhen ermittelt, bei denen an den in gleicher Höhe angebrachten Meßdosen die größten Schalungsdrücke auftraten.

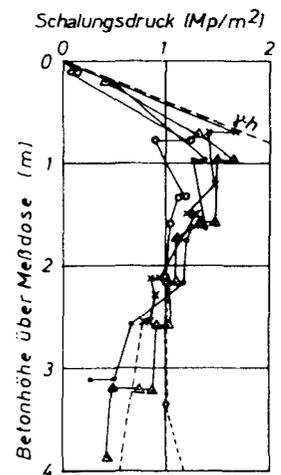
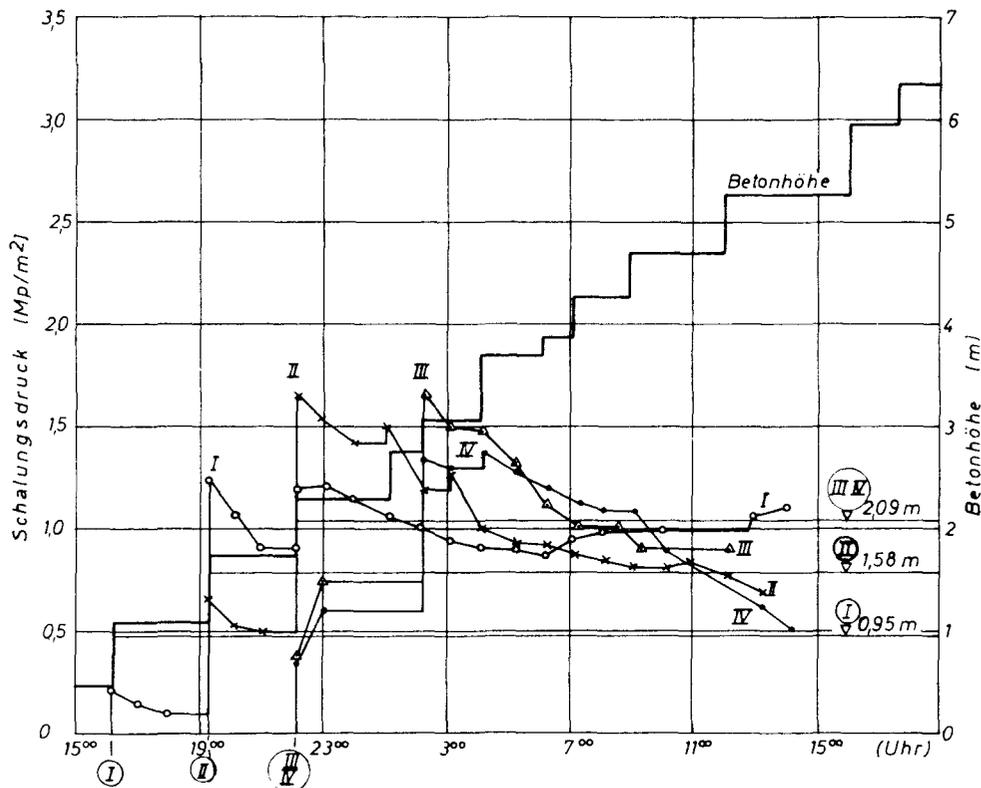


Bild 45

Messung des Schalungsdrucks beim Betonieren eines 0,70 m dicken Brückenwiderlagers am 16./17. Mai 1962

#### 4.23 Widerlager einer Straßenbrücke über einen Autobahnabschnitt

Dieses Widerlager gehörte zu dem in Abschnitt 4.21 beschriebenen Bauwerk. Es war 5,43 m hoch, 6,50 m lang und 0,70 m dick.

##### 4.231 Schalung s. Abschnitt 4.211

##### 4.232 Baustoffe s. Abschnitt 4.212 - Die Frischbetonrohichte wurde mit $2396 \text{ kg/m}^3$ und das Ausbreitmaß i. M. zu 36,7 cm ermittelt.

##### 4.233 Betonverarbeitung s. Abschnitt 4.213 - Die einzelnen Schichtdicken schwankten zwischen 0,30 m und 0,70 m. Dementsprechend ergaben sich Rütteltiefen bis zu 0,90 m.

##### 4.234 Meßverfahren Zwei Glözl-Druckmeßdosen wurden etwa in der Mitte des Widerlagers in Höhe von 0,47 m und 1,61 m in die Schalung eingebaut. In der Höhe der unteren Meßdose wurde je ein Widerstandsthermometer in der Mitte des Bauteils und an der Innenseite der Schalung angebracht. Die Verformungen der Schalung wurden an den beiden Meßstellen ermittelt.

#### 4.235 Meßergebnisse

Die während des Betonierens ermittelten Betonhöhen und Schalungsdrücke sind in Bild 46 eingetragen. Der an der unteren Meßstelle gemessene Schalungsdruck blieb mit  $1,44 \text{ Mp/m}^2$  bei einer Betonhöhe über der Meßdose von  $h = 0,95 \text{ m}$  hinter dem erwarteten hydrostatischen Druck zurück.

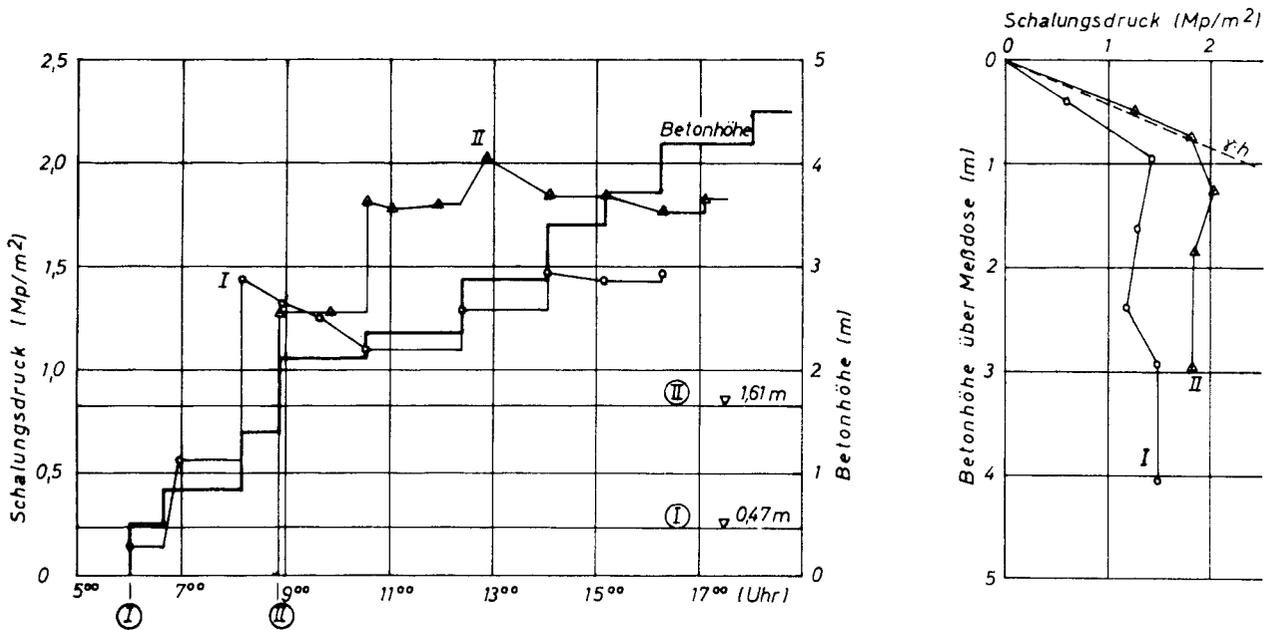


Bild 46 Messung des Schalungsdrucks beim Betonieren eines  $0,70 \text{ m}$  dicken Brückenwiderlagers am 29. Mai 1962

Dies dürfte im wesentlichen mit dem Nachgeben der Schalung zu erklären sein, die im Laufe der Betonierarbeiten noch zusätzlich abgesteift wurde, so daß ein scheinbares erneutes Ansteigen des Drucks zu verzeichnen war. An der oberen Meßstelle wurde bei einer Betonhöhe  $h = 1,28 \text{ m}$  der größte Schalungsdruck mit  $2,04 \text{ Mp/m}^2$  ermittelt, als die dritte Schicht über der Meßdose eingebracht wurde. – Die größten Verformungen der Schalung betragen an der unteren Meßstelle  $16 \text{ mm}$ , an der oberen  $23,6 \text{ mm}$ .

Bei einer Außentemperatur von  $8,5^\circ \text{ C}$  wurde um 6.00 Uhr eine Frischbetontemperatur von  $11,8^\circ \text{ C}$  festgestellt. Die Außentemperatur stieg bis 14.00 Uhr auf  $13,3^\circ \text{ C}$  an. Zu dieser Zeit hatte die Betontemperatur in der Mitte der Schalung  $15,0^\circ \text{ C}$ , an der Schalungswand  $14,1^\circ \text{ C}$  erreicht und stieg bis zum Betonierschluß (nach 12 Stunden) auf  $19,0^\circ \text{ C}$  bzw.  $16,4^\circ \text{ C}$ .

#### 4.24 Widerlager einer Stadtautobahn-Brücke

Von der Firma Fritz Schuppert, Hoch- und Tiefbaugesellschaft, Hannover, wurde beim Bau einer Autobahnbrücke am 27.6.1962 eins der Widerlager von  $12,8 \text{ m}$  Länge,  $5,45 \text{ m}$  Höhe und  $0,70 \text{ m}$  Dicke errichtet.

##### 4.241 Schalung

Die Schalung bestand in dem später im Erdreich liegenden unteren Teil des Widerlagers bis zu einer Höhe von  $1,70 \text{ m}$  aus waagrecht verlegten hölzernen Schalltafeln ( $2 \text{ cm}$  dick,  $50 \text{ cm}$  breit,  $125 \text{ cm}$  lang). Im oberen Teil waren  $2 \text{ cm}$  dicke,  $10 \text{ cm}$  breite Schalbretter senkrecht angeordnet. Ständer und Streich-Hölzer ( $\square 10/10$ ) waren in gegenseitigen Abständen von  $0,60 \text{ m}$  angebracht. Die Schalwände waren mit Stahllankern  $\varnothing 18 \text{ mm}$  gegen aussteifenden Fertigbetonspreizen  $6 \times 6 \text{ cm}^2$  verspannt. Mit kräftigen Rundhölzern war das Schalgerüst in zwei Ebenen zusätzlich abgestützt. – Die Schalung wurde vor Betonierbeginn 12 Stunden lang naß gehalten.

#### 4.242 Baustoffe

Der Frischbeton enthielt je m<sup>3</sup>

300 kg Portlandzement Z 275

(Norddeutsche Portland-Cementfabriken AG., Werk Alemannia)

132 kg Leitungswasser

1960 kg Kiessand (Leinekies und Grubensand)

in 4 Korngruppen und Quarzmehlzugabe

Für den Zement wurden nach DIN 1164 der Erstarrungsbeginn nach 2 Std. 42 Min., das Erstarrungsende nach 4 Std. 16 Min. und die Mahlfeinheit mit 7,4 % Rückstand auf dem Sieb mit 4900 Maschen/cm<sup>2</sup> ermittelt. Der Zuschlagstoff bestand aus Leinekies, dem Quarzmehl zugegeben wurde, und hatte folgende Zusammensetzung:

Quarzmehl	Korngruppe				Gew.-%
	0 - 3	3 - 7	7 - 15	15 - 30 mm	
2	38	13	23,5	23,5	

Die Frischbetonrohichte ergab sich mit 2390 kg/m<sup>3</sup>. Das Ausbreitmaß betrug i. M. 36,7 cm.

#### 4.243 Betonverarbeitung

Der Beton wurde in einem 500 l-Zwangsmischer hergestellt und an die zwischen 60 bis 70 m entfernten Einbaustellen gepumpt. Durch Hosenrohre rutschte er in die Schalung und fiel schließlich 1 bis 1,5 m frei herab. Die Betonschichten waren 0,65 bis 0,95 m dick und wurden durch etwa 1,0 m tiefes Eintauchen von Innenrüttlern verdichtet.

#### 4.244 Meßverfahren

In einer Höhe von 2,40 m über dem Fundament wurden eine Membrandruckmeßdose BW (Abschn. 4.12) und eine Plattendruckmeßdose (Abschn. 4.13) in einem Abstand von rd. 0,70 m in Aussparungen der Schalung eingebaut. Eine weitere Plattendruckmeßdose und eine Glötzl-Druckmeßdose wurden in 3,90 m Höhe, rd. 0,6 m voneinander entfernt, angebracht. Letztere fiel jedoch nach kurzer Zeit aus. - Mit Meßuhren, die 1,50 m und 2,90 m hoch über dem Fundament befestigt waren, konnten die Verformungen des Schalgerüsts gemessen werden. - Die Frischbetontemperaturen sind an einer Meßstelle in der Wandmitte in 1,90 m Höhe mit einem Widerstandsthermometer ermittelt worden. - Die Betonhöhen wurden während des Betonierens innerhalb der Schalung an einer Meßplatte abgelesen.

#### 4.245 Meßergebnisse

Bild 47 enthält die Aufzeichnungen der stufenartigen Betonhöhen und der jeweiligen Schalungsdrücke.

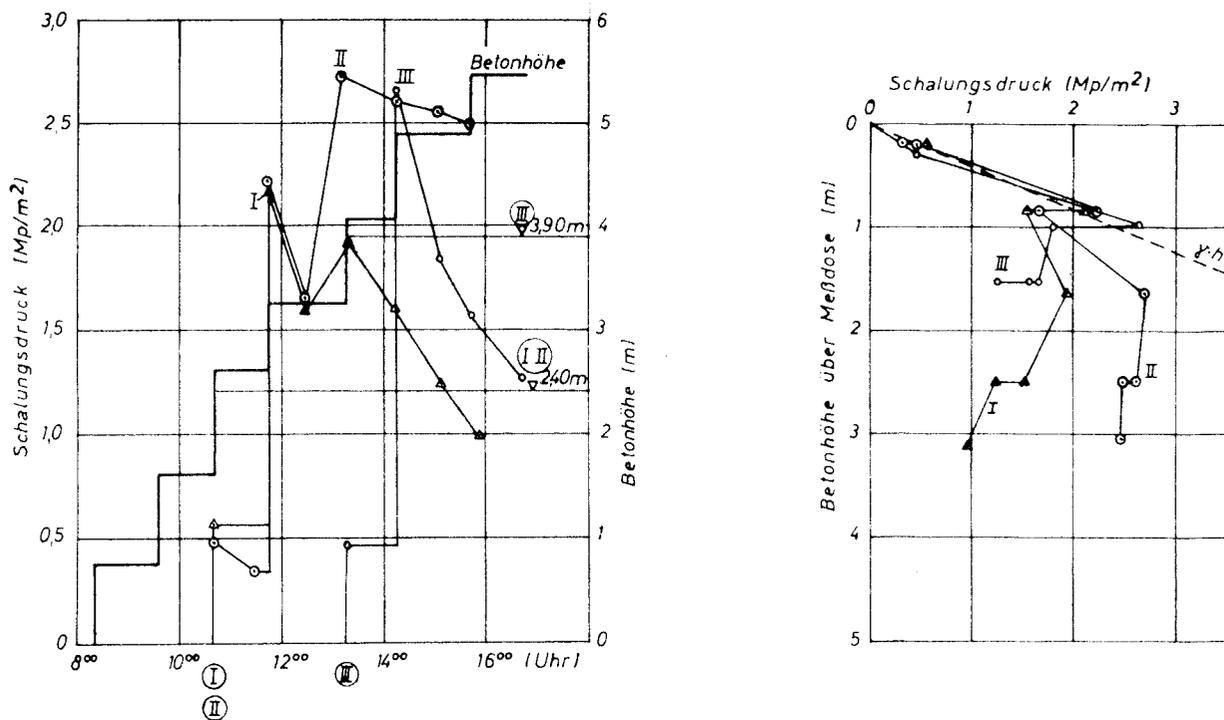


Bild 47 Messung des Schalungsdrucks beim Betonieren eines 0,70 m dicken Brückenwiderlagers am 27. Juni 1962

Die unteren beiden Meßdosen wurden erstmalig bei einer Füllhöhe von 2,60 m belastet. Von der nächsten Schicht um 0,75 m überdeckt, zeigten sie fast übereinstimmend Schalungsdrücke von  $p = 2,19 \text{ Mp/m}^2$  bzw.  $2,22 \text{ Mp/m}^2$  an. Nach einem vorübergehenden Druckabfall nahmen die an beiden Meßdosen festgestellten Werte bei Einbringen der nächsten Schicht und einer Betonhöhe  $h = 1,65 \text{ m}$  wieder zu, wobei an der Plattenmeßdose mit  $p = 1,93 \text{ Mp/m}^2$  der Größtwert nicht wieder erreicht wurde, die Membrandruckmeßdose dagegen  $p_{\max} = 2,72 \text{ Mp/m}^2$  anzeigte. Der Unterschied dürfte mit einer möglichen ungleichen Rüttelwirkung auf die 0,7 m auseinander liegenden Geräte zu erklären sein. An der oberen Plattendruckmeßdose wurde beim Einbau der 1,0 m über der Meßstelle liegenden Schicht der größte Schalungsdruck mit  $2,64 \text{ Mp/m}^2$  gemessen. Er fiel bei gleicher Füllhöhe auf  $1,83 \text{ Mp/m}^2$  und bei dem weiteren Ansteigen des Betons noch mehr ab.

Für die Zeit von 8.20 Uhr bis 14.15 Uhr konnte die Betoniergeschwindigkeit mit i.M.  $0,70 \text{ m/h}$ , für einzelne Abschnitte zwischen  $0,55$  und  $0,94 \text{ m/h}$  ermittelt werden.

Nach dem Eintauchen des Widerstandsthermometers in den Frischbeton betragen um 9.35 Uhr die Betontemperatur  $17,7^\circ \text{ C}$  und die Lufttemperatur  $9,7^\circ \text{ C}$ . Um 12.30 Uhr konnte mit  $12,9^\circ \text{ C}$  die höchste Tagestemperatur gemessen werden. Bei Betonierschluß hatte sich der inzwischen etwa 7 Stunden alte Beton auf  $21,2^\circ \text{ C}$  erwärmt.

Die an einem Ständer des Schalgerüsts jeweils zwischen zwei Zugankern gemessenen Durchbiegungen betragen bei einer Füllhöhe der Schalung

von	0,75	1,65	2,60	3,25	4,05	4,90	5,45 m
in 1,50 m Höhe	+ 0,30	+ 1,28	+ 2,15	+ 2,60	+ 2,32	+ 2,10	+ 1,97 mm
in 2,90 m Höhe	- 0,58	- 0,70	- 0,62	+ 0,74	+ 3,09	+ 3,19	+ 2,73 mm

Bei den vergleichsweise geringen Verformungen haben sich die Größtwerte erst bei Betonhöhen von  $1,75 \text{ m}$  bzw.  $1,25 \text{ m}$  über den Meßstellen ergeben. Die an der oberen Meßuhr angezeigten negativen Werte sowie die in beiden Fällen nach dem Überschreiten der Maxima eingetretenen kleinen Verformungsabnahmen können mit der Durchlaufwirkung des Ständers erklärt werden.

#### 4.25 Widerlager einer Eisenbahnbrücke über eine Bundesbahnstrecke

In der Nähe des Bahnhofs Northeim errichtete die Firma Polensky und Zöllner, Niederlassung Hannover, ein Kreuzungsbauwerk für die Bundesbahn. Am 18. Dezember 1962 wurde hierzu ein Widerlagerabschnitt betoniert, der im Grundriß stumpfwinklig zum Anschluß an eine Flügelmauer abgelenkt war. Der Querschnitt war an der Meßstelle  $6,35 \text{ m}$  hoch, an der Unterseite  $1,0 \text{ m}$  und an der Oberseite  $0,80 \text{ m}$  breit. Die Rückwand des Widerlagers hatte eine Neigung von weniger als  $2^\circ$  gegen die Lotrechte. Die Länge des Abschnitts betrug etwa  $12 \text{ m}$ .

#### 4.251 Schalung

Die Schalhaut bestand an der Streckenseite aus Hartfaserplatten, die auf gehobelten  $2,7 \text{ cm}$  dicken Schalbrettern befestigt waren. Die Widerlagerrückwand war aus  $2 \text{ cm}$  dicken hölzernen Schalplatten ( $50 \times 125 \text{ cm}^2$ ) und im Bereich des Überganges zur Flügelmauer aus ungehobelten  $2 \text{ cm}$  dicken Brettabschnitten errichtet. Beide Schalwände stützten sich auf senkrechte Ständer  $\square 10/10$  und doppelte Streich-Hölzer  $\square 10/10$  ab, deren gegenseitige Abstände  $0,60 \text{ m}$  betragen. Gegen hölzerne Paßriegel war das Schalgerüst mit Stahldrähten ST 37  $\varnothing 6 \text{ mm}$  verspannt. Weil sich an der Bundesbahnstrecke jede weitere Verbauung des lichten Raumes verbot, wurde die Vorderseite der Schalung mit Stahlseilen zugfest durch die Rückwand hindurch abgespannt, die wiederum mit kräftigen Rundhölzern in zwei Höhen abgesteift war.

#### 4.252 Baustoffe

Nach den Angaben der Bauleitung enthielt  $1 \text{ m}^3$  Frischbeton

300 kg Portlandzement Z 275

(Teutonia Misburger Portland-Cementwerk)

144 kg Wasser (Leitungswasser)

0,5 l Betonverflüssiger Actival Grünau

1960 kg Kiessand (Leinekies) in 4 Korngruppen sowie Quarzmehl

Für den Zement ergaben Teilprüfungen nach DIN 1164 den Erstarrungsbeginn nach 4 Std. 3 Min., das Erstarrungsende nach 5 Std. 19 Min. und die Mahlfineinheit mit  $11,9 \%$  Siebrückstand.

Die Zuschlagstoffe - Quarzmehl und Kiessand - waren wie folgt zusammengesetzt:

	Korngruppe				
Quarzmehl	0 - 3	3 - 7	7 - 15	15 - 30 mm	
	3,0	32,4	24,8	18,0	21,8 Gew.-%

An den Frischbetonproben, die vor der Betonpumpe genommen wurden, konnten die Ausbreitmaße zwischen  $37,8$  bis  $41,5 \text{ cm}$ , i.M.  $38,8 \text{ cm}$ , ermittelt werden. Die Frischbetonrohddichte betrug  $2396 \text{ kg/m}^3$ .

#### 4.253 Betonverarbeitung

Der Beton wurde in einem 500 l-Zwangsmischer hergestellt und etwa 90 m weit bis zu den Einbaustellen gepumpt, über Hosenrohre eingebracht und mit Innenrüttlern verdichtet. Als Rütteltiefen wurden 0,80 m bis 1,0 m angegeben. Die mittleren Schichtdicken ergaben sich mit etwa 0,60 m. -

Weil sich die Meßstelle nahe beim Ende des betonierten Widerlagerabschnitts befand, trat nach zwei kurz aufeinander folgenden Füllstufen jeweils eine Pause ein, so daß sich eine ungleichmäßige Stufenfolge in den Betonhöhen ergab. Um 9.00 Uhr und 12.00 Uhr sind Arbeitspausen eingelegt worden.

#### 4.254 Meßverfahren

In dem mit Brettern verschalteten Teil der rückwärtigen Schalung, nahe dem Anschluß der Flügelmauer, wurden folgende Druckmeßgeräte eingebaut:

In Höhen von 0,60 m, 1,25 m und 1,90 m die selbstgebauten Plattendruckmeßdosen und in Höhe von 1,525 m die Membrandruckmeßdose der Bundesanstalt für Wasserbau. - Die Betonhöhen wurden im Inneren der Schalung mit einer Latte gemessen. - Je ein Widerstandsthermometer wurde hinter der Schalhaut und etwa in der Mitte des Widerlagerquerschnitts in 0,6 m Höhe angebracht. - An einer in 0,90 m Höhe aufgestellten Meßuhr konnten die Verschiebungen eines Schalungsständers zwischen den beiden unteren Meßdosen abgelesen werden.

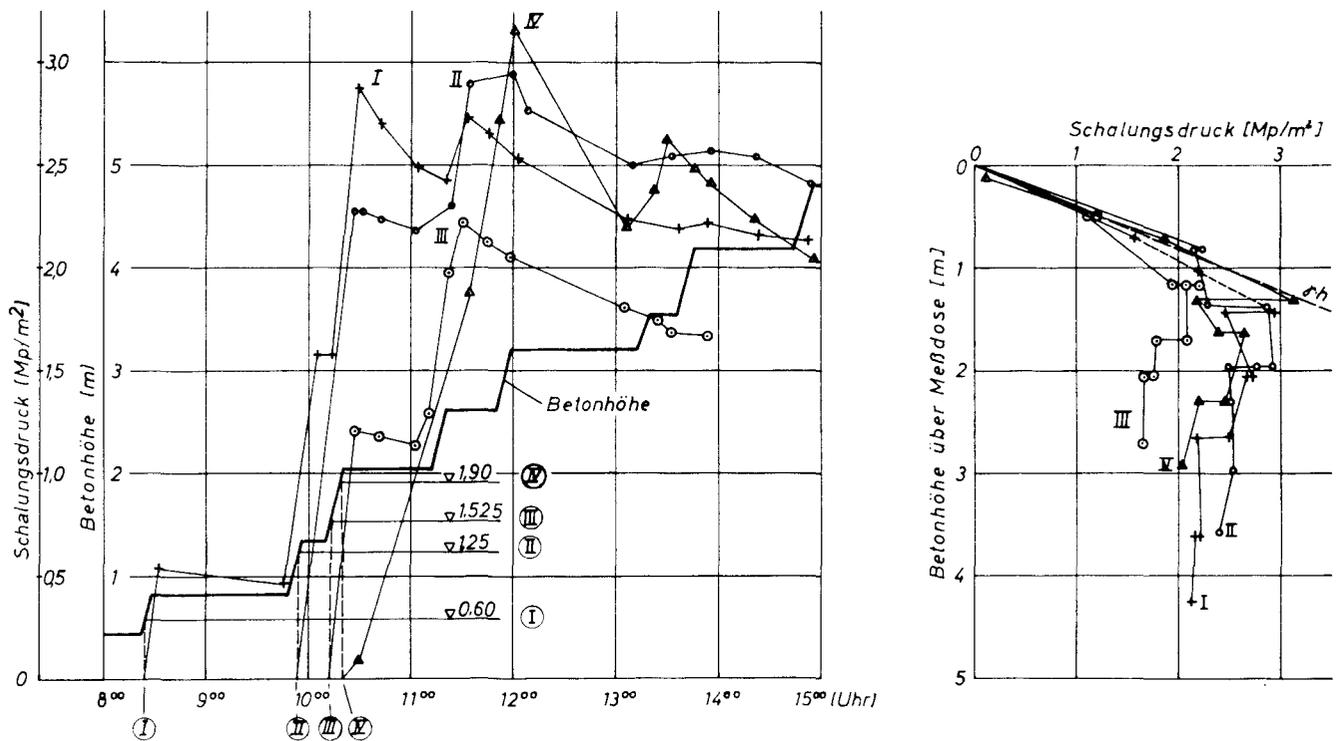


Bild 48 Messung des Schalungsdrucks beim Betonieren eines 1,0 m dicken Brückenwiderlagers am 18. Dez. 1962

#### 4.255 Meßergebnisse

Die während des Betonierens festgestellten Füllhöhen und die an den Meßdosen aufgetretenen Schalungsdrücke sind in Bild 48 aufgezeichnet. Von der zweiten Betonschicht wurde die untere Plattenmeßdose anfangs nur 0,21 m hoch bedeckt. Nach den beiden folgenden Durchgängen stellte sich bei einer Betonüberdeckung von  $h = 1,45$  m der größte Schalungsdruck mit  $2,89 \text{ Mp/m}^2$  ein, der zwar in der folgenden Zeit bei gleicher Betonhöhe abfiel. Bei Einfüllen der nächsten Lage zeigte sich jedoch ein Wiederansteigen bis auf  $2,75 \text{ Mp/m}^2$  bei  $h = 2,01$  m. Während der beiden Betonierabschnitte, die Füllhöhen von 1,33 m bzw. 2,05 m ergaben, sind die übrigen Meßdosen mit Beton überdeckt worden. An den in den Höhen von 1,25 m und 1,90 m angesetzten Meßdosen stellten sich die Größtwerte des Schalungsdrucks bei einer Betonhöhe  $h = 1,36$  m mit  $2,88 \text{ Mp/m}^2$  und bei  $h = 1,96$  m mit

2,94 Mp/m<sup>2</sup> bzw. bei h = 1,31 m mit 3,15 Mp/m<sup>2</sup> ein. Die Membrandruckmeßdose zeigte den größten Schalungsdruck mit 2,22 Mp/m<sup>2</sup> bei h = 1,09 m an, ohne daß bei der Rüttelverdichtung in der nachfolgenden Schicht ein weiterer Anstieg des inzwischen bereits abgefallenen Drucks erfolgt ist.

Die Aussentemperaturen waren sehr niedrig und lagen am Gefrierpunkt zwischen -0,8° C bei Betonierbeginn und +1,6° C mittags. Am Beton konnte in dieser Zeit nur ein Temperaturanstieg von 5,5° C auf 6,5° C festgestellt werden. Die Meßuhr zeigte bei einer Füllhöhe von 3,21 m, d. i. 2,31 m Betonhöhe über der Meßstelle, die größte Verschiebung mit 6,1 mm an, die sich in den folgenden Stunden bis zum Ende der Messungen um 0,3 mm verminderte. Die Betoniergeschwindigkeiten waren sehr unterschiedlich. Sie ergaben sich für das gesamte Bauwerk i. M. mit rd. 0,65 m/h, für einzelne Abschnitte z. B. bei der Füllung von 0,81 m auf 2,05 m mit 2,45 m/h, bei der nachfolgenden von 2,05 m auf 3,21 m mit 1,45 m/h. Dies liegt im wesentlichen daran, daß an der Meßstelle zwei Schichten jeweils kurz nacheinander betoniert worden sind.

#### 4.26 Stahlbetonstützen einer Straßenbrücke

An zwei Stahlbetonstützen einer über drei Felder gespannten Straßenbrücke, die von der Firma Polensky & Zöllner, Niederlassung Hannover, in der Nähe von Neustadt a. Rbge. erbaut wurde, konnten am 21.9. und 24.9.1962 Schalungsdruckmessungen durchgeführt werden. Beide Stützen waren kreisrund mit 1,25 m Ø und 5,01 bzw. 5,12 m hoch.

##### 4.261 Schalung

Die Schalung bestand aus Hartfaserplatten, die an Schalbrettern (2,4 cm dick) befestigt waren. Diese wurden von ringförmigen, aus 2 Lagen 2,4 cm dicker Bretter gezimmerten Zwingen in Abständen von 0,35 m umfaßt. Als Ständer dienten Kanthölzer 10/10, die von halbkreisförmigen, in Abständen von 0,90 bis 1,0 m angebrachten und miteinander durch Schrauben verbundenen Stahlbändern 60 · 8 mm<sup>2</sup> umfaßt waren (Bild 49). Gegen Auftrieb und seitliche Verschiebungen war die Schalung durch ein Stützgerüst gesichert.

##### 4.262 Baustoffe

Nach den Unterlagen der Baufirma enthielt 1 m<sup>3</sup> Frischbeton:

- 300 kg Portlandzement Z 275  
(Teutonia Misburger Portland-Cementwerk)
- 156 kg Grundwasser
- 1950 kg Kiessand (Grubenkies)
- 0,6 l Betonverflüssiger Novoc-flüssig

Die Teilprüfung des Zements (nach DIN 1164) ergab den Erstarrungsbeginn nach 3 Std. 52 Min., das Erstarrungsende nach 4 Std. 33 Min. und als Mahlfeinheit 4,9 % Siebrückstand.

Als Zuschlagsstoff wurde Grubenkies in 4 Korngruppen verwendet:

Korngruppe	0 - 3	3 - 7	7 - 15	15 - 30 mm
	33,2	16,9	23,1	26,8 Gew. %

Die Frischbetonrohddichte wurde ermittelt

am 21.9.1962 mit 2397 kg/m<sup>3</sup> und  
am 24.9.1962 mit 2400 kg/m<sup>3</sup>.

Als Ausbreitmaße ergaben sich

am 21.9.1962 i. M. 32,8 cm und  
am 24.9.1962 i. M. 33,5 cm.

##### 4.263 Betonverarbeitung

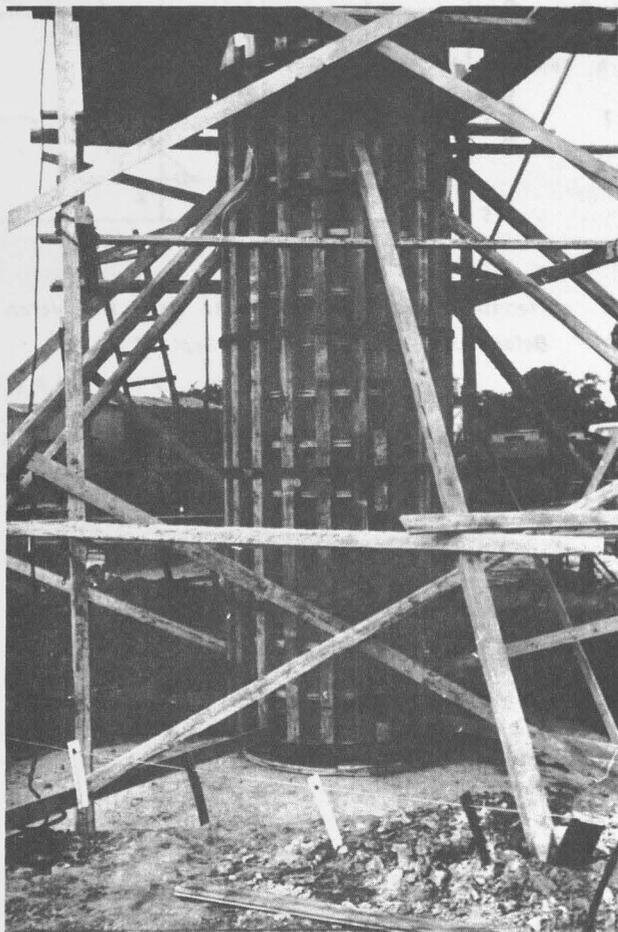
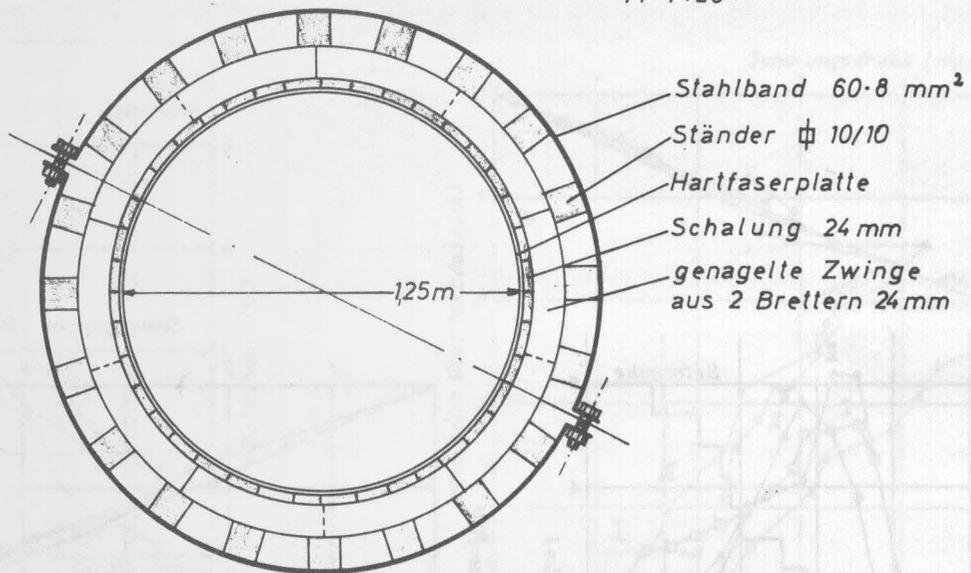
In einem 500 l-Zwangsmischer wurde der Frischbeton hergestellt und mit einem Turmdrehkran in Kübeln an die Arbeitsbühne befördert. Über ein Hosenrohr gelangte er an die Einbaustelle. Jeder Kübel ergab eine Füllstufe von rd. 0,30 m. Nach dem Einbringen von zwei bzw. drei Schichten erfolgte die Verdichtung mit einem Innenrüttler (3000 U/min) durch etwa 1,0 m tiefes Eintauchen der Rüttelflasche. Die Betonierzeit betrug jeweils etwa eine Stunde.

##### 4.264 Meßverfahren

Die Meßdosen konnten nur in dem Bereich der Stütze eingebaut werden, der später angeschüttet werden sollte. Zu jeder Messung wurden zwei Plattendruckmeßdosen und die Membrandruckmeßdose (BW) verwendet. Ihre Höhenlagen sind bei den Meßergebnissen angegeben. - Die Füllhöhen wurden an den Säulenoberkanten mittels einer Meßlatte festgestellt.

Querschnitt

M 1:20



Schalgerüst vor  
Betonierbeginn

Bild 49 Schalung für eine Betonsäule

Verschiebungen wurden nicht ermittelt. Die Frischbetontemperatur ist jeweils einmal vor dem Betonierschluß mit einem Widerstandsthermometer gemessen worden.

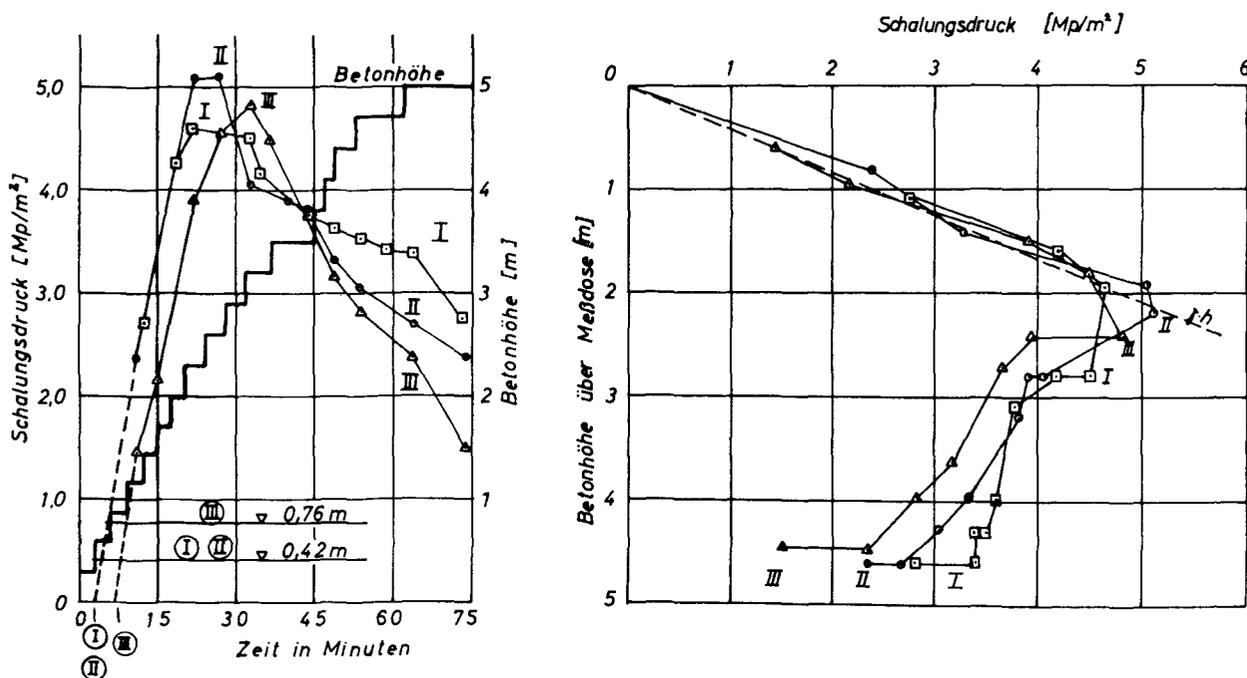


Bild 50 Messung des Schalungsdrucks beim Betonieren einer Betonsäule  $\phi$  1,25 m am 21. Sept. 1962

#### 4.265 Meßergebnisse am 21. Sept. 1962

In Bild 50 sind die Betonierstufen, Schalungsdrücke und hierzu gehörenden Betonhöhen über den Meßdosen aufgetragen.

Eine Plattendruckmeßdose sowie die Membrandruckmeßdose waren 0,42 m und die zweite Plattendruckmeßdose 0,76 m hoch über dem Fundament eingebaut. Aus meßtechnischen Gründen konnten nicht immer alle während der Verdichtungszeit an den Meßdosen auftretenden Schalungsdrücke gleichzeitig ermittelt werden. Sie folgten im wesentlichen der hydrostatischen Drucklinie bis zu Betonhöhen von etwa 1,60 m bis 2,0 m über den Meßstellen. Der größte Schalungsdruck ergab sich an der unteren Plattendruckmeßdose mit  $p_{\max} = 5,11 \text{ Mp/m}^2$  bei  $h = 2,18 \text{ m}$ , während an der in derselben Höhe angebrachten Membrandruckmeßdose fast gleichzeitig  $p = 4,62 \text{ Mp/m}^2$  ermittelt wurde. Dieser Wert liegt schon unterhalb der hydrostatischen Drucklinie. Daraus kann gefolgert werden, daß auf die beiden voneinander etwa 0,5 m entfernt eingebauten Geräte eine ungleichmäßige Rüttelverdichtung eingewirkt hat. Auch an der oberen Druckmeßdose stellte sich der dort aufgetretene Schalungsdruck mit  $p = 4,83 \text{ Mp/m}^2$  bei  $h = 2,44 \text{ m}$  unter der hydrostatischen Drucklinie ein. An allen Meßdosen zeigten sich bei zunehmender Füllhöhe der Säule Druckverminderungen, die bei den Plattendruckmeßdosen ausgeprägter als bei der Membrandruckmeßdose waren. So konnten bei der Verdichtung der letzten Schicht der 5,01 m hohen Stütze  $p = 2,68 \text{ Mp/m}^2$  bzw.  $p = 2,37 \text{ Mp/m}^2$  an der Platten- und  $p = 3,38 \text{ Mp/m}^2$  an der Membrandruckmeßdose festgestellt werden. Die Betoniergeschwindigkeit betrug i. M. 5,0 m/h und in einzelnen Stufenfolgen sogar bis zu 5,9 m/h. Die Betontemperatur war  $14,9^\circ \text{ C}$  bei einer Lufttemperatur von  $13,7^\circ \text{ C}$ .

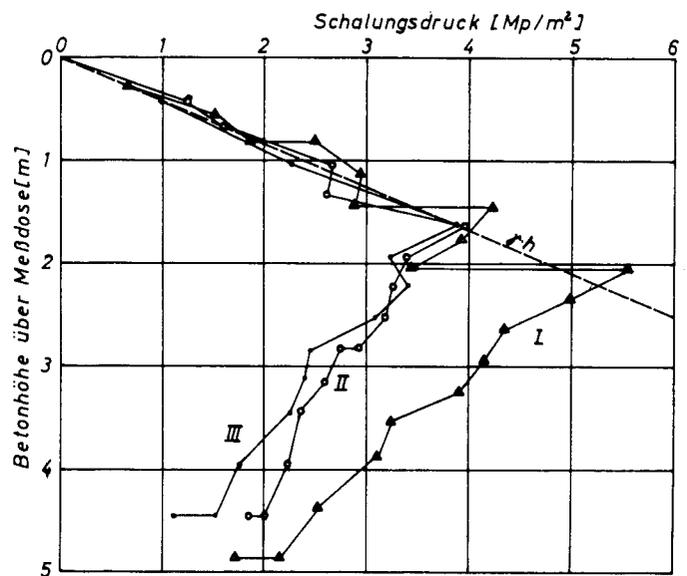
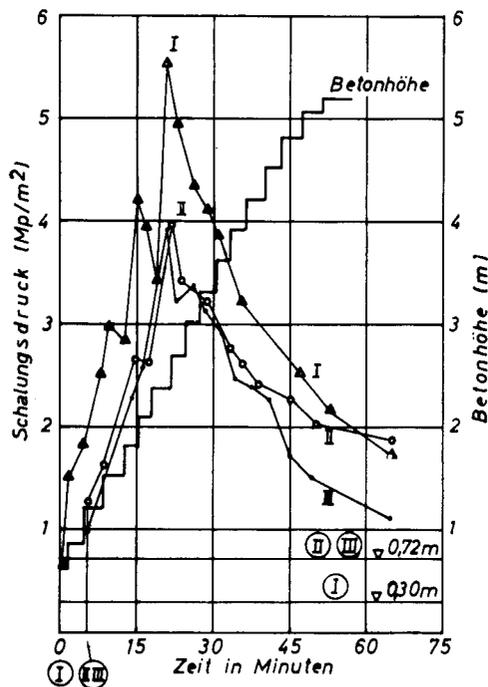


Bild 51 Messung des Schalungsdrucks beim Betonieren einer Betonsäule  $\varnothing$  1,25 m am 24. Sept. 1962

#### 4.266 Meßergebnisse am 24. Sept. 1962

Im Bild 51 sind die Betonhöhen und Schalungsdrücke aufgezeichnet worden.

Bei dieser Stütze waren eine Plattendruckmeßdose 0,30 m und eine weitere sowie die Membrandruckmeßdose 0,72 m hoch über dem Fundament in die Schalung eingesetzt. Es wurde während des Betonierens versucht, bei einzelnen Füllstufen den Schalungsdruck vor und beim Rütteln zu messen. Dadurch gelang es, den hier wiederum an der unteren Meßstelle aufgetretenen größten Schalungsdruck von  $p = 3,41 \text{ Mp/m}^2$  ansteigend bis zu  $p_{\text{max}} = 5,54 \text{ Mp/m}^2$  bei einer Betonhöhe  $h = 2,05 \text{ m}$  zu verfolgen. Die hydrostatische Drucklinie wurde mit den an dieser Meßdose gemessenen Werten mehrfach überschritten, während die an den beiden anderen Meßdosen ermittelten Drücke bis zu den Maximalwerten mit dieser Linie gut übereinstimmten. An den beiden oberen Meßdosen ergaben sich bei  $h = 1,63 \text{ m}$  mit  $p = 3,92 \text{ Mp/m}^2$  (Plattendr.-Meßd.) und  $p = 3,96 \text{ Mp/m}^2$  (Membr.-Meßd.) weitgehend übereinstimmende Größtwerte. Aus der Darstellung der Meßergebnisse ist zu erkennen, daß der größte Schalungsdruck an allen drei Druckmeßdosen bei derselben Füllhöhe entstanden ist. Außerdem zeigt sich, daß hier nach Einbringen jeder zweiten Betonlage gerüttelt worden ist. Der erhebliche Druckanstieg an der unteren Meßdose läßt sich damit erklären, daß bei der Verdichtung des bis zur Füllhöhe von 2,35 m eingebrachten Betons der Rüttler tiefer als bei den nachfolgenden Schichten, aber etwa ebenso tief wie beim Betonieren der unter Abschnitt 4,265 beschriebenen Stütze eingetaucht worden ist.

Die Betoniergeschwindigkeit betrug fast gleichmäßig 5,8 m/h.

Bei einer Lufttemperatur von  $15,4^\circ \text{ C}$  wurde die Betontemperatur mit  $15,8^\circ \text{ C}$  gemessen.

#### 4.27 Stahlbetonwände in einem Verwaltungsgebäude

Die Bauunternehmung W. Wallbrecht, Hannover, errichtete in Hannover ein mehrstöckiges Verwaltungsgebäude, das durch mehrere 0,24 m dicke Stahlbetonwände ausgesteift war.

Gleichzeitig mit den Geschoßdecken wurden die 3,14 m hohen Wände betoniert. Schalungsdruckmessungen wurden am 28.9.1962 und 16.10.1962 vorgenommen.

#### 4.271 Schalung

Für die mit Baustahlgewebematten bewehrten Wände bestand die Schalung aus waagrecht verlegten hölzernen Schaltafeln (22 mm dick, 50 cm breit, 150 cm lang) und dazwischen angeordneten 10 cm breiten Schalbrettern. Sie stützte sich auf Ständer und Streich-Hölzer  $\square$  10/10 mit Zulagebrettern ab. Die Abstände betragen zwischen den Ständern 0,75 m und zwischen den Streich-Hölzern 0,60 m. Gegen Stahlbügel als Abstandhalter war die Schalung mit Spanndrähten  $\varnothing$  6 mm verspannt, die in Abständen von 0,50 m eingezogen waren. Die Schalung war an beiden Seiten gegen Verschieben durch Streben gesichert.

#### 4.272 Baustoffe

Für 1 m<sup>3</sup> Frischbeton waren folgende Bestandteile vorgesehen:

- 300 kg Portlandzement Z 275  
(Hannoversche Silozement G.m.b.H.)
- 1970 kg Kiessand
- 130 kg Leitungswasser
- 0,5 kg Actival-Grünau (BV)

An dem Zement wurden nach DIN 1164

- der Erstarrungsbeginn nach 2 Std. 59 Min.
- das Erstarrungsende nach 3 Std. 39 Min.
- und die Mahlfeinheit mit 2,0 % Siebrückstand

festgestellt.

Als Zuschlagsstoff wurde Grubenkies in zwei Körnungen, unter 7 mm und über 7 mm, angeliefert und beim Mischen in etwa gleichen Raumteilen ohne Gewichtskontrolle zugegeben.

Die Frischbetonrohddichten wurden

- am 28. 9.1962 mit i.M. 2392 kg/m<sup>3</sup> und
- am 16. 10.1962 mit i.M. 2380 kg/m<sup>3</sup>

und die Ausbreitmaße am 28.9.1962 mit i.M. 35,7 cm und am 16.10.1962 mit i.M. 37,3 cm ermittelt.

#### 4.273 Betonverarbeitung

Der Beton wurde in einem 600 l-Zwangsmischer hergestellt, in Kübel gefüllt und mit einem Turmdrehkran bis in die Höhe der zu betonierenden Geschoßdecke über die Einbaustelle befördert. Die Kübel wurden z.T. über den Schalwänden oder über der Deckenschalung entleert, so daß der Beton in die Schalung fiel bzw. mit Schaufeln eingebracht wurde. Dadurch ergaben sich für die gesamte Wandhöhe zwei oder andernfalls mehrere Füllstufen. Der Frischbeton ist mit Innenrüttlern verdichtet worden, wobei die in der Schalung z.T. vorhandenen Betonkegel ausgeglichen wurden. Die Rütteltiefen reichten in der ersten Lage bis kurz über den Fuß der Wand und nach dem Betonieren der folgenden Schicht bis in die vorher verdichtete hinein (1,50 bis 2,0 m).

Die Betonierzeit betrug bei jeder Wand etwa 50 Minuten. Dabei wurde in der am 28.9.1963 errichteten Wand nach Einfüllen und Verdichten der ersten Schicht erst 30 Min. später die zweite bis zur vollen Wandhöhe reichende Lage eingebracht. Am 16.10.1962 ist die Wand in 4 Abschnitten gefüllt worden, wobei der Beton in der Schalung fast gleichmäßig anstieg.

#### 4.274 Meßverfahren

In zwei von der bauausführenden Firma überlassene Schalplatten wurden für die Meßdosen Aussparungen geschnitten und Schrauben zur Befestigung der Geräte eingesetzt. Damit waren die Meßdosen an der Baustelle einfach gegen eingepaßte Abstandhalter zu setzen und mit Muttern zu verschrauben. Die eine Schalplatte war für den Einbau einer Plattendruckmeßdose und der Membrandruckmeßdose in gleicher Höhe mit 0,75 m Abstand, die zweite nur für eine Plattendruckmeßdose eingerichtet. - Die Höhenlagen der Meßgeräte sind in den folgenden Abschnitten angegeben. - Mit Widerstandsthermometern wurden die Luft- und Betontemperaturen gemessen.

#### 4.275 Meßergebnisse am 28.Sept.1962

Aus den in Bild 52 aufgezeichneten Werten ist zu erkennen, daß die Wand in zwei Abschnitten betoniert worden ist.

Eine Meßdose war in Höhe von 0,42 m, die zwei anderen waren in Höhe von 1,04 m über dem Fußpunkt der Wand angebracht.

Infolge von Meßstörungen an einer der oberen Meßdosen konnten nur zwei Meßreihen aufgenommen werden.

An beiden Meßstellen traten die größten Schalungsdrücke bei einer Füllhöhe von 2,30 m auf. An der unteren ergab sich bei der Betonhöhe  $h = 1,88$  m mit  $p = 2,50$  Mp/m<sup>2</sup> ein kleinerer Wert als an der oberen, wo bei  $h = 1,26$  m  $p_{\max} = 2,81$  Mp/m<sup>2</sup> ermittelt wurde. Die Verdichtung der zweiten Betonschicht, die bis zur Höhe von 3,14 m eingebracht worden ist, bewirkte an der oberen Meßdose ein Wiederansteigen des zwischenzeitlich gesunkenen

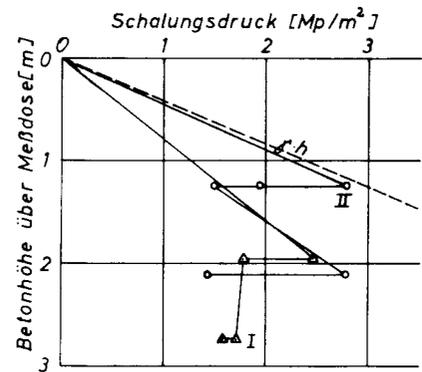
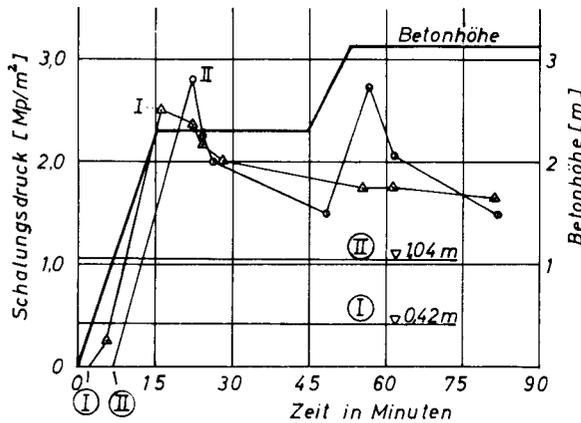


Bild 52 Messung des Schalungsdrucks beim Betonieren einer 24 cm dicken Wand am 28. Sept. 1962

Schalungsdrucks bis auf  $p = 2,78 \text{ Mp/m}^2$  bei  $h = 2,10 \text{ m}$ . An der unteren Meßstelle zeigte sich dagegen keine Druckänderung.

Aus einer Fülldauer von 15 Min. für die erste Schicht bis 2,30 m Höhe ergab sich eine Betoniergeschwindigkeit von 9,2 m/h und für die zweite bis 3,14 m reichende Schicht, die in 7 Minuten eingebracht wurde, eine Betoniergeschwindigkeit von 7,2 m/h.

Aus den Meßergebnissen kann geschlossen werden, daß der Beton in der Nähe der unteren Meßstelle nur wenig verdichtet worden ist. An der oberen Meßstelle entsprach der Schalungsdruck im ersten Füllabschnitt fast dem hydrostatischen Druck. Er fiel aber während der eingelegten Betonierpause ab und erreichte bei dem weiteren Ansteigen des Betons fast genau den vorher gemessenen Größtwert. – Nach den Beobachtungen wurde der Rüttler etwa 1,50 m tief, d.h. bis 0,5 m über die Meßstelle, eingetaucht.

Bei einer Außentemperatur von  $12,9^\circ \text{ C}$  betrug die Betontemperatur  $15,2^\circ \text{ C}$ .

#### 4.276 Meßergebnisse am 16. Okt. 1962

Die Betonhöhen und Schalungsdrücke sind in Bild 53 wiedergegeben worden.

In 0,43 m Höhe waren eine Platten- und die Membrandruckmeßdose, die zweite Plattendruckmeßdose in 1,04 m Höhe angebracht. Die Wand ist fast gleichmäßig aufbetoniert worden, wobei der Beton bei Füllhöhen von 1,60 m, 2,10 m, 2,50 m und 3,14 m verdichtet wurde.

Die größten Schalungsdrücke konnten gemessen werden, als die Füllhöhen von 2,10 bzw. 2,50 m erreicht waren. So ergaben sich an der Membrandruckmeßdose bei einer Betonhöhe  $h = 1,66 \text{ m}$  mit  $p_{\text{max}} = 3,99 \text{ Mp/m}^2$  und an den Plattendruckmeßdosen bei  $h = 1,43 \text{ m}$  mit  $p = 3,46 \text{ Mp/m}^2$  bzw. bei  $h = 2,07 \text{ m}$  mit  $p = 3,72 \text{ Mp/m}^2$  die größten Drücke. Die untere Plattendruckmeßdose stand bei einer Betonüberdeckung von 1,66 m, als die Membrandruckmeßdose den Größtwert anzeigte, unter einem Druck von  $3,48 \text{ Mp/m}^2$ . Daraus ist zu schließen, daß die Verdichtung an den 0,75 m entfernten Meßstellen nicht gleichmäßig erfolgte. Dennoch konnte eine befriedigende Übereinstimmung der Meßwerte festgestellt werden.

Die 3,14 m hohe Wand ist in 48 Min. betoniert worden. Das entspricht einer mittleren Betoniergeschwindigkeit von 3,9 m/h. Die Füllhöhe von 2,10 m wurde mit einer Betoniergeschwindigkeit von 4,2 m/h erreicht.

Die Betontemperatur wurde mit  $13,5^\circ \text{ C}$  und die Lufttemperatur mit  $10,1^\circ \text{ C}$  ermittelt.

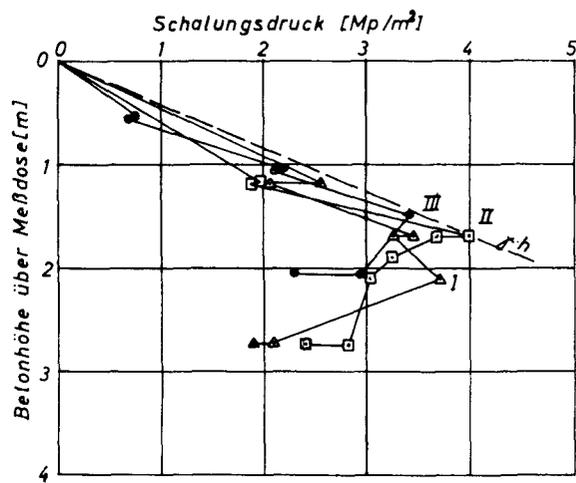
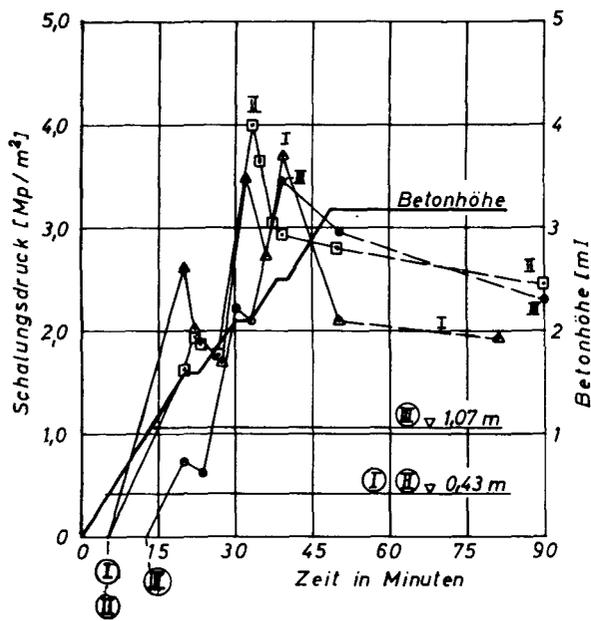


Bild 53 Messung des Schalungsdrucks beim Betonieren einer 24 cm dicken Wand am 16. Okt. 1962

#### 4.28 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der folgenden Zahlentafel sind für die einzelnen Bauteile und jede Meßstelle angegeben:

- $p_{max}$  = größter Schalungsdruck
- $h$  = Betonhöhe über der Meßstelle bei  $p_{max}$
- $t_h$  = Betonierzeit bis zum Auftreten von  $p_{max}$
- $v$  = Betoniergeschwindigkeit z. Zt. des Auftretens von  $p_{max}$
- $d$  = Dicke der vor Erreichen von  $p_{max}$  betonierten Schicht
- $r$  = Rütteltiefe während des Verdichtens von  $d$
- $T_a$  = Lufttemperatur
- $T_b$  = Frischbetontemperatur

Zahlentafel

Datum	Bauteil	$P_{\max}$	h	$t_h$	v	d	r	$T_a$	$T_b$
		$\text{Mp/m}^2$	m	Std.	m/h	m	m	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
11. 5.62	Mittel- pfeiler	2,63	2,03	$0\frac{55}{0}$	2,20	?	0,90	13,3	13,7
		3,49	1,94	$0\frac{35}{0}$	2,60	0,58	0,90	13,4	14,0
		1,84	1,74	$0\frac{30}{0}$	2,60	0,58	0,90	13,4	14,0
16. - 17. 5.62	Wider- lager	1,23	0,79	$3\frac{10}{0}$	0,21	0,65	0,90	10,2	10,8
		1,67	0,71	$2\frac{50}{0}$	0,19	0,55	0,80	8,8	10,8
		1,64	0,96	$4\frac{05}{0}$	0,18	0,76	1,00	7,5	13,7
		1,38	0,96	$4\frac{05}{0}$	0,18	0,76	1,00	7,5	13,7
29. 5.62	Wider- lager	1,44	0,95	$2\frac{10}{0}$	0,38	0,52	0,70	8,5	11,8
		2,04	1,28	$3\frac{25}{0}$	0,34	0,62	0,90	13,0	13,8
27. 6.62	Wider- lager	2,19	0,85	$1\frac{00}{0}$	0,55	0,55	1,00	9,8	17,7
		2,72	1,65	$2\frac{30}{0}$	0,50	0,90	1,00	12,8	18,0
		2,64	1,00	$1\frac{00}{0}$	0,90	0,90	1,00	13,1	18,1
18.12.62	Wider- lager	3,15	1,31	$1\frac{39}{0}$	1,45	0,60	0,80	1,6	6,5
		2,89	1,45	$2\frac{05}{0}$	2,45	0,60	0,80	0	5,5
		2,94	1,96	$2\frac{05}{0}$	1,45	0,60	0,80	1,6	6,5
		2,22	1,09	$1\frac{18}{0}$	1,45	0,60	0,80	0,8	5,8
21. 9.62	Stütze	5,11	2,18	$0\frac{23}{0}$	5,0	0,60	0,90	13,7	14,9
		4,83	2,44	$0\frac{26}{0}$	5,0	0,60	0,90		
		4,62	1,88	$0\frac{17}{0}$	5,0	0,60	0,90		
24. 9.62	Stütze	3,92	1,65	$0\frac{22}{0}$	5,8	0,60	0,90	15,2	15,8
		3,96	1,65	$0\frac{22}{0}$	5,8	0,60	0,90		
		5,54	2,05	$0\frac{22}{0}$	5,8	0,60	0,90		
28. 9.62	Wand	2,50	1,88	$0\frac{13}{0}$	9,2	2,30	1,5	12,9	15,2
		2,81	1,26	$0\frac{09}{0}$	9,2	2,30	2,0		
16.10.62	Wand	3,99	1,66	$0\frac{26}{0}$	4,2	0,50	1,5	10,1	13,5
		3,46	1,43	$0\frac{26}{0}$	4,2	0,40	1,5		
		3,72	2,07	$0\frac{32}{0}$	4,2	0,40	1,5		

## 5. Auswertung

### 5.1 Allgemeines

Die Schalungsdruckmessungen wurden auf mehreren Baustellen vorgenommen, bei denen ähnliche und z.T. übereinstimmende Verhältnisse im Schalungsbau, in der Betonzusammensetzung und -verarbeitung angetroffen worden sind.

Die Schalgerüste waren auf allen Baustellen aus Kanthölzern errichtet, während als Schalhaut gehobelte oder ungehobelte Bretter, Holzschalplatten und bei den Brückenstützen Hartfaserplatten verwendet worden sind.

Der Frischbeton enthielt einheitlich  $300 \text{ kg/m}^3$  Portlandzement, der stets als PZ 275 angeliefert worden ist. Die Frischbetondichten wurden zwischen  $2380 \text{ kg/m}^3$  und  $2405 \text{ kg/m}^3$  ermittelt. Die Betonkonsistenz konnte überall in den Bereich "steif bis weich" eingeordnet werden, wie aus den Ausbreitmaßen von 32,8 bis 37,8 cm zu erkennen ist; lediglich in einem Fall wurden i. M. 43,0 cm gemessen.

Die Wasserzementwerte schwankten zwischen  $W/Z = 0,43$  und  $W/Z = 0,52$ .

Die Mischungsverhältnisse

Zement: Zuschlagstoffe waren zwischen 1 : 6,5 bis 1 : 6,6 Gtln. fast einheitlich. Als Zuschlagstoffe sind natürliche Kiessande verwendet worden.

Der Frischbeton wurde überall mit Innenrüttlern verdichtet.

Von der Vielzahl der in der Einleitung genannten Einflüsse auf den Schalungsdruck können nur einige bei der Auswertung der gefundenen Meßergebnisse erörtert werden. Da aber bei vielen Ingenieurbauten ähnliche konstruktive und betontechnische Verhältnisse wie bei den im Abschnitt 4 beschriebenen angetroffen werden können, dürfen dort auch ähnliche Schalungsdrücke erwartet werden.

### 5.2 Die Größtwerte des Schalungsdrucks

In den Bildern 44 bis 53 sind die an den einzelnen Bauwerken gemessenen Schalungsdrücke aufgetragen worden. Die Meßstellen waren meistens übereinander in verschiedenen Höhen angeordnet.

Die Schwankungen der Schalungsdrücke an einzelnen Bauwerken können mehrere Ursachen haben. Beispielsweise zeigte sich an einigen Meßdosen, die vor einer Arbeitspause nur bis zu etwa einer halben Schichtdicke von Frischbeton überdeckt worden sind, bei Wiederbeginn der Arbeiten unter der Rüttelwirkung ein Druckanstieg wie bei einem gleichmäßigen Betonierfortschritt. Bei den tiefer gelegenen Meßdosen war dagegen nur noch ein geringes Ansteigen oder auch Abfallen des Schalungsdrucks zu beobachten (Bild 44, S. 53, Bild 48, S. 59). Außerdem verformten sich die Schalgerüste, wenn die als Abstandhalter eingebauten Spreizen entfernt worden sind. Schließlich konnten die Ablesungen nicht immer gleichzeitig an allen Meßdosen erfolgen, weil anfangs keine mehrfach umschaltbare Meßbrücke zur Verfügung stand.

In Bild 54 sind die größten an jeder Meßstelle beobachteten Schalungsdrücke und die zugehörigen Betonhöhen eingetragen worden. Die Größtwerte wurden bei Betonhöhen zwischen 0,71 m und 2,44 m festgestellt. Die in Anlage 2 nach Lindner (48) bzw. Plath (49) durchgeführte statistische Auswertung ergibt eine Korrelation zwischen den Schalungsdrücken  $p_{\max}$  und den Betonhöhen  $h$  über den Meßstellen. Die Regressionsgleichungen für die Veränderlichen lauten innerhalb der Grenzen der Meßergebnisse für

$$\begin{aligned} p &= x \quad \text{und} \quad h = y \\ \xi &= 1,984 \cdot y - 0,016 \\ \eta &= 0,3306 \cdot x + 0,525. \end{aligned}$$

Die zugehörigen Regressionsgeraden sind in Bild 54 (S. 69) eingezeichnet worden. Das Bestimmtheitsmaß beträgt  $B = 0,656$  und der Korrelationskoeffizient  $r = \sqrt{B} = 0,81$ . Der Existenztest zeigt eine in den Schranken von 99,9 % gesicherte Regression.

Bei einem Vergleich mit den in Bild 12 (S. 18) angegebenen Berechnungsvorschlägen von Rodin und des Departements of Main Roads (DMR) mit den in Bild 54 aufgetragenen Meßergebnissen ist folgendes zu erkennen: Die größten Schalungsdrücke liegen in dem Raum zwischen den hydrostatischen Drucklinien für  $s = 2,4 \text{ h}$  und  $s = 1,78 \text{ h}$ . Sie kommen aber nur bis zu Betoniergeschwindigkeiten von 1,45 m/h den von Rodin für ungerüttelten Beton vorgeschlagenen Werten nahe (s. auch Bild 55). Die DMR-Diagrammwerte ergeben z.B. bei einer Betontiefe von 1,75 m den Schalungsdruck  $4,2 \text{ Mp/m}^2$ . Jedoch genügt nach dem DMR-Diagramm hierfür schon eine Betoniergeschwindigkeit von 0,9 m/h. Während dieser Schalungsdruck und die Betontiefe auch zu den in Bild 54 eingetragenen Meßwerten gehören könnten, ist nach den auf die Betoniergeschwindigkeit bezogenen Meßergebnissen (Bild 55) nur ein um mehr als ein Drittel geringerer Schalungsdruck zu erwarten. Die nach dem "DMR-Diagramm" aus der Betoniergeschwindigkeit abgeleiteten Schalungsdrücke sind somit zu groß.

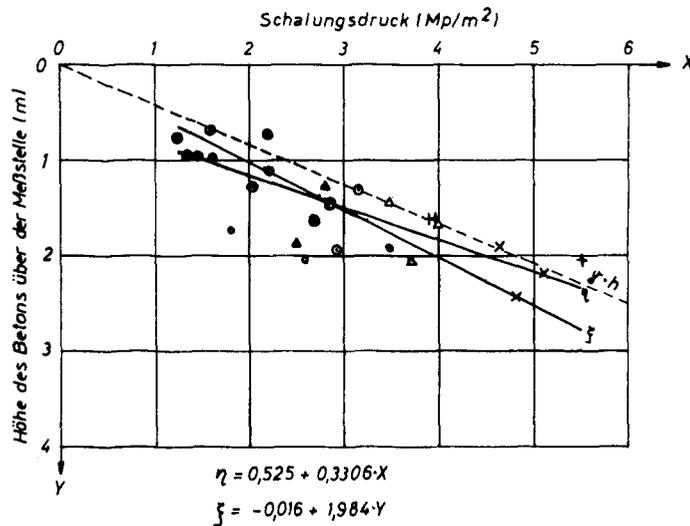


Bild 54 Regressionsgeraden für die Abhängigkeit zwischen dem Schalungsdruck ( $p_{max}$ ) und der Betonhöhe über der Meßstelle ( $h$ )

Bauteil	Zeichen	Betoniergeschwindigkeit $v$ (m/h)	Betontemperatur (°C)
Widerlager	○	2,2 – 2,6	13,3 – 13,4
	●	0,55 – 0,90	17,7 – 18,1
	⊙	1,45 – 2,45	5,5 – 6,5
	⊚	0,18 – 0,21	10,8 – 13,7
	⊛	0,34 – 0,38	11,8 – 13,8
Säulen	×	5,0	14,9
	+	5,8	15,8
Wände	△	4,2	13,5
	▲	9,2	15,2

Die Betoniergeschwindigkeit wird in den meisten Veröffentlichungen als der für die Berechnung des Schalungsdrucks wichtigste Faktor angeführt. Es ist jedoch zu beachten, daß die aus dem Quotienten Bauteilhöhe: Betonierdauer ermittelte Betoniergeschwindigkeit nur dann richtig sein kann, solange möglichst gleiche Schichtdicken, eine pausenlose Betonierfolge und nur eine bestimmte Richtung im Arbeitsablauf eingehalten werden. Wenn der Beton gepumpt wird, kann die Arbeitsrichtung an jedem Ende des Bauteils wechseln. Dies ist der Fall, wenn die Pumpenleitung durch An- bzw. Abschlagen einzelner Teilstücke verlängert bzw. verkürzt wird. Dann müssen an beiden Enden des Bauwerks zwei Lagen Frischbeton unmittelbar aufeinander eingebracht und einzeln oder in doppelter Schichtdicke durch Rütteln verdichtet werden. Der größte Schalungsdruck muß deshalb an den Bauteilenden erwartet werden. Er sollte mit der Betoniergeschwindigkeit errechnet werden, die sich aus der Höhe der beiden Schichten und der für ihren Einbau notwendigen Zeit ergibt und nicht kleiner sein als der hydrostatische Druck aus beiden Betonschichten.

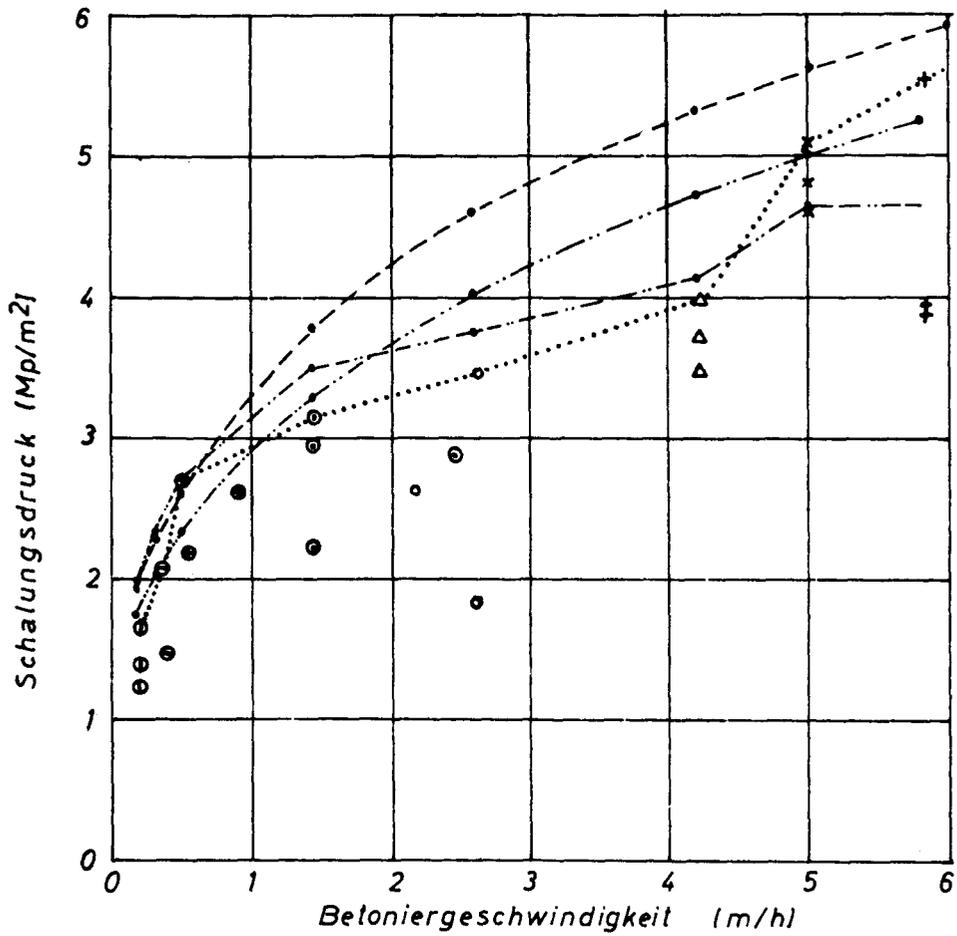


Bild 55 Vergleich der gemessenen Schalungsdrücke mit Berechnungsvorschlägen

- ..... Meßwerte (Bezeichnung s. Bild 54)
- Rechenwerte nach Macklin
- · - · - " " Rodin
- " " Guerrin

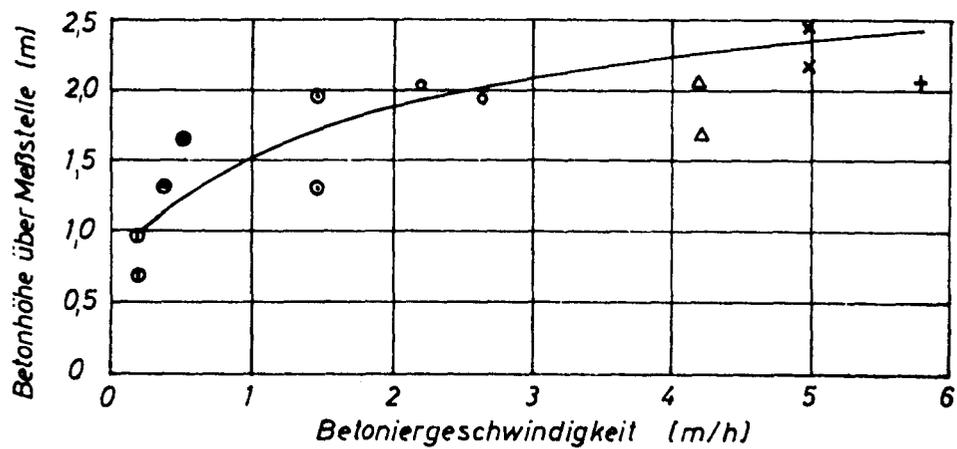


Bild 56 Bei größtem Schalungsdruck gemessene Betonhöhen über den Meßstellen mit der Regressionsgleichung  $h = 1,53 \cdot v^{0,2457}$  (Bezeichnung s. Bild 54)

In Abschnitt 4 ist als Betoniergeschwindigkeit der Wert angegeben worden, der sich aus der zum größten Schalungsdruck gehörenden Schichtdicke und der seit dem Einbau der vorletzten Schicht vergangenen Zeit ergeben hat.

In Bild 55 sind die an jeder Meßstelle gefundenen größten Schalungsdrücke über den Betoniergeschwindigkeiten eingetragen und die Höchstwerte durch einen Linienzug verbunden worden. Der Einfluß der Betoniergeschwindigkeit auf den Schalungsdruck zeigt sich am stärksten im Bereich der kleinen und der Betoniergeschwindigkeiten über 4,2 m/h. Die auf die Differenz von  $v$  bezogenen Druckänderungen  $\Delta p / \Delta v$ , die Steigungen des Linienzuges, sind für  $0,2 < v < 0,5$  m/h mit 2,10 und für  $4,2 < v < 5,0$  m/h mit 1,40 wesentlich größer als in den Zwischenbereichen, wo sich für  $0,5 < v < 1,45$  m/h nur  $\Delta p / \Delta v = 0,45$  und für  $1,45 < v < 4,2$  m/h  $\Delta p / \Delta v = 0,31$  ergeben haben. - Es wurden mehrere Versuche unternommen, um die in Bild 55 wiedergegebenen Meßergebnisse statistisch auszuwerten. Mit  $x = v$  und  $y = p$  ergab sich bei Berücksichtigung aller Werte durch nichtlineare Regression die statistisch nicht eindeutig gesicherte Gleichung für die Variable  $y = p$  mit  $\eta = 1,565 + 0,524x + 0,0007x^2$ , die in Bild 57 eingetragen ist. Die in die Anlage nicht aufgenommene Berechnung ergab ein Bestimmtheitsmaß  $B = 0,80$  und den Korrelationskoeffizienten  $r = 0,895$ , jedoch eine statistische Prüfgröße  $F$  innerhalb der Schranken  $F$  bei 95 %, nicht aber bei 99 % Sicherheit. - Der Versuch einer Korrelation der Werte für Betoniergeschwindigkeiten zwischen 0,18 und 0,90 m/h blieb statistisch ungesichert, weil die Zahl der Versuchswerte nicht ausreichte. Die Regressionsgeraden hatten die Gleichungen:  $\eta = 1,328 + 1,301x$  und  $\xi = 0,088 + 0,253y$ . Dagegen ergab sich für die Schalungsdrücke zwischen  $v = 0,9$  und 5,8 m/h eine in den Schranken für 99,9 % statistische Sicherheit liegende Regressionsgleichung

$$\eta = 2,061 + 0,455x$$

$$\xi = 2,101 + 1,542y$$

Das Bestimmtheitsmaß betrug  $B = 0,701$  und der Korrelationskoeffizient  $r = 0,837$ . Die vorstehenden Regressionsgleichungen für  $\eta$  geben an, welcher Mittelwert des Schalungsdrucks  $p$  bei der Betoniergeschwindigkeit  $v$  erwartet werden kann.

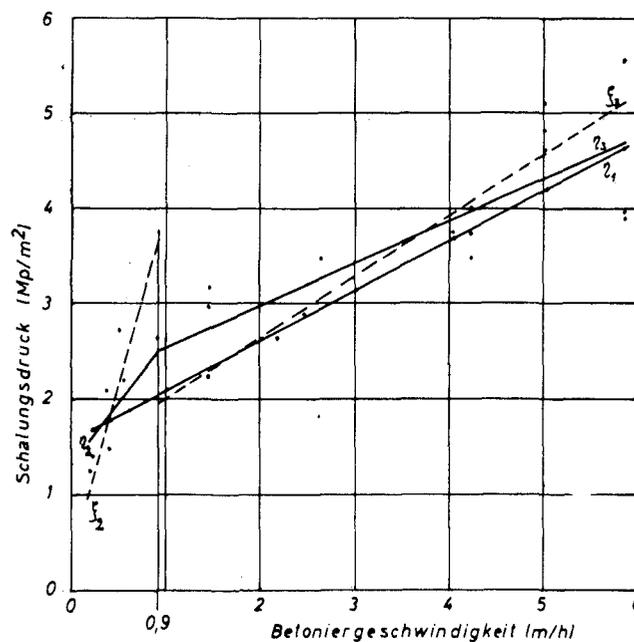


Bild 57 Ergebnisse der Korrelationsrechnung für die Variablen: Schalungsdruck  $p=y$   
Betoniergeschwindigkeit  $v=x$

1.)  $\eta_1 = 1,565 + 0,524x + 0,0007x^2$

2.)  $\eta_2 = 1,328 + 1,301x$   
 $\xi_2 = -0,088 + 0,253y$

3.)  $\eta_3 = 2,061 + 0,455x$   
 $\xi_3 = -2,101 + 1,542y$

Deshalb wurde versucht, für die bei den Messungen gefundenen größten Schalungsdrücke eine Bestimmungsgleichung zu finden. Nach der in Anlage 2.2 ausgeführten Regressionsrechnung mit logarithmischer Substitution lautet sie

$$p = 2,754 v^{0,3054}$$

mit dem Bestimmtheitsmaß  $B = 0,903$ , dem Korrelationskoeffizienten  $r = 0,95$  und der Prüfgröße  $F$  innerhalb der Schranken für 99,9 % Sicherheit. Sie ist in Bild 58 mit den Vertrauensgrenzen, die mit 195 % ermittelt worden sind, aufgetragen. In der Schreibweise  $p = 2,754 \cdot 3,275 \sqrt{v}$  ist sie der von Rodin (Abs. 2.16) angegebenen Gleichung für den Schalungsdruck von gestochertem Beton  $p = 2,92 \sqrt[3]{v}$  ähnlich, ergibt aber noch kleinere Schalungsdrücke. - Die bei den größten Schalungsdrücken über den Meßstellen beobachteten Betonhöhen sind in Bild 56 über den zugehörigen Betoniergeschwindigkeiten eingetragen worden. (Wenn der größte Schalungsdruck und die größte Betonhöhe nicht bei der gleichen Meßstelle zusammengetroffen sind, wurde die über einer benachbarten Meßstelle ermittelte größte Betonhöhe zusätzlich angegeben).

Im Bereich der niedrigen Betoniergeschwindigkeiten ist ein schnelles Ansteigen der Werte zu erkennen. Bei höheren Betoniergeschwindigkeiten ( $v \cong 1,45 \text{ m/h}$ ) traten die größten Schalungsdrücke bei Betonhöhen zwischen 2,0 und 2,5 m ein. Die statistische Auswertung (Anlage 2,3) ergab, daß die Zusammenhänge zwischen den Betoniergeschwindigkeiten und den bei  $p_{\max}$  vorhandenen Betonhöhen  $h$  durch die Gleichung

$$h = 1,53 v^{0,2657} = 1,53 \frac{3,764}{\sqrt{v}}$$

angegeben werden können. Das Ergebnis ist jedoch statistisch nicht gesichert. Wenn der vorstehende Ausdruck für  $h$  in die aus der Korrelationsrechnung  $p \rightarrow h$  gefundene lineare Regressionsgleichung

$$p = 1,984 h - 0,016$$

eingesetzt wird, lautet diese

$$p = 3,035 v^{0,2567} - 0,016$$

Die zugehörige Kurve ist in Bild 58 strichpunktiert eingezeichnet und weicht von der nach der Regressionsgleichung  $p = 2,754 v^{0,3054}$  aufgetragenen nur um + 0,28 bis 0,12  $\text{Mp/m}^2$  ab.

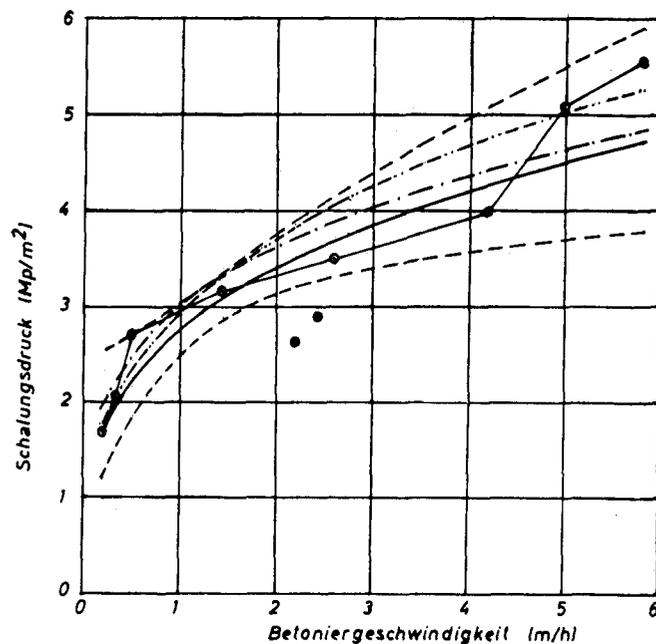


Bild 58    Regressionslinie für die größten gemessenen Schalungsdrücke ( $\circ$ )  
 $p = 2,754 \cdot v^{0,3054}$  (—) mit den Vertrauensgrenzen für 195% (---) verglichen mit der Gleichung  $p = 3,035 \cdot v^{0,2567} - 0,016$  (-·-·-) und dem Vorschlag von Rodin  $p = 2,92 \sqrt[3]{v}$  (····)

Dies kann damit erklärt werden, daß bei den statistischen Auswertungen für die lineare Regression  $p \rightarrow h$  alle, für die anderen jedoch nur die größten Werte verwendet worden sind. Die Abweichungen sind aber geringer als die an den einzelnen Bauwerken jeweils beobachteten Druckunterschiede.

In vielen Veröffentlichungen ist vorausgesetzt worden, daß der Schalungsdruck während der Erstarrenszeit des Frischbetons anwächst und an ihrem nicht eindeutig bestimmbar Ende seinen Größtwert erreicht. Je nach der vorhandenen Beton- oder Außentemperatur sowie nach dem Erstarrungsbeginn bzw. -ende des verwendeten Zements werden hierfür Zeiten zwischen 2 und 12 Stunden, im Mittel 8 Stunden, angenommen. Aus den von I<sup>H</sup> e r m i t e (Abschnitt 3.11, S. 36) mitgeteilten Versuchsergebnissen ist zu folgern, daß Beton z.B. mit  $w/z = 0,55$  nach dem Rütteln soweit verfestigt ist, um verformungsfrei, d.h. ohne einen seitlichen Gegendruck zu erzeugen, eine Betonsäule von rd. 3,5 m Höhe zu tragen. Im Baubetrieb treffen diese Verhältnisse jedoch nicht zu, weil die Rüttelverdichtung der einzelnen Schichten die innere Reibung des Betons in den tieferen Lagen vorübergehend wieder vermindert. Nach einer oder zwei Wiederholungen dieses Vorganges nehmen diese festigkeitsmindernden Einflüsse mit steigender Betonhöhe ab. Mit wachsendem Druck auf eine Betonschicht steigen ihre Schubfestigkeit und Viskosität schnell an. Ebenso geht aus den in Abschnitt 3.2, S. 45, und Anlage 1 beschriebenen Versuchen über die Verfestigung von Frischbeton hervor, daß der Verformungswiderstand der Masse bei geringen Wasseranteilen (z.B.  $164 \text{ kg/m}^3$ ) im Zustande der Ruhe in wenigen Stunden um ein Vielfaches des Anfangswertes ansteigt. Hier hat die Temperatur des Betons einen Einfluß auf den Erstarrungsfortschritt gehabt. Die Festigkeitsentwicklung kann auf die in Abschnitt 3.16, S.43, beschriebenen physikalischen und chemischen Vorgänge in einem erhärtenden Zement-Wasser-Gemisch und Zementmörtel, wie Volumenkontraktion, Kapillarität und Vacuumbildung, zurückgeführt werden.

Daß die Erstarrungszeit des Betons nicht den vermuteten Einfluß auf die Größe des Schalungsdrucks hat, ist aus den Bildern 59 und 60 zu erkennen. Dort sind jeweils in Abhängigkeit von der Betonierdauer bis zum Erreichen des größten Schalungsdrucks in Bild 59 die Größtwerte der Schalungsdrücke und in Bild 60 die dabei beobachteten Betoniergeschwindigkeiten eingezeichnet worden.

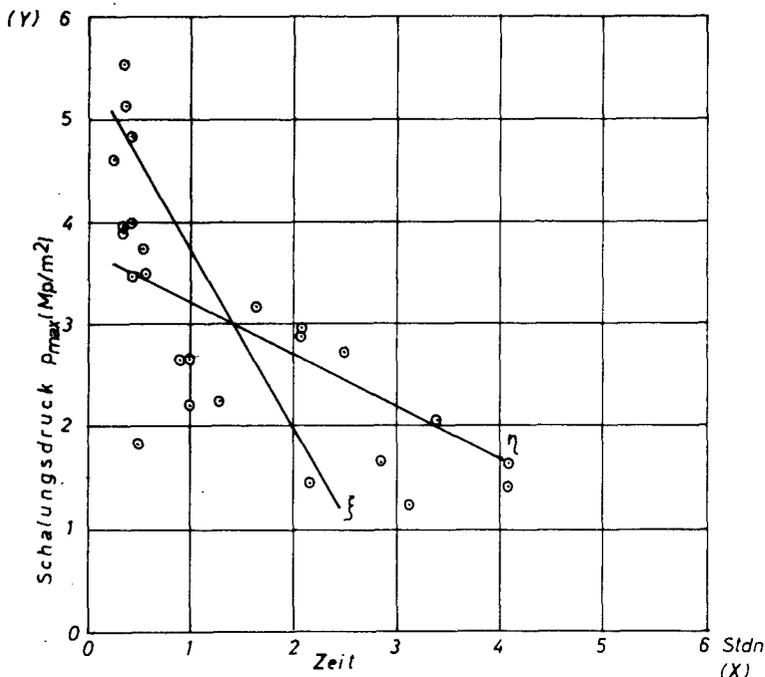


Bild 59 Regressionsgeraden für die Abhängigkeit zwischen größtem Schalungsdruck und der Betonierzeit über der Meßstelle

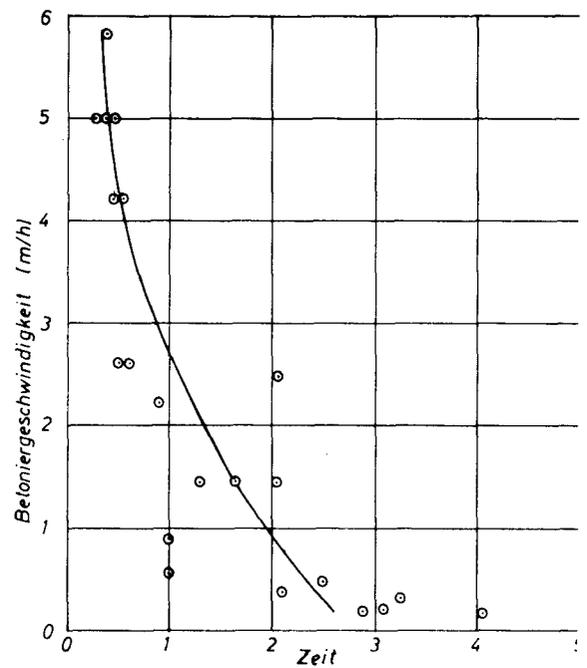


Bild 60 Regressionskurve für die Abhängigkeit zwischen der Betoniergeschwindigkeit und der Betonierzeit bis zum Erreichen des größten Schalungsdrucks

Es zeigt sich, daß der Schalungsdruck umso kleiner ist, je später das Maximum erreicht wird. Außerdem konnte der größte Schalungsdruck bei höheren Betoniergeschwindigkeiten zu einem früheren Zeitpunkt als bei geringeren ermittelt werden. In Anlage 4.4 wurde statistisch untersucht, welche Abhängigkeit zwischen dem größten Schalungsdruck und der Betonierzeit besteht. Die Korrelationsrechnung ergab für die Mittelwerte aus allen Messungen für den Schalungsdruck  $p = y$  und Betonierzeit  $t_h = x$  die statistisch gesicherten Regressionsgeraden

$$\begin{aligned} \eta &= 3,7065 - 0,4992 x \text{ und} \\ \xi &= 3,1868 - 0,5954 y, \end{aligned}$$

die in Bild 59 eingetragen sind. Der Korrelationskoeffizient wurde mit  $r = 0,545$  ermittelt.

Für die Schalungsdruckberechnung hat die in Bild 60 wiedergegebene Abhängigkeit zwischen der Betoniergeschwindigkeit  $v = x$  und der Betonierzeit bis zum Erreichen des größten Drucks mehr Bedeutung. Nach der in Anlage 4.5 durchgeführten statistischen Auswertung wurde mit Hilfe der mehrfachen Regression die Gleichung:

$$t_h = 2,761 - 0,8721 v + 0,0783 v^2$$

mit dem Korrelationskoeffizienten  $r = 0,684$  und der Prüfgröße  $F$  innerhalb der Schranken für 99 % Sicherheit gefunden. Die Gleichung gibt an, nach welcher Betonierdauer im Mittel der größte Schalungsdruck bei gegebener Betoniergeschwindigkeit erwartet werden kann. Bei dem in Abschnitt 5.3 angegebenen Vergleich der Meßergebnisse mit einigen Berechnungsvorschlägen wurde diese Gleichung noch nicht berücksichtigt, sondern der empfohlene Mittelwert der Erstarrungszeit mit 4 Stunden eingesetzt (Verfahren von Guerrin).

Der Einfluß der **Betontemperatur** auf die Größe des Schalungsdrucks konnte bei den Baustellenmessungen nicht untersucht werden. Hierfür wären Wiederholungsmessungen an gleichartigen Bauwerken und bei weitgehend übereinstimmenden Arbeitsvorgängen bei anderen Temperaturen notwendig gewesen. Solche Möglichkeiten waren nicht vorhanden. Die Frischbetontemperaturen lagen zwischen  $5,5^\circ \text{C}$  und  $18,1^\circ \text{C}$ . Die Extremwerte sind beim Betonieren von Widerlagern gemessen worden. - Aus den Zusammenhängen zwischen der Betonierzeit bis zur Beobachtung des größten Schalungsdrucks und der Betoniergeschwindigkeit (Bild 60) kann jedoch gefolgert werden, daß der Temperatureinfluß bei Betoniergeschwindigkeiten von mehr als  $1,5 \text{ m/h}$  vernachlässigt werden kann.

Dies wurde dadurch bestätigt, daß die Rechenwerte nach den Vorschlägen, in denen die Temperatur berücksichtigt wird, (ACI und Witte) von den Meßergebnissen z.T. stark abweichen. (s.S. 75 )

### 5.3 Vergleich der Meßergebnisse mit einigen Berechnungsvorschlägen

Von den in Abschnitt 2 angegebenen Vorschlägen wurden für den Vergleich mit den beobachteten Meßwerten die von Macklin (2.13), Rodin (2.15) und Guerrin (2.14) empfohlenen Gleichungen ausgewählt, in denen die Temperatur des Betons nicht berücksichtigt wird. (Die Formel von Guerrin ist gleichlautend in den holländischen Rüttelrichtlinien (2.22) enthalten und auch von Uspenskij (2.24) mitgeteilt worden). Ferner wurden die Schalungsdrücke nach den Vorschlägen berechnet, die einen Temperaturfaktor enthalten. Sie sind vom American Concrete Institute (ACI) (2.20) und von Witte (2.26) veröffentlicht worden. - Mit den von Schjödtt (2.16) entwickelten Gleichungen ergaben sich in weiten Grenzen schwankende Schalungsdrücke, weil die darin zu berücksichtigenden Veränderlichen, z.B. Porenwasserdruck und Erstarrungszeit, nicht ausreichend sicher geschätzt werden können.

Die in nachstehender Zahlentafel eingetragenen Rechenwerte ergaben sich aus folgenden Gleichungen:

nach Macklin:

$$p = 150 v \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2\sqrt{v}} \right), \text{ mit}$$

$p$  in psf und  $v$  in ft/h ermittelt und auf  $\text{Mp/m}^2$  umgerechnet,

nach Rodin:

$$p = 2,92 \sqrt[3]{v} \quad (\text{Mp/m}^2),$$

mit  $v$  in m/h

nach Guerrin:

$$\text{bis } v \leq 4,2 \text{ m/h}$$

$$p = \gamma \cdot r + 0,13 \gamma (H - r) \quad (\text{Mp/m}^2)$$

mit  $r =$  Rütteltiefe und  $H = 4 \cdot v \leq H'$   
 $H' =$  Bauteilhöhe

und für die Säulen

$$p = \gamma \cdot r + \frac{\gamma \cdot R}{\text{tg } \varphi'} \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{(H - r) a}{R} + 1 \right)^2} \right]$$

nach A C I :

$$p = 0,735 + \frac{80 v}{T_b + 17,8} \quad \text{bis } v \leq 2 \text{ m/h, und}$$

$$p = 3,70 + \frac{25 v}{T_b + 17,8} \quad \text{bis } v > 2 \text{ m/h, wobei}$$

p in  $\text{Mp/m}^2$  angegeben wird,

nach W i t t e :

$$p = \frac{\gamma \cdot v}{0,03 \cdot T_b} \cdot e \left( -1 + \frac{0,03 T_b}{v} \right) \quad (\text{Mp/m}^2)$$

### Z a h l e n t a f e l

Meßwerte:			Rechenwerte nach:									
Betonier- geschwin- digkeit	Beton- tempe- ratur	Schalungs- druck	Macklin		Rodin		Guerrin		ACI		Witte	
v	T <sub>b</sub>	P <sub>max</sub>	p	Δ	p	Δ	p	Δ	p	Δ	p	Δ
m/h	°C	Mp/m <sup>2</sup>	Mp/m <sup>2</sup>	%								
0,20	10,8	1,67	1,98	+ 19	1,71	+ 2	1,92	+ 15	1,30	- 22	2,78	+ 65
0,34	13,8	2,04	2,29	+ 12	2,04	+ 0	2,30	+ 13	1,60	- 22	2,45	+ 20
0,50	18,0	2,72	2,62	- 4	2,32	- 15	2,72	+ 0	1,86	- 32	2,40	- 20
1,45	6,5	3,15	3,77	+ 20	3,30	+ 5	3,48	+ 10	5,51	+ 75	7,48	+ 137
2,60	14,0	3,49	4,58	+ 31	4,01	+ 15	3,75	+ 8	5,72	+ 64	3,42	- 2
4,20	13,5	3,99	5,30	+ 33	4,63	+ 16	4,11	+ 3	7,05	+ 77	10,1	+ 153
5,00	14,9	5,11	5,67	+ 11	4,99	- 2	4,70	- 8	7,52	+ 47	10,75	+ 110
5,80	15,8	5,54	5,96	+ 8	5,24	- 5	4,70	- 15	8,01	+ 45	11,7	+ 111

In der Zahlentafel sind die Abweichungen der Rechenwerte von den gemessenen Schalungsdrücken mit Δ (%) angegeben. Hieraus und aus den in Bild 55 (S. 70) eingezeichneten Linienzügen ist zu erkennen, daß in diesem Fall die nach den Vorschlägen von Guerrin und Rodin ermittelten Drücke den gemessenen Größtwerten näher gekommen sind als die nach der Formel von Macklin errechneten Schalungsdrücke. (Hier wurden nur die Vorschläge von Rodin und Macklin für die Ermittlung des Schalungsdrucks von ungerütteltem Beton verwendet).

In den vom A C I und von W i t t e aufgestellten Gleichungen für p<sub>max</sub> wird die Betontemperatur berücksichtigt. Ihr Einfluß dürfte jedoch überbewertet worden sein. Die Rechenergebnisse weichen von den beobachteten Werten so erheblich ab, daß die Abschätzung des Schalungsdrucks nach diesen Vorschlägen nicht zu empfehlen ist.

#### 5.4 Vorschläge zur Abschätzung des größten Schalungsdrucks

In Abschnitt 5.2 ist für die bei den Baustellenmessungen beobachteten Schalungsdrücke ihre Abhängigkeit von der Betoniergeschwindigkeit mit Hilfe der Korrelationsrechnung untersucht worden. Für die festgestellten größten Einzelwerte ergab sich dabei die Regressionskurve

$$p = 2,754 \cdot v^{0,3054} \quad (p \text{ in } \text{Mp/m}^2, v \text{ in m/h})$$

Aus der Kombination der beiden Regressionsgleichungen

$$p = 1,984 \cdot h - 0,016 \quad \text{und}$$

$$h = 1,53 \cdot v^{0,2657}$$

ergibt sich eine nur wenig von der vorigen abweichende neue Regressionsgleichung

$$p = 3,035 \cdot v^{0,2657} - 0,016.$$

Diese beiden Gleichungen mit der exponentiell Veränderlichen  $v$  können mit hinreichender Annäherung durch den einfacheren Ausdruck

$$p = 3,0 \cdot v^{0,25} = 3,0 \sqrt[4]{v} = 3,0 \sqrt{\sqrt{v}}$$

ersetzt werden.

Bis zu Betoniergeschwindigkeiten von rd. 4 m/h können hiermit die Schalungsdrücke von Rüttelbeton auf hölzerne Schalungen ausreichend genau bestimmt werden.

Für Betoniergeschwindigkeiten von mehr als 4,2 m/h lagen die beobachteten Schalungsdrücke um rd. 20 v.H. über den nach der vorstehenden Gleichung ermittelten Werten. Weil die Betonierdauer bis zum Erreichen des größten Schalungsdrucks bei diesen hohen Betoniergeschwindigkeiten weniger als 30 Minuten beträgt, kann angenommen werden, daß der Rüttelbeton noch nicht versteift ist und etwa bis zu der Höhe  $h = 1,53 v^{0,2657}$  auf die Schalung hydrostatisch wirkt. (Bild 54, S. 69). Für Betoniergeschwindigkeiten zwischen  $v = 5$  und 6 m/h wird deshalb vorgeschlagen, den Schalungsdruck mit der Gleichung

$$p = 1,53 \cdot 2,4 v^{0,2657} \sim 3,6 \cdot \sqrt[4]{v}$$

abzuschätzen.

In der folgenden Zahlentafel werden die aus diesen Gleichungen ermittelten Werte mit den beobachteten Schalungsdrücken verglichen ( $\Delta$  = Abweichung in %).

#### Zahlentafel

Betoniergeschwindigkeit $v$	Meßwert $p$	$p = 3,0 \sqrt[4]{v}$		$p = 3,6 \sqrt[4]{v}$	
		$p$	$\Delta$	$p$	$\Delta$
m/h	Mp/m <sup>2</sup>	Mp/m <sup>2</sup>	%	Mp/m <sup>2</sup>	%
0,20	1,67	2,01	+ 20	-	-
0,34	2,04	2,29	+ 12	-	-
0,50	2,72	2,52	- 7	-	-
1,45	3,15	3,28	+ 4	-	-
2,60	3,49	3,81	+ 9	-	-
4,20	3,99	4,29	+ 8	-	-
5,0	5,11	(4,48)		5,38	+ 5
5,8	5,54	(4,66)		5,59	+ 1

Die Korrelationsrechnung zwischen dem Schalungsdruck  $p$  und der Betoniergeschwindigkeit  $v > 1$  m/h hat auch eine lineare Abhängigkeit ergeben, die in der Gleichung

$$p = 2,061 + 0,455 v$$

ausgedrückt ist.

Annähernd parallel zu der entsprechenden Geraden und durch die größten gemessenen Schalungsdrücke kann eine Gerade mit der Gleichung

$$p = 2,5 + 0,5 v$$

gefunden werden, die für Betoniergeschwindigkeiten  $v > 0,5$  m/h gelten soll. Für  $v < 0,5$  m/h wird die empirische Gleichung

$$p = 1,0 + 3,5 v$$

gewählt. Die beiden Gleichungen sind in Bild 61, S. 77, eingezeichnet. Sie zeigen ebenso wie die in der folgenden Zahlentafel angegebenen Rechenwerte eine gute Annäherung an die beobachteten Schalungsdrücke.

### Zahlentafel

beobachtete Betonier- geschwindigkeit	für $v < 0,5 \text{ m/h}$ $p = 1,0 + 3,5 v$			für $v \geq 0,5 \text{ m/h}$ $p = 2,5 + 0,5 v$	
	gemessener Schalungs- druck p	p	$\Delta$	p	$\Delta$
m/h	Mp/m <sup>2</sup>	Mp/m <sup>2</sup>	(%)	Mp/m <sup>2</sup>	(%)
0,20	1,67	1,70	+ 2	-	-
0,34	2,04	2,19	+ 7	-	-
0,50	2,72	2,75	+ 1	2,75	+ 1
1,45	3,15	-	-	3,22	+ 2
2,60	3,49	-	-	3,80	+ 9
4,20	3,99	-	-	4,60	+ 16
5,00	5,11	-	-	5,00	- 2
5,8	5,54	-	-	5,40	- 3

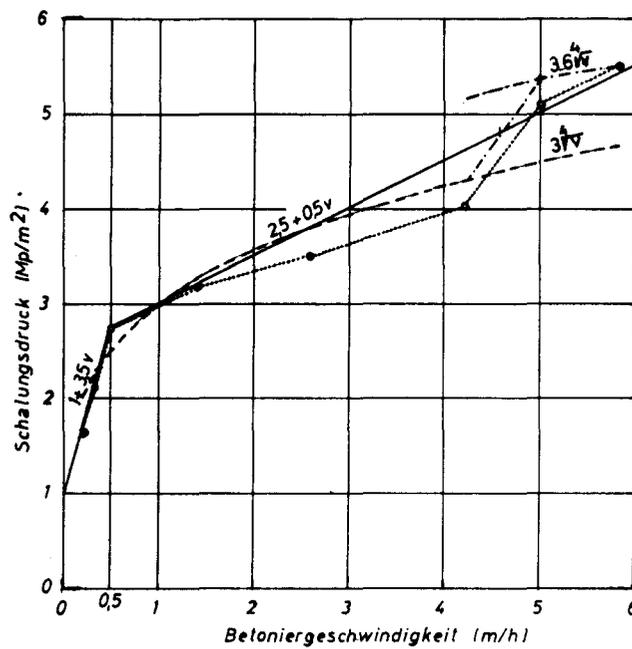


Bild 61 Zu erwartender Schalungsdruck:

- I.)  $p = 1,0 + 3,5 v$   $v \leq 0,5 \text{ m/h}$   
 $p = 2,5 + 0,5 v$   $v \geq 0,5 \text{ m/h}$
- II.)  $p = 3,0 \sqrt{v}$   $v \leq 4,2 \text{ m/h}$   
 $p = 3,6 \sqrt{v}$   $v \geq 4,2 \text{ m/h}$

• Meßwerte

Die Zusammenhänge zwischen dem größten Schalungsdruck  $p = p_{\max}$ , der dabei erreichten Betonhöhe  $h$ , der Betonierdauer  $t$  und der Betoniergeschwindigkeit  $v$  lassen sich geschlossen darstellen. Die graphische Darstellung in dem Diagramm Bild 62 geht auf einen Vorschlag von Gaede zurück.

Am Anfang dieses Abschnitts sind die Regressionsgleichungen

$$p = 1,984 h - 0,016 \quad \text{und} \\ h = 1,53 v^{0,2657}$$

vereinfacht zu dem Ausdruck

$$p = 3,0 \sqrt[4]{v} \quad \text{bzw. bei Betoniergeschwindigkeiten } v > 4,0 \text{ m/h zu} \\ p = 3,6 \sqrt[4]{v}$$

zusammengefaßt worden.

$$\text{Mit } h = 1,53 v^{0,2657} \approx 1,53 v^{1/4} = v \cdot t \text{ wird} \\ t = 1,53 \sqrt[4]{1/4 - 1} = 1,53 v^{-3/4} \\ \text{bzw. } \left( \frac{t}{1,53} \right)^{-4/3} = v.$$

Wird dieser Ausdruck in die Gleichung

$$p = C \cdot \sqrt[4]{v} \text{ eingeführt, ergibt sich} \\ p = C \left( \frac{t}{1,53} \right)^{-4/3 \cdot 1/4} = C \left( \frac{t}{1,53} \right)^{-1/3} = C \cdot \sqrt[3]{\frac{t}{1,53}}$$

In Bild 62 (s. u.) ist der größte Schalungsdruck  $p = p_{\max}$  ( $\text{Mp/m}^2$ ) als Abhängige von der Betoniergeschwindigkeit  $v$  (m/h) (Parameter) und der Betonierzeit  $t$  (Std.) (Abszisse) dargestellt. Die zugehörige Betonhöhe  $h$  (m) kann an der rechten Begrenzung des Diagramms abgelesen werden.

Es ist zu erkennen, daß bei niedriger Betoniergeschwindigkeit  $v$  der Schalungsdruck  $p$ , die Betonierdauer  $t$  und die Betonhöhe  $h$  geringer sind als bei größeren Betoniergeschwindigkeiten.

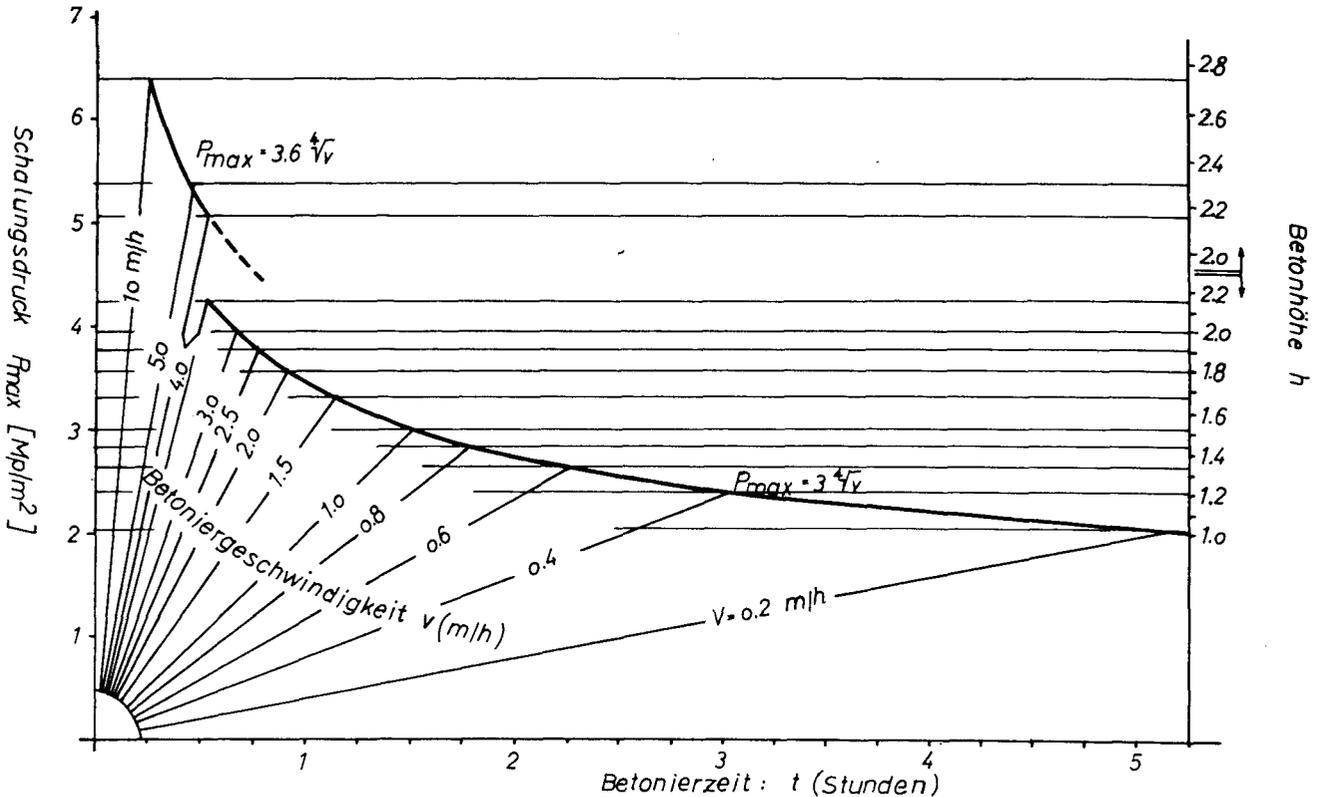


Bild 62: Diagramm zur Ermittlung des größten Schalungsdrucks  $p_{\max}$ , der dabei erreichten Betonhöhe  $h$ , der Betonierdauer  $t$  bei gegebener Betoniergeschwindigkeit  $v$ .

## 5.5 Die Verteilung des Schalungsdrucks

Angaben über die Verteilung des Schalungsdrucks finden sich in mehreren unter Abschnitt 2 genannten Arbeiten. - Die Schalungsdrucklinien wurden entweder nach theoretischen Überlegungen (Bilder 3, 6 bis 9, 13, 20 und 21), oder als Verbindungslinien der bei Messungen an Bauwerken beobachteten Schalungsdrücke aufgezeichnet (Bilder 17, 24 bis 26).

Eine völlige Übereinstimmung zwischen den beiden Gruppen konnte nicht erwartet werden.

Die am Bauwerk gemessenen Schalungsdrücke werden u. a. von den Verformungen des Schalgerüsts beeinflusst, Dies ist an folgendem Beispiel zu erkennen:

Wenn auf einen elastisch verformbaren Balken z. B. über 4 Felder gleicher Stützweiten eine gleichmäßig verteilte Last feldweise, von einem Auflager beginnend, aufgebracht wird, ist die Durchbiegung in der Feldmitte des ersten Feldes am größten, wenn es nur allein belastet ist:

$w_{11}EI = 0,202 (ql^4/24) = w'_{11} = 0,202 f (p)$ . Mit der Belastung des zweiten Feldes nimmt die Durchbiegung ab auf  $w'_{12} = 0,138 f (p)$ , steigt aber bei Belastung des dritten Feldes wieder an auf  $w'_{13} = 0,158 f (p)$  und fällt bei der Belastung aller vier Felder geringfügig auf  $w'_{14} = 0,152 f (p)$  ab.

In den Innenfeldern durchlaufender Balken verhalten sich die Durchbiegungen nach der Belastung des betreffenden Feldes ähnlich. - Ebenso müßten sich die Schalgerüste den einzelnen Lastzuständen mit wechselnden Verformungen anpassen. Eine Rückfederung oder Verminderung der aus einem vorhergegangenen Belastungsfall entstandenen Durchbiegung ist jedoch nur möglich, wenn der Beton sich zusammendrücken läßt oder ausweichen kann. Gibt der Beton jedoch infolge einsetzender Verfestigung nicht mehr nach, dann übt die Schalung auf den Beton einen Druck aus (passiver Schalungsdruck). Dieser Druckanstieg ist umso größer, je steifer das Schalgerüst und je fester die gegenseitige Verankerung der Schalwände ist.

In den Bildern 44 bis 48 und 50 bis 53 sind die an den Bauwerken gemessenen Schalungsdrücke in Abhängigkeit von den Betonhöhen über den Meßdosen aufgetragen worden. (S. 53 bis 66)

Daraus ist zu entnehmen, daß der Schalungsdruck nach Erreichen des Größtwertes in allen Fällen wieder mehr oder weniger abgesunken ist. Bei den Messungen an den Brückenwiderlagern und Wänden waren die Meßwerte bei Betonierschluß oder am Ende der Beobachtungszeit auf im Mittel 70 % und bei den Betonsäulen auf etwa 50 % des größten Schalungsdrucks zurückgegangen.

Diese Druckverminderungen können mit den Volumenänderungen des erstarrenden Betons erklärt werden, über die in Abschnitt 3.16 berichtet worden ist. Für den bei den untersuchten Bauwerken verarbeiteten Beton kann schon eine halbe Stunde nach dem Mischen mit einer Schrumpfung gerechnet werden, der eine lineare Kontraktion von etwa 0,04 mm/m bis 0,05 mm/m entspricht. (Die Messungen wurden an den Säulen und Wänden nach einer Stunde und an den Widerlagern später beendet). Die als Folge physikalischer und chemischer Vorgänge eintretende Volumenkontraktion bewirkt eine Druckverminderung, die sich bei steifen Schalgerüsten deutlicher zeigt als bei nachgebenden weicheren Konstruktionen. Dies kann an folgenden Beispielen erklärt werden:

1. Eine 50 cm breite, 100 cm lange und 2,0 cm dicke Schalplatte aus Holz soll als Zweifeldplatte mit einer Stützweite von 50 cm durch  $p = 3,0 \text{ Mp/m}^2$  belastet sein. Die Durchbiegung ergibt sich mit

$$f = 0,00542 \frac{p \cdot l^4}{E I} = 0,00542 \frac{15 \cdot 50^4}{105 \cdot 33,33} = 0,1525 \text{ cm.}$$

Nach einer linearen Kontraktion um etwa 0,04 mm/m wird der Schalungsdruck an einer 1,0 m dicken Betonwand auf  $2,96 \text{ Mp/m}^2$  (98,7 %) sinken, wobei auf jeder Seite der Wand mit einer Abnahme der Durchbiegung um 0,02 mm gerechnet wird. Ist die Schalplatte aber 3,0 cm dick, so wird unter sonst gleichen Verhältnissen die Durchbiegung nur 0,0452 cm betragen, während nach derselben Volumenkontraktion der Schalungsdruck auf  $2,87 \text{ Mp/m}^2$  (95,6 %) abfällt.

2. Zwei Schalwände sollen im gegenseitigen Abstand von 1,0 m durch Schalungsanker aus Baustahl St 37 verspannt sein. Gewählt sei ein Durchmesser der Anker von 10 mm, die infolge des Schalungsdrucks mit einer Spannung  $\sigma_{11} = 1400 \text{ kp/cm}^2$  beansprucht sein sollen. Bei einer Ankerlänge  $l = 125 \text{ cm}$  ergibt sich eine Verlängerung  $\Delta l = 0,832 \text{ mm}$ . Eine Volumenkontraktion von 0,04 mm/m bewirkt einen Spannungsabfall im Anker auf  $\sigma_{12} = 1383 \text{ kp/cm}^2 = 0,95 \sigma_{11}$ . Wird für die gleichen Lastverhältnisse ein Ankerdurchmesser von 14 mm gewählt, ergeben sich die Spannung  $\sigma_{21} = 714 \text{ kp/cm}^2$  und die Verlängerung  $\Delta l_2 = 0,425 \text{ mm}$ . Dieselbe Schrumpfung bewirkt dann einen Spannungsabfall auf  $\sigma_{22} = 674 \text{ kp/cm}^2 = 0,92 \sigma_{21}$ .

Bei den Messungen war nach dem Erreichen des größten Schalungsdrucks an den Säulen (Bild 50, S. 62, Bild 51, S. 63) ein größerer Druckabfall zu beobachten als an den anderen Bauteilen. Die Schalgerüste der Betonsäulen waren so konstruiert, daß sie sich nur sehr wenig verformen sollten (Bild 49, S. 61). Im Vergleich zu diesen können die Schalungen der Brückenwiderlager und Wände als weiche Konstruktionen bezeichnet werden. Die Schalbretter waren in Abständen von rd. 60 cm auf Kanthölzern befestigt und die Schalwände mit Spanndrähten verankert, die sich beim Entfernen der Spreizen lockerten. Während des Betonierens konnten die Verformungen mit Meßuhren verfolgt werden, wobei Verschiebungen nach außen bis zu 20 mm beobachtet worden sind, die sich aus den Durchbiegungen der Schalbretter und Kanthölzer sowie den Verlängerungen der Ankerdrähte ergeben haben. Wenn der größte Schalungsdruck von Rüttelbeton nach einer der in Abschnitt 5.3 oder 5.4 genannten Gleichungen berechnet worden ist, kann die Schalungsdrucklinie je nach der Steifigkeit des Schalgerüstes wie folgt aufgetragen werden (s. Bild 63):

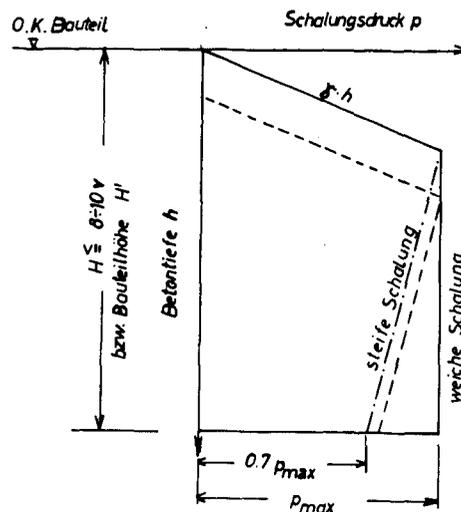


Bild 63 Vorschlag zur Verteilung des Schalungsdrucks

Der Wert  $p_{\max}$  soll auf der hydrostatischen Drucklinie festgelegt und damit die Betontiefe bestimmt werden, von der ab bei weichen Konstruktionen mit dem vollen Druck  $p_{\max}$  zu rechnen ist. Bei steifen Konstruktionen kann an der Sohle des Bauteils ein reduzierter Druck  $p = 0,7 p_{\max}$  eingesetzt werden. Wenn die so gefundene Lastfigur feldweise über die Bauteilhöhe aufgetragen wird, können sich bei größeren Abständen der waagerechten Kanthölzer und der Anker etwas geringere Schnittkräfte ergeben als bei der Belastung der Konstruktion mit dem vollen Schalungsdruck  $p_{\max}$ .

## ANLAGE 1

### Versuche über die Verfestigung von Frischbeton

Die Versuche wurden im Institut für Steine und Erden der Bergakademie Clausthal (Direktor: o. Prof. Dr.-Ing. H. Lehmann) durchgeführt.

#### 1. Bestandteile des Frischbetons

##### 1.1. Zuschlagstoffe

Die Zuschlagstoffe bestanden aus plattigem Grubenkies eines Vorkommens im Okertal und Quarzmehl aus Beständen des Instituts.

Der Kiessand wurde getrocknet und in die Korngruppen 0 - 1 mm, 1 - 3 mm, 3 - 7 mm und 7 - 15 mm getrennt.

Die Korngruppe 0 - 1 mm enthält 12,2 % Anteile < 0,2 mm und 87,8 % Anteile 0,2 - 1 mm.

Für die Betonmischungen wurde die Sieblinie nach Bolomey aus  $g_K = - 0,06 + 1,06 \sqrt{d/D}$  errechnet:

Korngruppe		0,2 mm	6,3 %
	0,2 -	1 mm	15,1 %
	1 -	3 mm	20,0 %
	3 -	7 mm	25,0 %
	7 -	15 mm	33,6 %
			<hr/>
		$\sum g_K$	100,0 %

Die in der Korngruppe 0 - 1 mm fehlenden, aber notwendigen Anteile des Feinsandes 0,2 mm wurden durch Quarzmehl ersetzt.

##### 1.2. Zement

Als Bindemittel wurde Portlandzement Z 275 der Norddeutschen Portlandzementfabriken A. G., Werk Siegfried, verwendet. Er wurde nach DIN 1164 geprüft. Folgende Ergebnisse wurden ermittelt:

Mahlfeinheit	:	Rückstand auf dem Sieb 0,09 DIN 117 11,2 %		
Erstarrungsbeginn	:	4 Std. 17 Min.		
Erstarrungsende	:	5 Std. 37 Min. bei Normensteife mit 25 % Wasserzusatz		
Raumbeständigkeit	:	Koch- und Kaltwasserversuche wurden bestanden.		
		Mörtelfestigkeiten (kp/cm <sup>2</sup> )		
nach		3 Tagen	7 Tagen	28 Tagen
Biegefestigkeit		42,7	56,5	75,0
Druckfestigkeit		181	270	424

##### 1.3. Wasser

Es wurde Leitungswasser mit einer mittleren Temperatur von 7° C verwendet.

#### 2. Herstellung und Verarbeitung des Frischbetons

Mit einem 100 l-Freifallmischer wurden 50 l jeder einzelnen Mischung rd. 4 min. lang gemischt. Die für jede Versuchsreihe benötigten zwei Mischerfüllungen wurden auf einem Blech mit Schaufeln noch zweimal durchgearbeitet.

Der Frischbeton wurde in Balkenformen aus Stahl bzw. Holz von rd. 10 x 13 x 56 cm<sup>3</sup> Inhalt in zwei Lagen eingebracht und durch Stochern bzw. mit Hilfe eines Rüttlers verdichtet. Auf der Rüttelflasche war eine Lanze von 50 mm Breite und 6 mm Dicke angebracht. Während der Verarbeitungszeit wurden Ausbreitmaße, Powers-Grade und Luftporengehalte ermittelt. Zu jeder Versuchsreihe wurden drei Betonprobewürfel mit 20 cm Kantenlänge hergestellt. Die Probekörper wurden nach etwa 45 Minuten eben abgeglichen.

#### 3. Lagerung der Versuchsproben

Jeweils drei mit Frischbeton gefüllte Formen wurden wie folgt gelagert:

- in einem Klimaschrank bei 6° C,
- in einem Klimaraum bei 15° C,
- in einem Prüfraum bei i. M. 20° C.

Zu den Prüfungen wurden die Proben in den Prüfraum (c) befördert und blieben dort während der Prüfzeit etwa 15 Minuten lang.

#### 4. Versuchsreihen

Nach Ermittlung der Frischbetongewichte an den Betonprobewürfeln und den Versuchsbalken wurden die nachstehenden Mischungsanteile errechnet.

Zahlentafel 1

Reihe	Zement	Kies-sand	Wasser	Frischbeton-gewicht	Frischbeton-temper.	W/Z	Ausbreit-maß	Powers-grade	Luft-poren-gehalt	Lagerung
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	°C	-	cm	Hubstöße	%	-
1	299	1924	164	2387	14.0	0,55	37,8	-	2,25	abc
2	301	1858	196	2355	14.9	0,65	45,0	60	0,7	abc
3	304	1794	244	2342	13.9	0,80	52,7	9	0,97	abc
4	362	1900	163	2425	15.8	0,45	35,5	81	2,0	a c
5	360	1868	178	2406	15.4	0,495	37,5	55	1,75	abc
6	363	1765	218	2346	16.2	0,60	57,5	7	1,65	a

Verdichtung: durch Rütteln Reihen 1, 4 und 5  
durch Stochern Reihen 2, 3 und 6

#### 5. Prüfeinrichtung und Prüfung

In einem 600 kp-Dachziegelprüfer (Chemisches Laboratorium für Tonindustrie, Berlin-Goslar) wurde ein Stahlstempel mit 40 mm Ø eingebaut, dessen freies Ende kegelförmig ausgebildet war. Der Spitzenwinkel betrug 45°. (s. Bild 37, S. 45)

Mit gleichbleibender, von Hand gesteuerter Geschwindigkeit wurde dieser Stempel 50 mm tief in die Frischbetonoberfläche eingedrückt und die hierzu erforderliche Prüflast ermittelt. Die Eindringtiefe wurde über zwei in ca. 40 cm Abstand gespannte Perlonfäden an einem Maßstab abgelesen, der auf dem Stempel befestigt war. -

Bei jedem Versuchskörper konnten fünf Eindrücke angebracht werden. Dabei wurden die Prüfstellen so ausgewählt, daß zwischen zwei zeitlich aufeinander folgenden mindestens ein Prüfpunkt frei blieb.

Die Zeitabstände zwischen den einzelnen Prüfungen wurden so gewählt, daß die größte Maschinenprüflast von 600 kp nach Möglichkeit beim letzten Prüfgang noch nicht erreicht wurde.

#### 6. Untersuchungsergebnisse

In der Zahlentafel 2 sind die mittlere Zeit nach der Verarbeitung (t), die mittleren Betontemperaturen ( $\alpha$ ), die Mittelwerte (M) und die Kleinstwerte (K) der festgestellten Prüflasten getrennt für die Lagerungstemperaturen der Versuchskörper angegeben. Einzelne Prüfwerte, die gemessen wurden, wenn die Kegelspitze ein Kieskorn traf und zerstörte, sind bei der Mittelbildung nicht berücksichtigt worden.

Zahlentafel 2

Reihe	Lagerung bei rd. 20° C				Lagerung bei rd. 15° C				Lagerung bei rd. 6° C			
	t Std	$\alpha$ °C	M kp	K kp	t Std	$\alpha$ °C	M kp	K kp	t Std	$\alpha$ °C	M kp	K kp
1	0 <sup>40</sup>	15,0	42,7	33,0	1 <sup>46</sup>	13,3	74	66	1 <sup>24</sup>	14,0	68,0	43,0
	2 <sup>09</sup>	17,2	101	84	3 <sup>26</sup>	12,7	168	147	2 <sup>31</sup>	12,2	103	89
	3 <sup>45</sup>	18,2	183	160	4 <sup>24</sup>	13,3	209	155	4 <sup>01</sup>	12,0	170	120
	4 <sup>45</sup>	19,4	203	177	6 <sup>06</sup>	13,6	270	182	5 <sup>47</sup>	12,0	219	171
	6 <sup>32</sup>	21,1	>600?	490	7 <sup>09</sup>	13,8	?	360	6 <sup>51</sup>	11,5	245	177
	2	0 <sup>47</sup>	15,0	15,3	11,0	2 <sup>46</sup>	14,1	78	15,0	2 <sup>05</sup>	12,0	25,3
2 <sup>28</sup>		17,6	60,0	33,0	4 <sup>14</sup>	14,2	100	78	5 <sup>14</sup>	11,4	97	88
4 <sup>05</sup>		18,6	210	200	6 <sup>20</sup>	14,6	216	182	8 <sup>28</sup>	9,8	188	130
5 <sup>49</sup>		20,2	289	222	7 <sup>58</sup>	14,8	276	215	11 <sup>00</sup>	8,9	?	390
6 <sup>46</sup>		20,8	363	282	8 <sup>53</sup>	15,0	345	340				
3		1 <sup>36</sup>	15,1	10,3	5,5	3 <sup>25</sup>	13,0	33,7	23,0	3 <sup>06</sup>	11,6	17,8
	4 <sup>23</sup>	18,9	46,0	37	5 <sup>20</sup>	12,8	80	76	4 <sup>56</sup>	10,7	48,7	37
	5 <sup>58</sup>	19,6	153	123	6 <sup>37</sup>	12,9	204	185	6 <sup>16</sup>	11,8	89,5	64
	7 <sup>11</sup>	19,7	238	225	7 <sup>59</sup>	12,9	318	226	7 <sup>35</sup>	12,2	145	131
	8 <sup>15</sup>	19,7	457	377	8 <sup>58</sup>	13,1	>600?	352	8 <sup>38</sup>	11,8	355	332
	4	0 <sup>55</sup>	15,7	60,1	27,5	-	-	-	-	1 <sup>35</sup>	14,1	35,3
2 <sup>19</sup>		17,1	100	87					2 <sup>56</sup>	12,9	97	66
3 <sup>23</sup>		18,4	167	138					4 <sup>41</sup>	11,6	166	152
5 <sup>04</sup>		19,3	377	231					6 <sup>05</sup>	11,6	288	233
6 <sup>58</sup>		20,2	>600?	450					7 <sup>58</sup>	11,7	>600?	311
5		0 <sup>49</sup>	16,8	9,0	7,0	1 <sup>37</sup>	15,6	15,4	12,8	1 <sup>53</sup>	14,7	10,7
	2 <sup>55</sup>	19,3	59	51	3 <sup>31</sup>	15,5	89	66	3 <sup>13</sup>	12,9	36,8	27,0
	4 <sup>07</sup>	20,5	187	125	4 <sup>44</sup>	15,9	149	141	4 <sup>23</sup>	12,2	80	67
	5 <sup>19</sup>	21,5	326	248	6 <sup>04</sup>	16,0	392	208	5 <sup>46</sup>	12,0	129	120
	7 <sup>06</sup>	21,8	>600?	590	7 <sup>16</sup>	16,7	?	400	7 <sup>44</sup>	11,6	270	220
	6	1 <sup>28</sup>	15,6	13,3	5,0							
2 <sup>52</sup>		17,1	31,5	15,0								
3 <sup>54</sup>		18,0	65,5	43,5								
5 <sup>23</sup>		19,8	329	273								
8 <sup>07</sup>		20,1	548	506								

Im Rahmen der Versuche wurden auch die Betonfestigkeiten während der Anfangserhärtung an Betonprobewürfeln von 20 cm Kantenlänge ermittelt. Dabei wurde die Prüflast in die freie Würfeloberfläche eingeleitet. Die Bodenplatte der Formen verblieb in der Prüfmaschine.

Zahlentafel 3

Reihe	Prüfalter Std.	Prüflast kp	Druckfestigkeit kp/cm <sup>2</sup>
1	1 <sup>55</sup>	260	0,65
2	3 <sup>53</sup>	300	0,75
4	2 <sup>15</sup>	300	0,75
5	3 <sup>30</sup>	405	1,01
	5 <sup>28</sup>	860	2,15
6	4 <sup>10</sup>	490	1,23

Die Prüfungen der zu den Versuchsreihen angefertigten Betonprobewürfel von 20 cm Kantenlänge zeigten bei einem Probenalter von 28 Tagen folgende Ergebnisse:

Zahlentafel 4

Reihe	Raumgewicht kg/m <sup>3</sup>	Druckfestigkeit kp/cm <sup>2</sup>
1	2340	345
2	2300	287
3	2240	263
4	2390	463
5	2370	425
6	2245	370

Reihe 1

$z = 299 \text{ Kg/m}^3$   $w/z = 0,55$

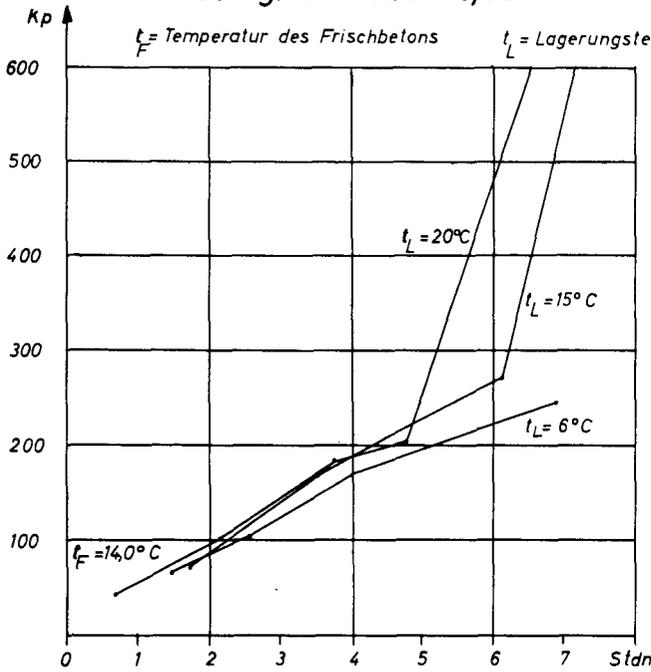


Bild 1

Reihe 2

$z = 301 \text{ Kg/m}^3$   $w/z = 0,65$

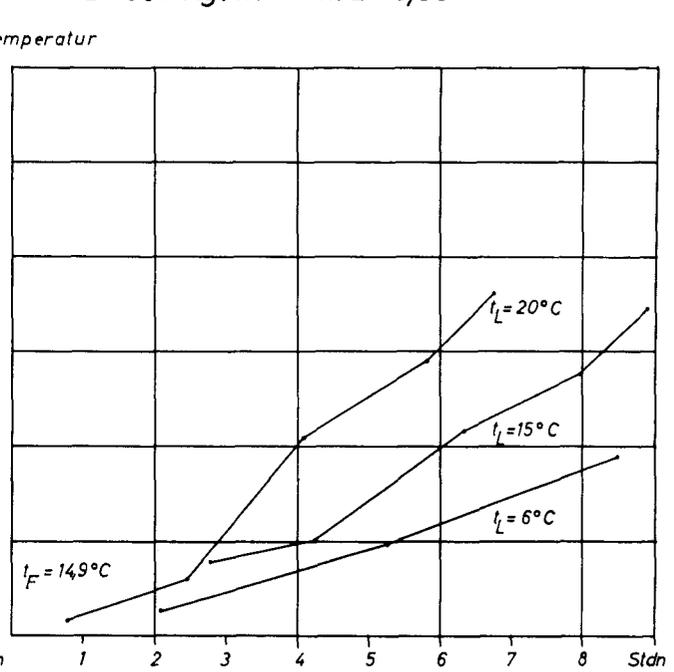


Bild 2

Stempeleindruckversuche an Frischbeton

Reihe 3

$z = 304 \text{ Kg/m}^3$   $w/z = 0,80$

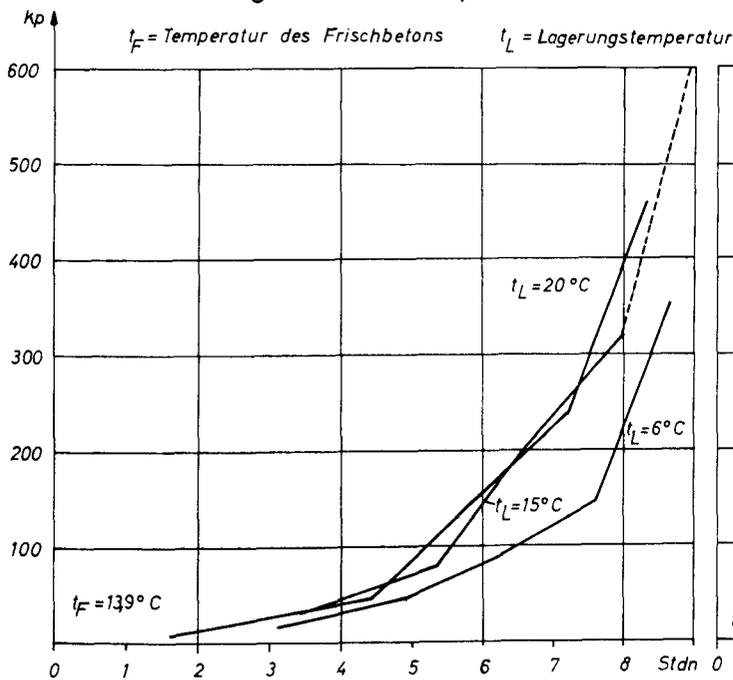


Bild 3

Reihe 4

$z = 362 \text{ Kg/m}^3$   $w/z = 0,45$

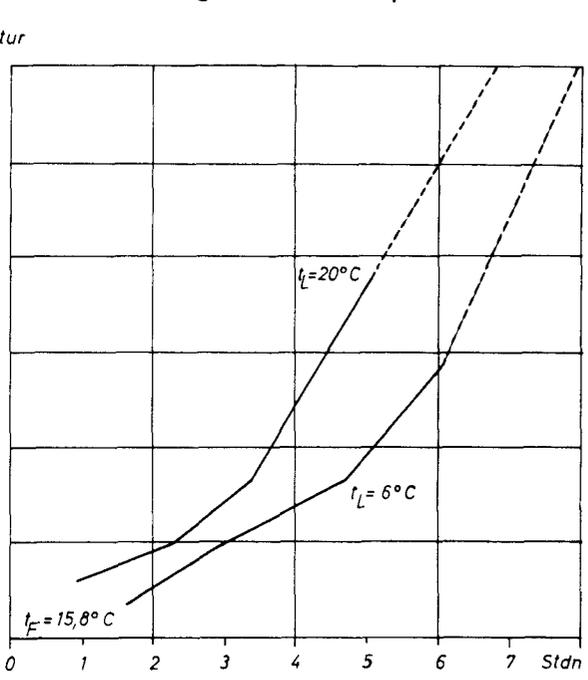


Bild 4

Stempeleindruckversuche an Frischbeton

Reihe 5

$z = 360 \text{ Kg/m}^3$   $w/z = 0,495$

$t_F = \text{Temperatur des Frischbetons}$   $t_L = \text{Lagerungstemperatur}$

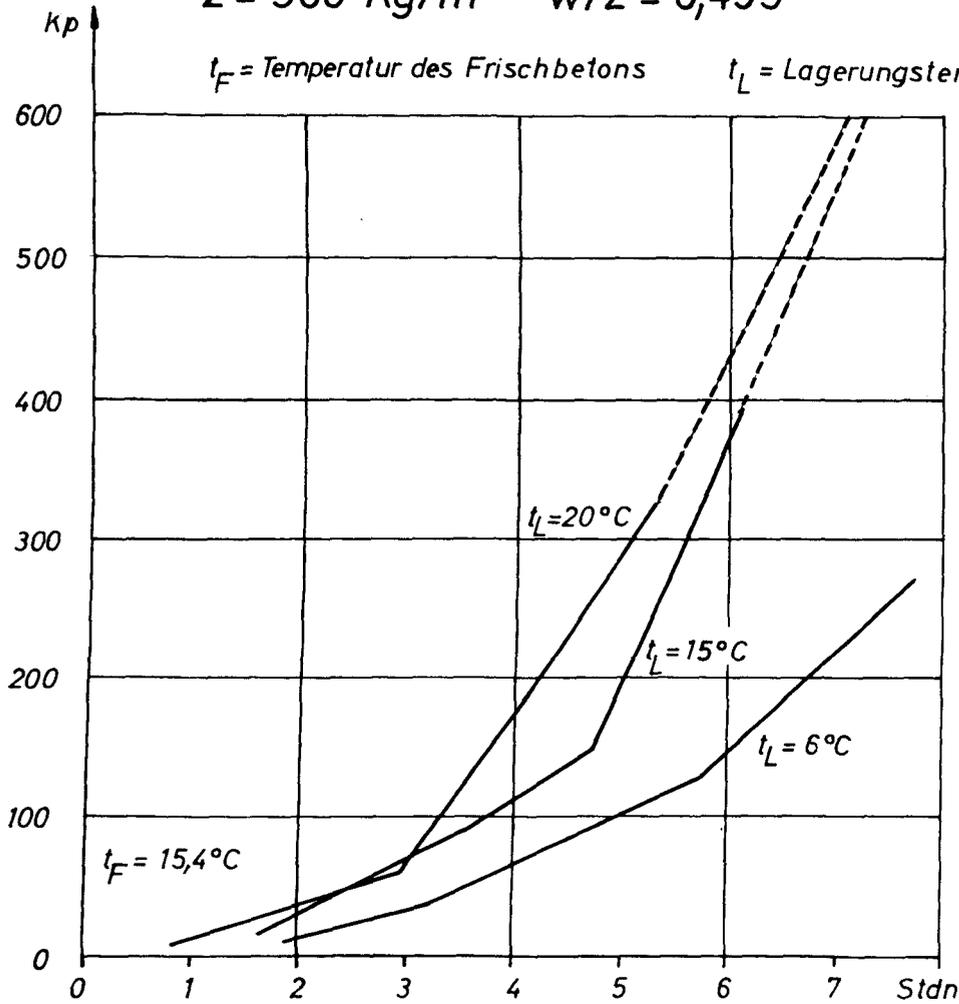


Bild 5

Reihe 6

$z = 363 \text{ Kg/m}^3$   $w/z = 0,60$

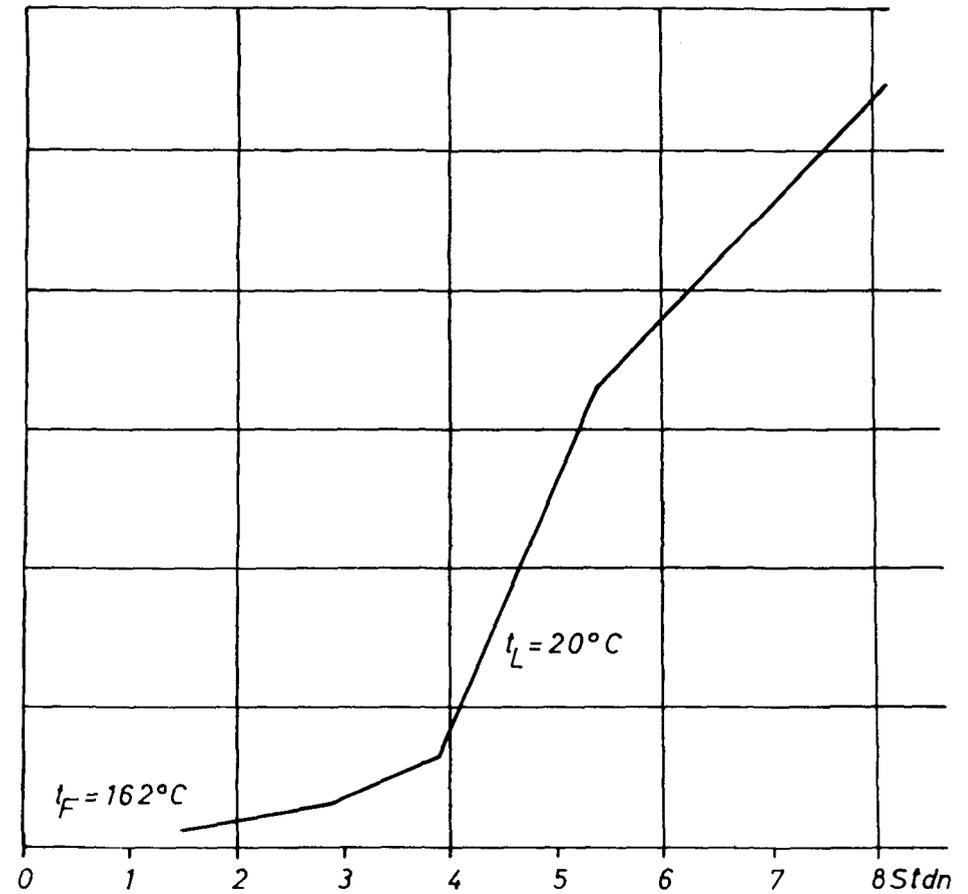


Bild 6

Stempeleindruckversuche an Frischbeton

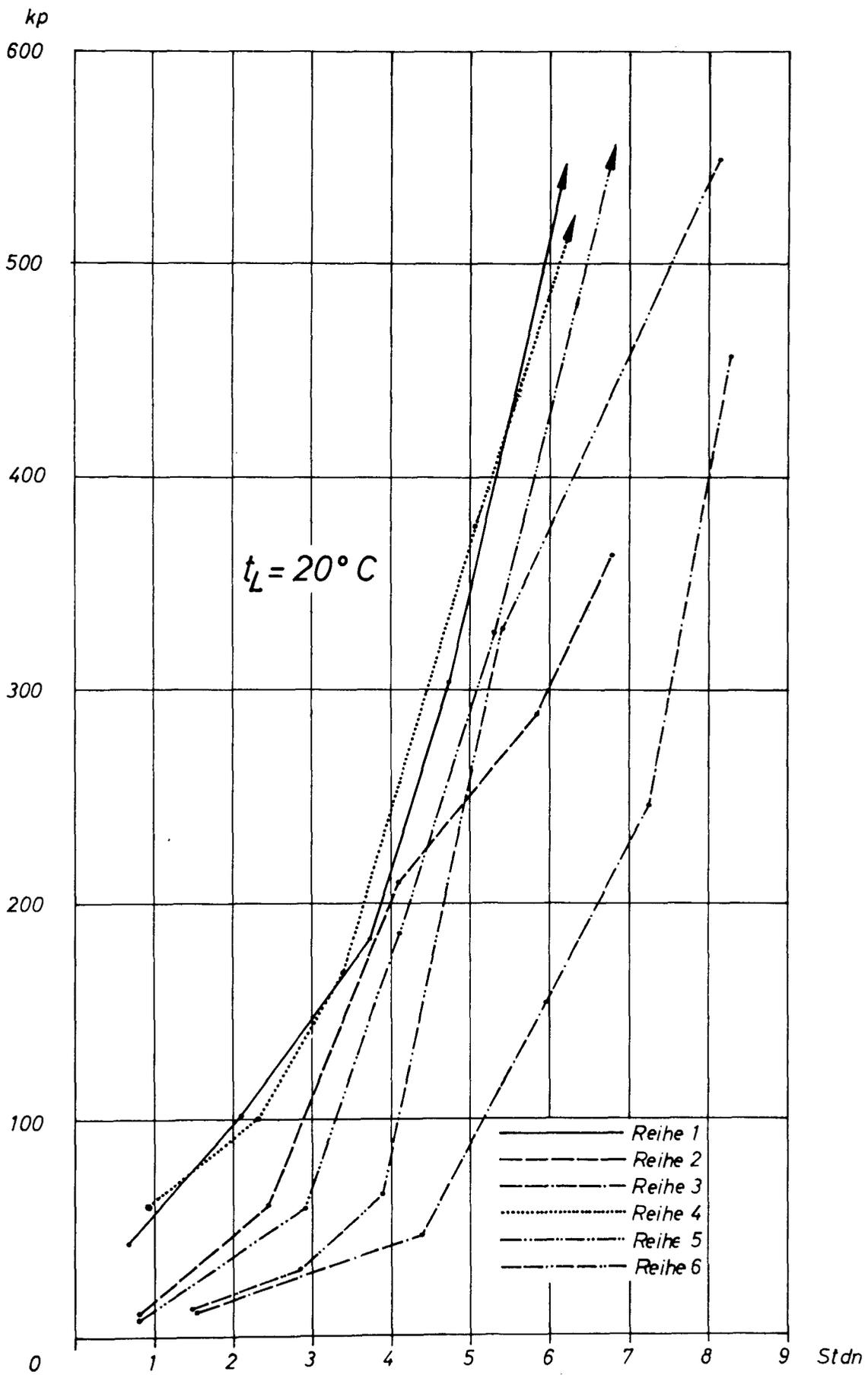


Bild 7

Stempeleindruckversuche an Frischbeton

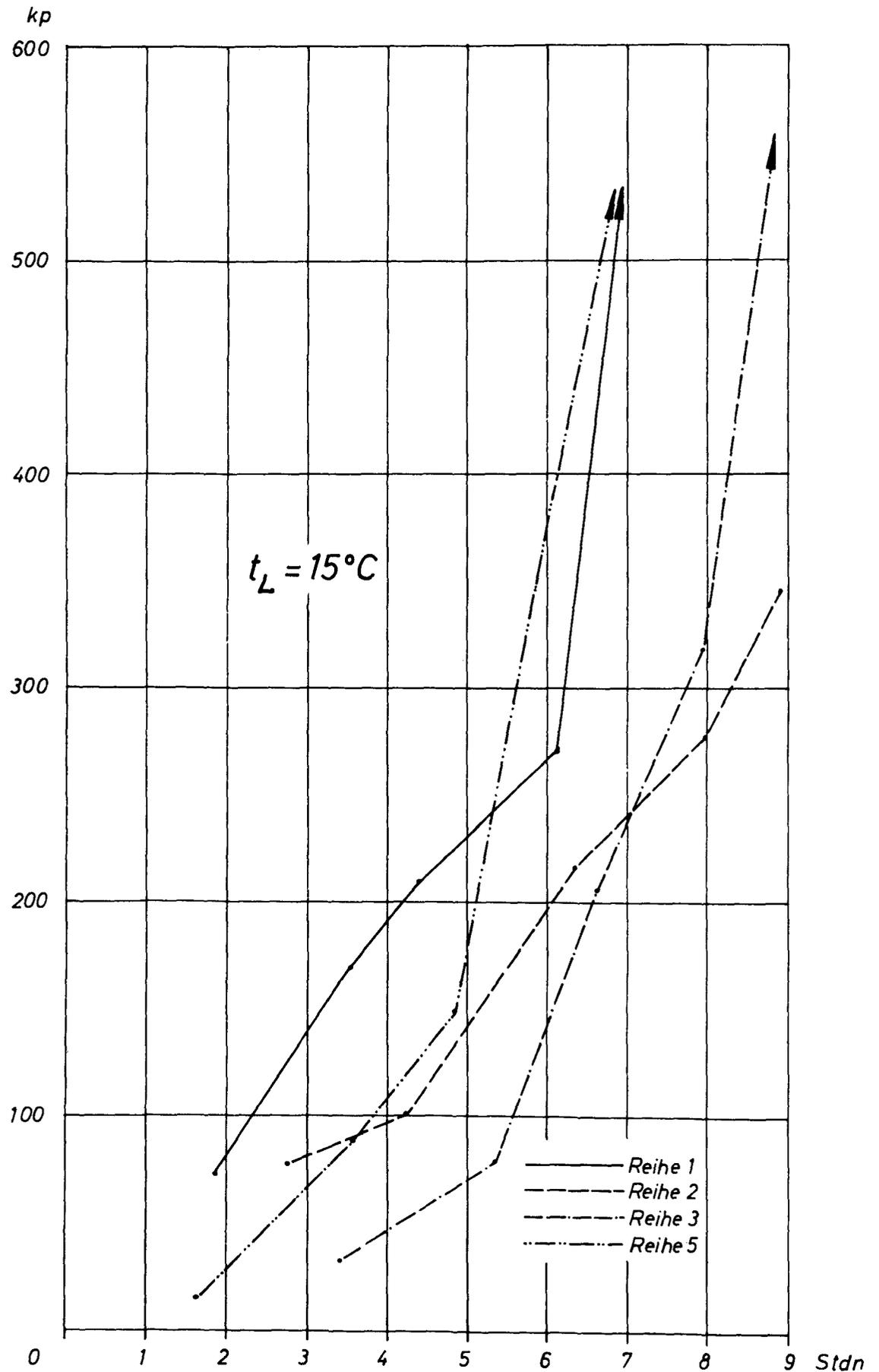


Bild 8

Stempeleindruckversuche an Frischbeton

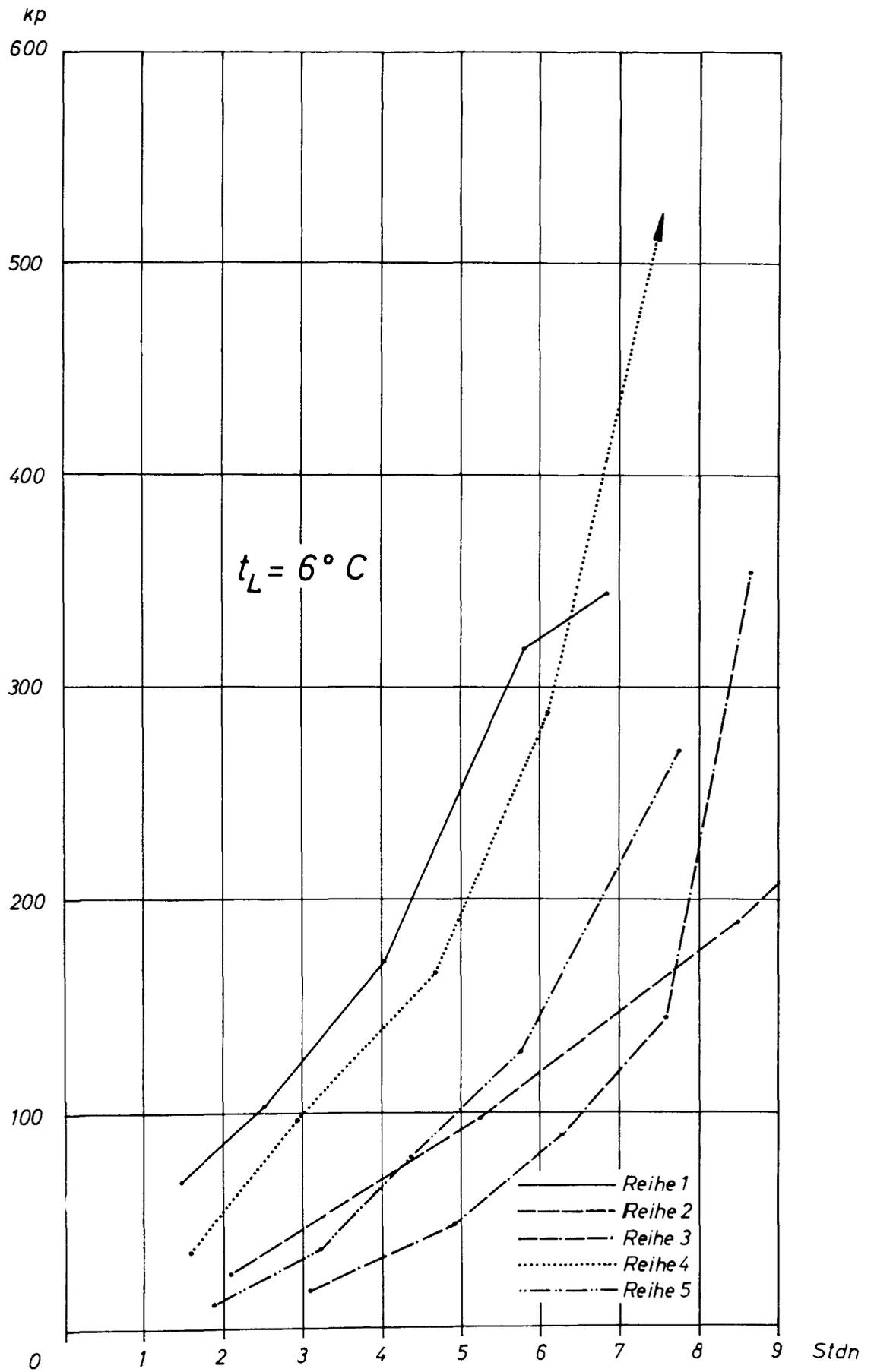


Bild 9

Stempeleindruckversuche an Frischbeton

## ANLAGE 2

### Korrelationsrechnungen

1.) Schalungsdruck p  $\longleftrightarrow$  Betonhöhe h  
zu S. 68 und Bild 54

(N = 27)

Druck p x	Höhe h y		
2,63	2,03		
3,49	1,94		
1,84	1,74		
1,23	0,79		
1,67	0,71		
1,64	0,96		
1,38	0,96	$S_x =$	80,57
1,44	0,95	$S_y =$	40,82
2,04	1,28	$S_x^2 =$	277,0255
2,19	0,85	$S_y^2 =$	67,8100
2,72	1,65	$S_{xy} =$	133,3174
2,64	1,00	$x_m =$	2,984
3,15	1,31	$y_m =$	1,512
2,89	1,45		
2,94	1,96		
2,22	1,09		
5,11	2,18		
4,83	2,44		
4,62	1,88		
3,92	1,65		
3,96	1,65		
5,54	2,05		
2,50	1,88		
2,81	1,26		
3,99	1,66		
3,46	1,43		
3,72	2,07		
Summe: 80,57	40,82		

$$(N-1)s_y^2 = 67,81 - (40,82^2)/27 = 6,10 \quad s_y^2 = 0,2346$$

$$(N-1)s_x^2 = 277,0255 - (80,57)^2/27 = 36,5987 \quad s_x^2 = 1,4076$$

$$(N-1)s_{xy} = 133,3174 - (80,57 \cdot 40,82)/27 = 12,136 \quad s_{xy} = 0,4654 \quad (s_{xy}^2 = 0,21659)$$

$$b = 0,4654 : 1,4076 = 0,33063$$

$$b' = 0,4654 : 0,2346 = 1,984$$

$$a = 1,512 - 0,33063 \cdot 2,984 = 0,525$$

$$a' = 2,984 - 1,984 \cdot 1,512 = -0,016$$

$$\eta = 0,525 + 0,3306 x$$

$$\xi = - 0,016 + 1,984 y$$

$$B = 0,21659 : (0,2346 \cdot 1,4076) = 0,6559$$

$$r = \sqrt{0,6559} = 0,8098$$

$$F = (0,6559 \cdot 25) : (1 - 0,6559) = 47,65$$

$$F > F_{99,9} = 14,0 \quad \text{Regression ist gesichert!}$$

$$s_{ry}^2 = (0,3441 \cdot 0,2346 \cdot 26) : 25 = 0,08395$$

$$s_{ry} = \pm 0,29 \text{ m}$$

$$s_{rx}^2 = (0,3441 \cdot 1,4076 \cdot 26) : 25 = 0,5040$$

$$s_{rx} = \pm 0,711 \text{ Mp/m}^2$$

$$s_b^2 = 0,5040 : (26 \cdot 1,4076) = 0,0138$$

$$s_b = \pm 0,118$$

Schwankung der Regressionskoeffizienten :  $b \pm 0,118 \cdot t$

$$\text{mit } t_{95} = 2,06 \quad : b \pm 0,243$$

2.) Schalungsdruck (Höchstwerte) —> Betoniergeschwindigkeit v  
zu S. 72 und Bild 58

v (m/h)	p (Mp/m <sup>2</sup> )
0,19	1,67
0,34	2,04
0,50	2,72
1,45	3,15
2,20	2,63
2,45	2,89
2,60	3,49
4,20	3,99
5,0	5,11
5,8	5,55

$$\text{Substitution } x = \lg v \quad y = \lg p$$

$$\text{Mittelwerte } x_m = 0,1793 \quad y_m = 0,4942$$

$$S_x = 1,7930 \quad S_y = 4,9418$$

$$s_x^2 = 0,2705$$

$$s_y^2 = 0,02793$$

$$s_{xy} = 0,0826$$

$$b = 0,0826 : 0,2705 = 0,3054$$

$$a = 0,4942 - 0,3054 \cdot 0,1793 = 0,4398$$

$$\eta = 0,4398 + 0,3054 x$$

$$p = 2,754 \cdot \sqrt{0,3054}$$

$$B = 0,0826^2 : (0,2705 \cdot 0,02793) = 0,903$$

$$r = 0,95$$

$$F = (0,903 \cdot 8) : 0,097 = 74,5 \quad F_{99,9} = 25,4 \quad \text{Regression ist gesichert}$$

$$s_b^2 = (0,097 \cdot 0,02793) : (8 \cdot 0,2705) = 0,00125$$

$$s_b = 0,0353$$

Vertrauensbereich für  $t_{95} = 2,306$  für  $n - 2 = 8$

$$\eta \pm s_b \cdot t_{95} \sqrt{\frac{1}{n-2} + \frac{(x - x_m)^2}{s_x^2}}$$

$$\eta \pm 0,0353 \cdot 2,306 \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{(x - 0,1793)^2}{0,2705}}$$

3.) Betonhöhe h  $\longrightarrow$  Betoniergeschwindigkeit v  
zu S. 72 und Bild 56

Substitution :  $y = \lg h$   
 $x = \lg v$

h (m)      v (m/h)

0,71      0,19

$$S_y = 2,0611$$

$$y_m = 0,20611$$

0,96      0,18

$$S_x = 0,7691$$

$$x_m = 0,07691$$

1,28      0,34

$$S_y^2 = 0,7030$$

1,65      0,50

$$S_x^2 = 3,1596$$

1,96      1,45

$$S_{xy} = 0,9823$$

2,03      2,20

$$s_y^2 = 0,03091$$

1,94      2,60

$$s_x^2 = 0,34449$$

2,07      4,20

$$s_{xy} = 0,09153$$

2,44      5,0

2,05      5,8

$$b = 0,09153 : 0,34449 = 0,2657$$

$$a = 0,20611 - 0,2657 \cdot 0,07691$$

$$a = 0,18576$$

$$\eta = 0,18576 + 0,2657 \cdot x$$

$$h = 1,53 \cdot \sqrt{0,2657}$$

$$B = \frac{0,9823^2}{0,703 \cdot 3,1596} = 0,4344$$

$$r = 0,659$$

$$F = \frac{0,4344}{0,5656} \cdot 8 = 6,144 > F_{95} = 5,32$$

$$< F_{99} = 11,3$$

4.) Schalungsdruck  $p$  ————— Zeit  $t_h$  für  $p_{max}$   
 zu S. 74 und Bild 59

y p (Mp/m <sup>2</sup> )	x t <sub>h</sub> (Std.)
2,63	0,92
3,49	0,58
1,84	0,50
1,23	3,17
1,67	2,83
1,64	4,08
1,38	4,08
1,44	2,16
2,04	3,42
2,19	1,00
2,72	2,50
2,64	1,00
3,15	1,65
2,89	2,08
2,94	2,08
2,22	1,30
5,11	0,38
4,83	0,43
4,62	0,28
3,92	0,37
3,96	0,37
5,54	0,37
3,99	0,43
3,46	0,43
3,72	0,43
<u>75,26</u>	<u>34,86</u>

$$S_y = 75,26 \quad y_m = 3,0104$$

$$S_x = 34,86 \quad x_m = 1,3944$$

$$N = 25$$

$$S_y^2 = 262,8794$$

$$S_x^2 = 91,9298$$

$$S_{xy} = 83,3178$$

$$s_y^2 = 1,5132$$

$$s_x^2 = 1,8050$$

$$s_{xy} = -0,9010$$

$$b = -0,9010 : 1,8050 = -0,4992$$

$$a = 3,0104 + 0,4992 \cdot 1,3944 = 3,7065$$

$$b' = -0,9010 : 1,5132 = -0,5954$$

$$a' = 1,3944 + 0,5954 \cdot 3,0104 = 3,1868$$

$$\eta = 3,7065 - 0,4992 \cdot x$$

$$\xi = 3,1868 - 0,5954 \cdot y$$

$$B = \frac{0,901^2}{1,805 \cdot 1,5132} = 0,2971 \quad r = 0,545$$

$$F = \frac{0,2971}{0,7029} \cdot 23 = 9,721$$

$> F_{95} = 4,28$   
 $> F_{99} = 7,88$   
 $< F_{99,9} = 14,2$

$$s_{r_y}^2 = 0,7029 \cdot 1,5132 \cdot \frac{24}{23} = 1,1098 \quad s_{r_y} = \pm 1,053 \text{ Mp/m}^2$$

$$s_{r_x}^2 = 0,7029 \cdot 1,8050 \cdot \frac{24}{23} = 1,3238 \quad s_{r_x} = \pm 1,15 \text{ Std.}$$

5.) Zeit  $t_h$  (für  $p_{max}$ )  $\longrightarrow$  Betoniergeschwindigkeit  $v$   
 zu S. 74 und Bild 60

$t_h = y$	$v = x$
0,92	2,20
0,58	2,60
0,50	2,60
3,17	0,21
2,83	0,19
4,08	0,18
4,08	0,18
2,16	0,38
3,42	0,34
1,00	0,55
2,50	0,50
1,00	0,90
1,65	1,45
2,08	2,45
2,08	1,45
1,30	1,45
0,38	5,00
0,43	5,0
0,28	5,0
0,37	5,8
0,37	5,8
0,37	5,8
0,43	4,2
0,43	4,2
0,43	4,2

N = 25

mehrfache Regression  $y \rightarrow x, z$  mit  $z = x^2$

$$\begin{aligned}
 S_y &= 34,86 & y_m &= 1,3944 \\
 S_x &= 62,63 & x_m &= 2,5052 \\
 S_z &= 261,2775 & z_m &= 10,4511 \\
 S_x^2 &= S_z & s_x^2 &= 4,3511 \\
 S_y^2 &= 91,9298 & s_y^2 &= 1,8050 \\
 S_z^2 &= 6.369,9987 & s_z^2 &= 151,640 \\
 S_{zy} &= 43,1241 & s_{xy}^2 &= -1,8420 \\
 S_{xz} &= 1253,3943 & s_{xz} &= 24,9517 \\
 S_{yz} &= 126,8755 & s_{yz} &= -9,8937 \\
 b_1 &= \frac{\frac{s_z^2 \cdot s_{yz} - s_{zx} \cdot s_{yz}}{s_z^2 \cdot s_x^2 - s_{xz}^2}}{s_z^2 \cdot s_x^2 - s_{xz}^2} = -0,8721 \\
 b_2 &= \frac{\frac{s_x^2 \cdot s_{yz} - s_{xz} \cdot s_{xy}}{s_z^2 \cdot s_x^2 - s_{xz}^2}}{s_z^2 \cdot s_x^2 - s_{xz}^2} = +0,0783
 \end{aligned}$$

$$a = \bar{y} + 0,8721 \cdot \bar{x} - 0,0783 \bar{z} = 2,761$$

$$\eta = 2,761 - 0,8721 x + 0,0783 z$$

$$y = 2,761 - 0,8721 v + 0,0783 v^2$$

$$B = (0,8721 \cdot 1,842 - 0,0783 \cdot 9,8937) : 1,8050 = 0,4608$$

$$r = 0,684$$

$$F = (0,4608 \cdot 21) : (0,5392 \cdot 2) = 8,97 > F_{99} = 5,78$$

$$\text{für } n_1 = 2 \text{ und } n_2 = 21$$

## LITERATURVERZEICHNIS

1. ACJ-Committee 622 (H. Ellsberg) "Pressure on Formwork" - Journ. of the American Concrete Institute, Vol. 30, 1958, S. 174 - 190 und S. 1335 - 1339.
2. Graf und Kaufmann "Schalungsdruck beim Betonieren" - Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 135, Berlin 1960.
3. Noack "Ergebnisse neuer Forschungsarbeiten über die Eigenschaften des Zementbetons und Versuche zur Bestimmung seines Seitendrucks" - Diss. TH Dresden 1919.  
"Versuche zur Bestimmung des Seitendrucks von feuchtem Zementbeton" - Schweiz. Bauzeitung 82 (1923) H 9, S. 109 - 111 und Beton und Eisen 1923, S. 220 - 223.
4. Janssen Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 1895.
5. Shunk, F.R. "Pressure of Concrete on Forms" - Engineering News, V. 62, Nr. 11, Sept. 1909, S. 288 - 289.  
"Pressure of Concrete on Forms" - Professional Memoirs, Engineer Bureau, U.S. Army, V.1, Nr. 3, July - Sept. 1909.
6. Böhm, F. "Über den Seitendruck des frisch eingebrachten Betons" - Beton und Eisen 28 (1929) H. 18, S. 329 - 335.
7. Koenen Handbuch für Eisenbeton, Bd IV.
8. Schinkel und Schönfelder "Versuche über den Schalungsdruck von Gußbeton" - Bautechnik 9 (1931), H. 51, S. 723 u. f.
9. Mauthner "Versuche über Schalungsdruck bei Pumpkret-Beton" - Beton und Eisen 31 (1932), H. 10, S. 160 - 162.
10. Teller, L.W. "The effect of vibration on the pressure of Concrete against formwork" - Public Roads, Vol. 12, No 1, März 1931, S. 11 - 15.
11. Roby, H.G. "Pressure of Concrete on Forms" - Civil Engineering, Vol. 5, März 1935, S. 162 u. f.
12. Welt "Eiseneinsparung im Betonschalungsbau" - Beton und Eisen 40 (1941), S. 141 u. f.
13. Graf und Kaufmann "Versuche über die bei der Herstellung von 4 m hohen Säulen auftretenden Schalungsdrücke" - Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 96, (1941), S. 81 - 87.
14. Muhs, H. "Zum Schalungsdruck des Betons" - Beton- und Stahlbeton 50 (1955), H. 6, S. 158 - 163.
15. Hoffmann, R. "Der Schalungsdruck von frischem Beton" - Beton- und Stahlbeton 42 (1943), H. 17/18, S. 130 - 134.
16. Gaede, K. Zuschrift zu Hoffmann: "Der Schalungsdruck von frischem Beton" - Beton- und Stahlbetonbau 43 (1944), H. 15/16, S. 95 - 96.
17. Drechsel "Die Gleitschalung", Berlin 1950.
18. Toussaint, F. "Schalungsdruck bei großen Betonkörpern" - Österreichische Bauzeitschrift, 5. (1950), H. 1, S. 11 - 13.
19. Macklin, Ch. "Pressure of plastic concrete in forms" - Proceedings of the Society for experimental stress analysis. Vol. IV, Nr. 1, (1946), S. 112 - 123.

20. Guerrin, A. "La poussée exercée par le beton frais sur les coffrages" - La technique des travaux, 26. Jhg. 1950, S. 309 - 320.
21. Rodin, St. "Pressure of Concrete on Formwork" - Proceedings of the Institute of Civil Engineering, Vol. 1 (Nov. 1952) S. 709 - 746.
22. Maxton, H.P. "Wood Panel Forms for Building Concrete Dams" - Construction Methods, Vol. 22, (Juni 1940), S. 42 u. f.
23. Schjødt, R. "Calculation of Pressure of Concrete on Forms" - Proceedings American Society of Civil Engineers, Vol. 81, Nr. 680 und 924, Mai 1955.  
"Schalungsdruck des Betons und Porenwasserdruck" - Beton- und Stahlbetonbau, 51 (1956), H. 11, S. 241 - 243.  
"Betongs sidetrykk mot forskalning" - Teknisk Ukeblad 98 (1951), H. 31.
24. Terzaghi, K. "Soil Mecanics in Engineering Practice" - New York 1948.
25. Olsson, G. "Betongs sidetrykk mot foskalningsvegg" - Teknisk Ukeblad, 100 (1953), H. 8, S. 140 - 148.
26. Kahn, L.-I. "Évolution des coffrages" - Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics - Nr. 77, Mai 1954, S. 405 - 419.
27. Muhs, H. "Messung des Schalungsdrucks an einem Massenbetonkörper" - Beton- und Stahlbetonbau 46 (1951), H. 7, S. 150.
28. ACJ-Committee 622 (H. Ellsberg) "Formwork for Concrete" - Journal of the American Concrete Institute, Vol. 57, 1961, März 1961, S. 993 - 1040.
29. Cementbulletin Hrsg. d. Technische Forschungs- und Beratungsstelle der E.G. Portland Wildegg, Mai 1959, Jahrgang 27, Nr. 17.
30. Betonvereniging (Niederlande) "Richtlijnen voor het trillen von beton - N 3051 - Juli 1955 (Centraal Normalisatiebureau)
31. van Eyle, A.J.M., Boersma, L. "Gemeten beton speciedruk op een wandbekisting" - Cement 1959/3, S. 262 - 266.
32. Uspenskij, V.P. "Über den Schalungsdruck von Frischbeton" in Trudy Leningrad. Politechn. Inst. 1960, Nr. 208, S. 321 - 327.
33. Adam, M. "Emploi des pannaux de fibres de bois comme coffrage" - Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, No 161, Mai 1961, S. 554.
34. Witte, A.M. "Les facteurs qui influent sur la poussée laterale exercée par le béton frais sur les parois du coffrage" - Béton armé, 5. Jhg. 1961, Nr. 32, S. 24 - 30, Nr. 33, S. 23 - 27.
35. Ritchie, A.G.B. "The pressures developed by concrete on formwork" - Civil Engineering and Public works Review, July 1962, S. 885 - 888, August 1962, S. 1027 - 1030.
36. L'Hermite, R. "La vibration du béton frais" - Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des travaux Publics - Nr. 11, Febr. 1948.
37. Oefjord, A. "Fastheten hos mørtel og betong i avbindingsstadiet" - Oslo 1954, Tanum.

38. Nennig, E. "Les coffrages glissants mode de construction rapide" - Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics - Nr. 111 - 112, März - April 1957, ...S. 344 - 351 ...
39. Ritchie, A.G.B. "The triaxial testing of fresh concrete" - Magazine of Concrete Research, Vol. 14, Nr. 40, März 1962, S. 37 - 42.
40. Kühl, H. "Zement - Chemie" - Verlag Technik, Berlin 1952, Bd. III.
41. Würzner, K. "Adhäsion, Kapillarität und Erhärtung von Zement" - Zement 1934, S. 572 - 575.  
"Vakuumbildung im Beton" - Zement 1940, S. 75 - 78.
42. Francmanis, P. "Die Rauminhaltsänderung und Vacuumbildung im Beton während des Abbin- dungs- und Erhärtungsprozesses von Portlandzement" - Zement 1939, S. 299 u. S. 318.
43. Czernin, W. "Über die Schrumpfung des erhärtenden Zementes" - Betonsteinzeitung 1956, S. 525 - 530.
44. Spindel, M. "Über die Schwindung des Zements im Beton" - Beton und Eisen 1936, Heft 15.
45. Gaede, K. "Nochmals: Der Einfluß der Zementbeschaffenheit auf die Herstellung von Schleuderbeton" - Betonstein-Zeitung, Heft 4/1962, S. 208 - 209.
46. Glötzl, F. "Ein neues hydraulisches Fernmeßverfahren für mechanische Spannungen und Drücke" - Archiv für Technisches Messen, Lieferung 256, Februar 1958, S. R 21 - 23.
47. Weinhold, J. und Lücke, H. "Die druckverteilende Wirkung und die Herstellung von mit Edelsplitt ver- füllten Rüttelschotter-Tragschichten" - Straße und Autobahn 9 (1958) H. 7, S. 254 - 262.  
"Zur Messung der Druckverteilung in Straßenbefestigungen" in "Zehn Jahre Niedersächsisches Materialprüfamt", Hermann Hübener Verlag Goslar 1959, S. 108 - 119.
48. Lindner, A. "Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure" - Basel, Birkhäuser-Verlag 1960.
49. Plath, E. "Die Betriebskontrolle in der Spanplattenindustrie" - Springer-Verlag Berlin 1963.