

Schalungsdruck des Betons und Porenwasserdruck

Von Dr. techn. Rolf Schjöd, Oslo

DK 624.057.5 Schalungen für Bauwerke in Beton

Der Schalungsdruck des frischen Betons hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Zuerst denkt man an Konsistenz, Steiggeschwindigkeit und Erstarrungszeit des Betons, und dann weiter an die „Silowirkung“ der Schalung. Diese Faktoren sind es dann, die in den vielen Gleichungen, mit denen man den Schalungsdruck berechnen wollte, benutzt worden sind.

Keine von den Gleichungen aber hat allgemeine Anerkennung gewonnen, keine hat unter all den verschiedenen Verhältnissen der Praxis stets richtige Ergebnisse gebracht.

Wenn man eine 15 cm dicke Stahlbetonwand mit üblicher Schalung aus Brettern ohne Nut und Feder baut, bleibt der gemessene Schalungsdruck, bei normaler Füllungsgeschwindigkeit, unter 0,80 t/m². Wenn diese Wand jedoch mit dichter Sperrholzschalung gemacht wird, sonst aber alles gleich ist, kann man über 2,00 t/m² messen.

Wie erklärt sich dieser große Unterschied? Die bekannten Gleichungen ergeben doch nur wenig abweichende Werte, herrührend von den verschiedenen Reibungskoeffizienten der Schalung.

Die Antwort auf diese Frage gibt die Bodenmechanik. Wie bekannt [1.] kann man die Gleichung für den waagerechten Druck einer kohäsionsfreien Masse schreiben:

$$p = (h\gamma - h_w\gamma_0)\lambda_1 + h_w\gamma_0 = h\gamma\lambda_1 + h_w\gamma_0(1 - \lambda_1) \quad (1)$$

Hier sind γ und γ_0 die Raumgewichte der Mischung und des Wassers, h die Tiefe unter der Oberfläche und h_w die Höhe des Porenwasserspiegels. $\lambda_1 = \text{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)$.

Frischer Beton ist eine im wesentlichen kohäsionsfreie lose Masse mit innerer Reibung; die Gl. (1) kann daher angewandt werden. Der Verfasser hat im Norwegischen Institut für Bauforschung Untersuchungen durchgeführt, um die Bedeutung der Kohäsion im Beton zu finden [2]. Es zeigt sich, daß diese für den Schalungsdruck gering ist.

Das Neue hier für die Berechnung des Schalungsdrucks, und scheinbar für die Betontechnologie überhaupt, ist der Begriff des Porenwasserdruckes. Dieser Begriff, der auch für andere Eigenschaften des Betons von Interesse ist, wird später näher erörtert werden; vorläufig wird nur auf Bild 4 bis 7 hingewiesen. Im Bild 4 sieht man, wie der Porenwasserdruck bei dünner Wand und ziemlich undichter Schalung schnell absinkt. An der Meßstelle ist er einmal kurz auf 1,80 m Wassersäule gestiegen, aber sehr schnell wieder abgesunken. Bild 5 bis 7 zeigen den ganz anderen Verlauf des Porenwasserdruckes bei dichter Schalung.

Diese Messungen erklären die sehr verschiedenen Schalungsdrücke, die gefunden worden sind, und die nicht mit den gewöhnlichen Gleichungen erhalten werden können.

Um aber weiterzukommen, muß die Gl. (1) den besonderen Eigenschaften des Betons angepaßt werden (s. Bild 1).

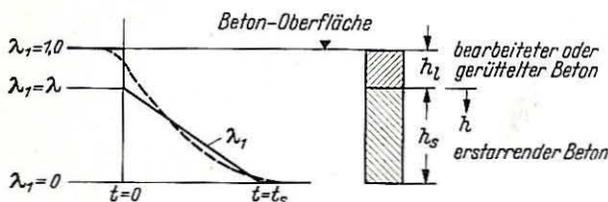


Bild 1. Veränderlichkeit von λ_1 mit der Zeit

Der frische Beton wird zuerst gerüttelt oder anderswie verdichtet. Während dieser Zeit muß er als Flüssigkeit betrachtet werden, ($\gamma_1 = 1$). Nach und nach kommt der Beton zur Ruhe und muß dann als Masse mit einer gewissen inneren Reibung angesehen werden. Sobald das Erstarren anfängt ($t = 0$), stellt sich der Reibungswinkel φ und damit λ_1 mit der Zeit veränderlich ein; für erstarrten Beton ist $\varphi = 90^\circ$, $\lambda_1 = 0$. Während der Erstarrungszeit wächst natürlich auch die Kohäsion; sie ist aber, wie früher erwähnt, in dem Zeitraum, während dessen der Schalungsdruck am größten ist, noch unbedeutend.

Um die Verhältnisse mathematisch zu erfassen, sollte man eigentlich die Tiefe bis h_1 (Bild 1), wo $\varphi = 0$ ist, besonders behandeln. Dies wurde auch in des Verfassers Arbeit [2] getan. (Die Bilder 1 bis 5 und 7 sind früher in „Proceedings ASCE“ veröffentlicht.) Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, daß dies eine unnötige Verfeinerung ist, und daß der Schalungsdruck mit genügender Genauigkeit ohne Rücksicht auf die Bearbeitungstiefe erfaßt werden kann. Diese wirkt sich nämlich in der Porenwasserhöhe aus und kann dort mitgerechnet werden.

Wie legen (Bild 1) eine Gerade zwischen $\lambda_1 = \lambda$, $t = 0$ und $\lambda_1 = 0$, $t = t_s$, als Annäherung an die wahrscheinliche (gestrichelte) Kurve. Andere Kurven, zum Beispiel eine Sinus-Kurve, geben vielleicht eine bessere Annäherung, aber die Rechnung zeigt, daß der Unterschied der berechneten Drücke, für alle sinnvollen Kurven, klein ist.

Wir schreiben also

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

Hierin ist $h_s = vt_s$ [der Abstand des Aufpunktes von der Oberfläche, wenn der Beton im Aufpunkte gerade erstarrt ist (mit $h_1 = 0$) und λ ist der Wert von λ_1 für $t = 0$; v ist die Steiggeschwindigkeit des Betons in der Schalung.

Weiter setzen wir $h_w = \chi h$ und können für (1) schreiben:

$$p = \left[(\gamma - \chi\gamma_0)\lambda \left(1 - \frac{h}{h_s}\right) + \gamma_0\chi \right] h \quad (2)$$

Den Größtwert von p finden wir durch Ableitung von (2):

$$p_m = \frac{1}{4} [\gamma\lambda + \gamma_0\chi(1 - \lambda)] \left(1 + \frac{\chi}{\lambda} \frac{\gamma_0}{\gamma - \gamma_0\chi}\right) h_s \quad (3)$$

Für $\chi = 0$ und $\lambda = 1$ finden wir $p_m = \frac{1}{4} \gamma h_s$, eine Faustformel, die für die Berechnung des Schalungsdruckes viel gebraucht worden ist.

Die Gl. (3) ist gut brauchbar für die Berechnung des Schalungsdruckes, wenn die „Silowirkung“ ohne Bedeutung ist. Um diese Wirkung in Rechnung zu stellen, haben viele Verfasser deren Exponentialgleichung benutzt, ohne zu bemerken, daß diese auf zeitlich gleichbleibendem Reibungswinkel aufbaut und darum hier unbrauchbar ist. Um eine Gleichung für die „Silowirkung“ zu entwickeln, setzen wir (s. Bild 2):

$$d p_v F = \gamma_1 F d h - p_1 U d h \text{ tg } \varphi_1$$

p_1 ist der waagerechte Druck ohne Porenwasserdruck, $\gamma_1 = \gamma - \lambda_0\chi$, F und U sind Querschnitt und Umrandung des Horizontalquerschnittes.

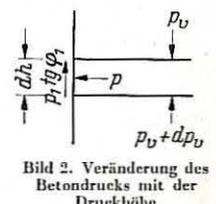


Bild 2. Veränderung des Beton-drucks mit der Druckhöhe

Wir setzen $\frac{F}{U} = R$, und finden

$$\frac{d p_v}{d h} = \gamma_1 - \frac{\text{tg } \varphi_1}{R} p_1 = \gamma_1 - \frac{\text{tg } \varphi_1}{R} \cdot \frac{p_1}{F_v} \cdot p_v \quad (4)$$

Janssen und Koenen haben in ihren Aufsätzen [3] [4], auf denen alle späteren Aufsätze über Silodruck aufzubauen scheinen, geschrieben:

$$\frac{p_1}{F_v} = \lambda,$$

also ein gleichbleibendes Verhältnis zwischen waagrechttem und senkrechttem Druck angenommen. Aus (4) bekommt man dann die bekannte Exponentialgleichung.

Für erstarrenden Beton ist dies offenbar nicht richtig. Wir setzen statt dessen [siehe (1)]:

$$\frac{p_1}{F_v} = \lambda \left(1 - \frac{h}{h_s}\right), \quad (5)$$

und bekommen aus (4)

$$\frac{d p_v}{d h} = \gamma_1 - \frac{a}{h_s} \left(1 - \frac{h}{h_s}\right) p_v, \quad (6)$$

mit $a = \lambda \text{tg } \varphi_1 \frac{h_s}{R}$.

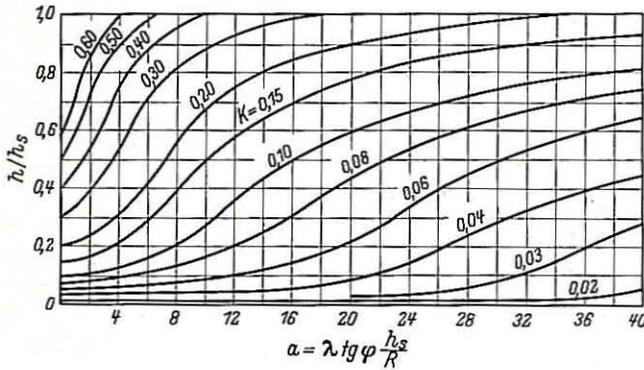


Bild 3. Diagramme für K

Die Lösung von (6) ist

$$F_v = \gamma_1 K h_s, \quad (7)$$

worin $K = e^{\frac{a}{2} \left(1 - \frac{h}{h_s}\right)^2} \sqrt{\frac{2}{a}} \int_0^{\frac{a}{2}} e^{-h^2} d h \cdot \sqrt{\frac{a}{2} \left(1 - \frac{h}{h_s}\right)}$

Der Zahlenwert von K kann aus Bild 3 entnommen werden.

Endlich bekommen wir aus (5) und (7), wenn wir wieder den Porenwasserdruck hinzufügen:

$$p = \gamma_1 \lambda h_s K \left(1 - \frac{h}{h_s}\right) + \gamma_0 h_w. \quad (8)$$

Für die Fälle, in denen (2) und (3) nicht brauchbar sind, gibt (8) den Schalungsdruck.

Wenn man die Veränderung des Schalungsdruckes mit der Zeit, zum Beispiel während Betonierpausen, berechnen will, kann man t/t_s statt h/h_s in Gl. (8) schreiben.

Nach den Gleichungen (2) und (8) erreicht der Schalungsdruck einen Größtwert, sinkt dann ab und erreicht bei $t = t_s$ den Wert 0 (h_w wird später behandelt). Theoretisch muß dies natürlich so sein, denn erstarrter Beton übt keinen Seitendruck aus, ebensowenig wie andere feste Körper.

Auch in der Praxis findet man es in der Regel so, da sich der Beton beim Erstarren zusammenzieht und

die Schalung etwas nachgibt, so daß man die Schalung nach dem Erstarren spannungsfrei findet.

Aber bei erdfeuchtem Beton, steifer Schalung und großer Betoniergeschwindigkeit kann es vorkommen, daß die Schalung noch bei $t = t_s$ etwas unter Spannung steht, weil ihre Nachgiebigkeit nicht genügt hat, um den Druck wieder bis 0 abnehmen zu lassen. An der Theorie ändert dies nichts; es zeigt nur, daß die Schalung durch den Druck „vorgespannt“ wurde und später einen „passiven“ Schalungsdruck am Beton ausübt. Aber auch praktisch hat es im allgemeinen keine Bedeutung, da die Schalung für den Größtdruck bemessen werden muß, der in dem geschilderten Falle nicht verändert wird.

Der Reibungswinkel φ in den obigen Gleichungen liegt im allgemeinen zwischen 20° und 30° , kann aber für erdfeuchten Beton bis auf 35° steigen. φ_1 ist für ungehobelte Schalungsbretter gleich φ , und für glattere Schalung gleich $\varphi/2$ bis $\varphi/3$. Für glatte, geölte Schalung sind Werte bis zu 5° herunter gefunden worden.

Auskünfte über die Erstarrungszeit t_s finden wir bei Öfjord [5]. Wie sehen, daß die Temperatur und die Zementgüte wichtig sind, daß aber der Wasser-Zement-Wert und die Art und Körnung der Zuschläge wenig Bedeutung haben. Die Zeit t_s , nach der der Beton praktisch erstarrt ist, ist gewöhnlich 4 Stunden für normalbindenden Zement und Temperaturen über 10°C , aber bei 5°C müssen wir schon mit 6 Stunden rechnen. Einige Zemente sind langsamer, so daß t_s auch bei gewöhnlichen Temperaturen 5 bis 6 Stunden erreichen kann. Rechnet man bei gewöhnlicher Witterung mit 5 Stunden, ist man im allgemeinen auf der sicheren Seite.

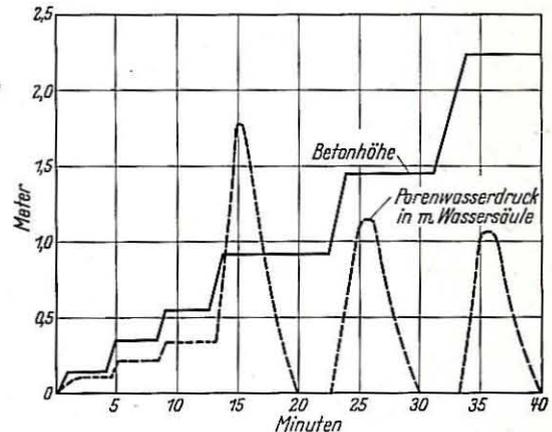


Bild 4. Porenwasserdruck in frischem Beton. 17-cm-Wand, ziemlich undichte Schalung, mit senkrechten Brettern ausgeführt. Sehr weicher Beton, nicht gerüttelt

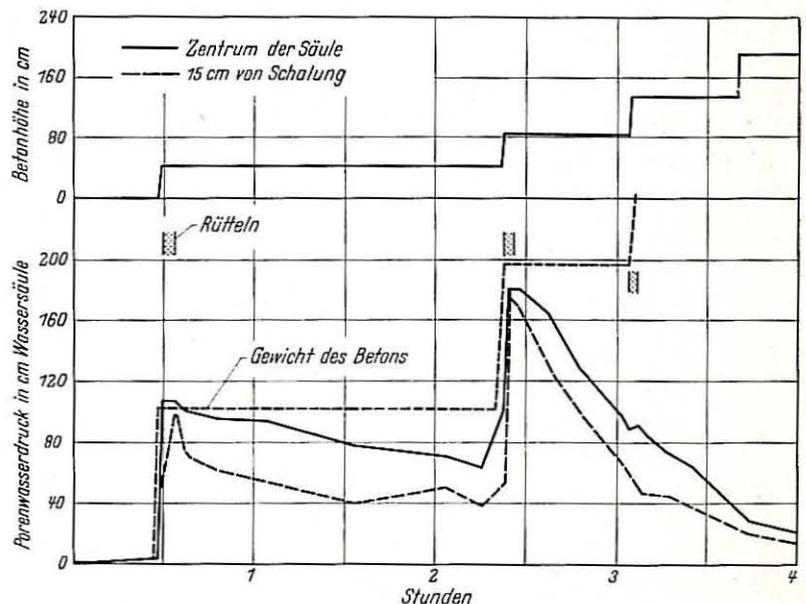


Bild 5. Porenwasserdruck in 100×100 cm-Säule. Gerüttelter Beton, B 300, $w/z = 0,5$

Der Porenwasserdruck im frischen Beton ist, soweit es dem Verfasser bekannt ist, bisher nicht gemessen worden. Der Verfasser hat daher mehrere Messungen auf Baustellen und in der Versuchsanstalt durchgeführt; Bild 4 bis 7 geben einige Beispiele von Porenwasserdruck-Messungen wieder.

Für dünne Wände und undichte Schalung ohne Nut und Feder zeigen die Messungen, daß der Porenwasserstand nicht über 30 ... 50 cm steigt, auch wenn der Beton sehr naß ist. Dies gilt nicht für gerüttelten Boden. Wenn gerüttelt wird, muß man damit rechnen, daß die oberen 60 ... 120 cm des Betons Flüssigkeitsdruck ausüben, und die entsprechende Druckhöhe als Porenwasserdruck einsetzen.

Wenn die Schalung dichter ausgeführt wird, findet man einen größeren Porenwasserdruck, und zwar sehr abhängig vom Wassergehalt des Betons. Er kann schwanken zwischen $h(1 - t/3)$ und $h(1 - t)$, mit t in Stunden gemessen, und selbstverständlich mit Gültigkeit nur für $t < 3$ Stunden bzw. 1 Stunde.

Auch hier muß 60 ... 120 cm Betongewicht als Flüssigkeitsdruck zugelegt werden, wenn gerüttelt wird.

Viele Beobachtungen können an den Porenwasser-Kurven gemacht werden. So sehen wir im Bild 5, daß die Rüttelung praktisch keine Wirkung ausübt, wenn der Beton 1,30 m über dem Aufpunkt steht. Bei einer anderen Messung, Bild 6, sind Ausschläge noch bei 1,60 m Höhe gefunden worden. In beiden Fällen ergibt das Rütteln nach ungefähr 3 Stunden keinen Ausschlag mehr.

Interessant ist, daß man bei erdfuchtem Beton nach einer gewissen Zeit negativen Porenwasserdruck findet, wie man es im Bild 7 sehen kann. Dies steht wahrscheinlich in Zusammenhang mit dem Schrumpfen des Betons beim Erstarren; Messungen, die noch nicht abgeschlossen sind, deuten weiter an, daß eine Wechselbeziehung zwischen Betonfestigkeit und Porenwasserdruck besteht.

Betrachten wir jetzt als Beispiel die anfangs erwähnte 15 cm dicke Wand mit 10 cm breiten, waagerechten Schalungsbrettern ohne Nut und Feder. Es wird nicht gerüttelt, der Porenwasserdruck wird zu 0,50 m angenommen:

Wir nehmen $v = 3,0$ m/std und $t_s = 4$ std an, weiter $\varphi = \varphi_1 = 20^\circ$, und finden

$$\lambda = \operatorname{tg}^2(45^\circ - 10^\circ) = 0,5, \quad \operatorname{tg} \varphi_1 = 0,36,$$

$$R = \frac{0,15}{2,0} = 0,075, \quad a = 0,5 \cdot 0,36 \frac{12}{0,075} = 28,8.$$

Für $h = 2,5$ m erhalten wir nach Gl. (8) mit:

$$\chi = \frac{0,5}{2,5} = 0,2, \quad \gamma_1 = 2,4 - 0,2 = 2,2 \text{ t/m}^2,$$

$$\frac{h}{h_s} = \frac{2,5}{12} = 0,21, \quad K = 0,037 \text{ (s. Bild 3),}$$

$$p = 2,20 \cdot 0,5 \cdot 12 \cdot 0,037 (1 - 0,21) + 0,5 = 0,89 \text{ t/m}^2.$$

Tragende Betonwände werden in Norwegen viel im Wohnungsbau verwendet. Ihre Schalungen werden im allgemeinen mit Bandeisen in solchen Abständen zusammengehalten, daß die Bandeisen schon bei einem Schalungsdruck von $0,80 \text{ t/m}^2$ fließen würden.

Untersuchen wir nun eine mit der gleichen Betonmischung gefüllte, aber mit glatter und dichter Schalung, z. B. mit Sperrholzplatten ausgeführte Wand.

Wir haben jetzt $\varphi = \frac{\varphi}{2} = 10^\circ$, damit werden $\operatorname{tg} \varphi_1 = 0,176$ und

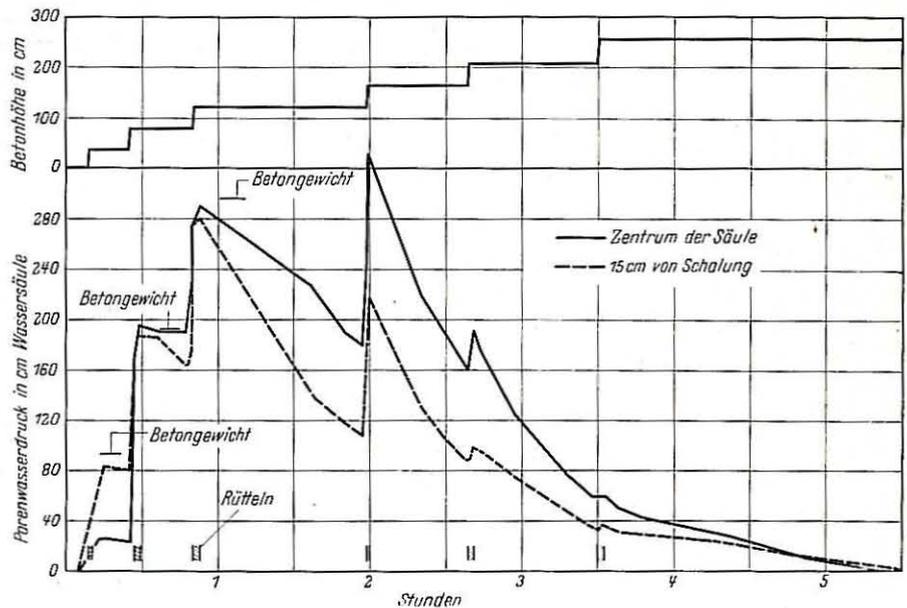


Bild 6. Porenwasserdruck in 95×95 cm-Säule. Gerüttelter Beton, B 300, $w/z = 0,5$

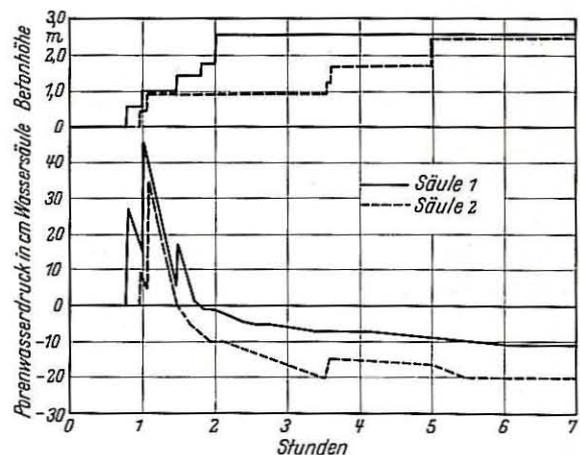


Bild 7. Porenwasserdruck in 50×50 cm-Säule. Nicht gerüttelt. $270 \text{ kg Zement/m}^3$, „Darex AEA“ zugesetzt, $w/z = 0,83$

$a = 14,1$, weiter haben wir für $h = 2,5$ m, $t = \frac{2,5}{3,0} = 0,83$ std,

$$h_{10} = 2,5 \left(1 - \frac{0,83}{3}\right) = 1,81 \text{ m} \left[\text{Porenwasserdruck aus } h \left(1 - \frac{t}{3}\right) \right],$$

$$\chi = \frac{1,81}{2,50} = 0,72, \quad \gamma_1 = 1,68, \quad K = 0,072 \text{ (s. Bild 3) und somit}$$

$$p = 1,68 \cdot 0,5 \cdot 12 \cdot 0,072 (1 - 0,21) + 1,81 = 2,38 \text{ t/m}^2.$$

Der große Unterschied des Schalungsdrucks rührt, wie man sieht, hauptsächlich von dem Unterschied im Porenwasserdruck her. Mit den vorgetragenen Überlegungen ist es jetzt leicht, in den verschiedenen Fällen sichere Werte für die oben benutzten Materialkonstanten zu wählen und den Schalungsdruck zu berechnen.

Schrifttum:

- [1] Terzaghi, Soil Mechanics in Engineering Practice. New York 1948.
- [2] Schjöd, Calculation of Pressure of Concrete on Forms. Proceedings, American Society of Civil Engineers, No. 680 und 924, Mai 1955.
- [3] Janssen in Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 1895.
- [4] Könen in Zentralblatt der Bauverwaltung, 1896.
- [5] Öfjord, Fastheten hos mørtel og betong i avbindingsstadiet. Oslo 1954, Verlag Tanum.

Eine sehr vollständige Schriftumsangabe findet der Leser in: Literaturzusammenstellung über Schalungsdruck, Stuttgart 1955, Deutsches Bauzentrum, Dokumentationsstelle für Bautechnik, und in: Pressure of Concrete on Formwork. London 1953. Cement and Concrete Association, Library Record.