

- dem **Nachweis der Biegefestigkeit** und
- der **Berechnung der Durchbiegungen**, die für den Nachweis der Ebenheitstoleranzen erforderlich sind.

Darüber hinaus ist es für Lasteinleitungspunkte oft notwendig, die **Holzpressung** nachzuweisen.

Bei der Bemessung von konventionellen Schalungen und Gerüsten ist es in der Regel nicht angemessen, mit komplizierten statischen Systemen zu rechnen, sondern die Konstruktionen werden im Allgemeinen in einzelne Teilsysteme zerlegt. Für jedes Teilsystem wird dabei ein einfaches, auf der sicheren Seite liegendes statisches System angenommen. Soweit möglich und sinnvoll, wird mit dem System des **Einfeldträgers** als statisch bestimmtem System gerechnet. In den Fällen, in welchen diese Annahme nicht auf der sicheren Seite liegt, wird dann das **ungünstigere System** angenommen.

Für den **Nachweis der Schubfestigkeit** liegt der ungünstigste Fall am Mittelaufleger eines **Zweifeldträgers**, welcher ein statisch unbestimmtes System darstellt. Dort sind die Querkräfte und damit die Auflagerkraft vergleichsweise größer als diejenigen bei allen anderen statischen Systemen. Somit empfiehlt es sich, die Querkraft zunächst mit

$$V_{r,d} = 1,25 \cdot \frac{E_d \cdot \ell}{2} \quad (2.18)$$

zu berechnen. Damit liegt die Berechnung für alle denkbaren Fälle immer auf der sicheren Seite.

Der **Nachweis der Biegefestigkeit** und die Berechnung der Durchbiegungen finden ihren ungünstigsten Fall im statischen System des Einfeldträgers, sodass für die einzelnen statischen Nachweise unterschiedliche statische Systeme entsprechend **Tabelle 2.2** angenommen werden können.

Sofern genauere Berechnungen erforderlich sind, kann jederzeit das genau zutreffende statische System angewendet werden.

Tabelle 2.2 Statische Nachweise und statisches System

Statischer Nachweis	Statisches System auf der sicheren Seite
Schubnachweis V_d	Zweifeldträger
Biegnachweis M_d	Einfeldträger
Durchbiegungen w	Einfeldträger

2.4 Frischbetondruck

Die Schalhaut muss den Frischbetondruck aufnehmen und über die Unterkonstruktion abtragen können. In DIN 18218 „Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen“ wird die Frischbetonwichte mit $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ angegeben. Nach DIN 1055 Teil 1 „Lastannahmen“ werden für Beton folgende Wichten vorgegeben:

- Stahlbeton $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$
- Zuschlag für Frischbeton $\gamma_z = 1 \text{ kN/m}^3$
- insgesamt $\gamma_b = 26 \text{ kN/m}^3$

Frischbetonwichte

$\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ nach DIN 18218: „Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen“.

$\gamma_b = 26 \text{ kN/m}^3$ nach DIN 1055 Teil 1 „Lastannahmen“ für vertikale Lasten auf horizontale und geneigte Schalungen.

Diese Werte gelten für vertikale Lasten auf horizontale und geneigte Schalungen.

2.4.1 Bemessungswert des Frischbetondrucks

Für Schalungen und Gerüste einschließlich Anker wird gemäß DIN 18218 der Frischbetondruck als charakteristischer Wert der Einwirkung σ_{hk} angegeben. Für die Bemessung von Schalungskonstruktionen und deren Abstützungen und Verankerungen wird der Frischbetondruck als ruhende Last betrachtet.

Bei der Bemessung von Schalungen, Gerüsten und Ankern ist als Bemessungswert

$$\sigma_{hd} = \gamma_F \cdot \sigma_{hk} \quad (2.19)$$

zugrunde zu legen. Der **Teilsicherheitsbeiwert** γ_F kann DIN EN 12812 „Traggerüste“ entnommen werden. Für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit beträgt er bei ungünstiger Einwirkung 1,5, aber er sollte bei ungünstiger Wirkung des Frischbetondrucks mit 1,0 verwendet werden.

Der Teilsicherheitsbeiwert ist nach DIN EN 12812 „Traggerüste“ $\gamma_F = 1,35$ für Eigenlast und $\gamma_F = 1,5$ für sonstige Einwirkungen. Dies entspricht dem Teilsicherheitsbeiwert nach DIN 1052 „Holzbauwerke“ mit $\gamma_F = 1,35$ für ständige Lasten und $\gamma_F = 1,5$ für veränderliche Lasten.

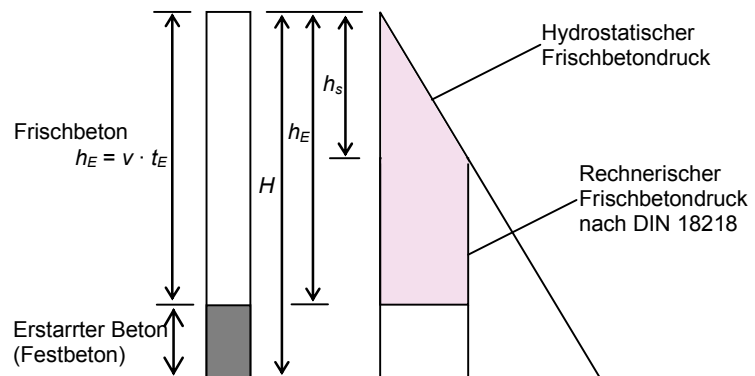


Bild 2.1 Verteilung des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe gemäß DIN 18218

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist für die Bemessung einer Schalung mit der Höhe H die ungünstigste Laststellung des Frischbetondruck-Verteilungsdiagramms nach *Bild 2.1* nach DIN 18218 in Abhängigkeit des Betonspiegels maßgebend. Der Verlauf des Frischbetondrucks ist über die Höhe h_E anzunehmen zu

$$h_E = v \cdot t_E \quad (2.20)$$

mit der Steiggeschwindigkeit v und dem **Erstarrungsende** t_E . Bei einer Schalungshöhe $H > h_E$ tritt die Frischbetondruckverteilung als Wanderlast über die Schalungshöhe auf.

2.4.2 Charakteristischer Wert des Frischbetondrucks

Die Berechnung der charakteristischen Werte des maximal möglichen Frischbetondrucks $\sigma_{hk,max}$ für verschiedene Steiggeschwindigkeiten und Konsistenzklassen ist auf der Grundlage der Angaben in *Tabelle 2.3* möglich. Dabei sind für die einzelnen Konsistenzklassen die zugehörigen Koeffizienten A_n , B_n und C_n nach *Tabelle 2.3* in die *Gleichungen 2.24 und 2.25* einzusetzen.

Tabelle 2.3 Charakteristische Werte des maximalen horizontalen Frischbetondrucks $\sigma_{hk,max}$ (Betoneinbau gegen die Steigrichtung) nach DIN 18218 Tabelle 1

Konsistenzklasse (alte Bezeichnungen)	Maximaler horizontaler Frischbetondruck bei Einbau gegen die Steigrichtung (von oben) $\sigma_{hk,max} = (A_n \cdot v + B_n) \cdot K1$ [kN/m ²]
F1 (steif, KS, K1)	$(5 \cdot v + 21) \cdot K1 \geq 25$
F2 (plastisch, KP, K2)	$(10 \cdot v + 19) \cdot K1 \geq 25$
F3 (Regelkonsistenz, KR, K3)	$(14 \cdot v + 18) \cdot K1 \geq 25$
F4 (Fließbeton, KF)	$(17 \cdot v + 17) \cdot K1 \geq 25$
	$\sigma_{hk,max} = C_n \cdot v \cdot K1$ [kN/m ²]
F5	$44 \cdot v \cdot K1 \geq 30$
F6	$62,5 \cdot v \cdot K1 \geq 30$
SVB	$52,5 \cdot v \cdot K1 \geq 30$
v	Steiggeschwindigkeit (Betoniergeschwindigkeit [m/h])
$K1$	Faktor zur Berücksichtigung des Erstarrungsverhaltens nach <i>Tabelle 2.4</i>

Der Einfluss des **Erstarrungsverhaltens** auf den Frischbetondruck ist über das Erstarrungsende t_E nach *Tabelle 2.4* zu berücksichtigen.

Erstarrungsende t_E

Für Betone einer Festigkeitsklasse von mindestens C20/25, ohne Verwendung von Verzögerern gilt:

$t_E = 5$ Stunden gilt für Betone

- mit schneller Festigkeitsentwicklung nach DIN EN 206-1 und Betontemperaturen über 15 °C
- mit mittlerer Festigkeitsentwicklung bei Betontemperaturen über 20 °C

$t_E = 7$ Stunden gilt für Betone

- mit schneller Festigkeitsentwicklung nach DIN EN 206-1 und Betontemperaturen über 10 °C
- mit mittlerer Festigkeitsentwicklung bei Betontemperaturen über 15 °C

Tabelle 2.4 Faktoren K_1 zur Berücksichtigung des Erstarrungsverhaltens gemäß DIN 18218 Tabelle 2

	Faktoren K_1			
	Erstarrungsende			Allgemein ^{b)}
	$t_E = 5$ h	$t_E = 10$ h	$t_E = 20$ h	
F1 ^{a)}	1,0	1,15	1,45	$1 + 0,03 \cdot (t_E - 5)$
F2 ^{a)}	1,0	1,25	1,80	$1 + 0,053 \cdot (t_E - 5)$
F3 ^{a)}	1,0	1,40	2,15	$1 + 0,077 \cdot (t_E - 5)$
F4 ^{a)}	1,0	1,70	3,10	$1 + 0,14 \cdot (t_E - 5)$
F5,F6, SVB	1,0	2,00	4,00	$t_E / 5$
a) gilt für Betonierhöhen bis 10 m				
b) gilt für $5 \text{ h} \leq t_E \leq 20 \text{ h}$; t_E in Stunden				

Darüber hinaus sind in Anhang B der DIN 18218 Bemessungsdiagramme für die charakteristischen Werte des maximalen Frischbetondrucks für ein Erstarrungsende t_E von 5 h, 7 h, 10 h, 15 h und 20 h enthalten.

Für die Gleichungen der *Tabelle 2.3* liegen folgende Annahmen zugrunde:

Tabelle 2.5 Umrechnungsfaktoren α , die Umrechnungsfaktoren gelten für die Umrechnung des Frischbetondrucks bei anderer Rohwichte als 25 kN/m^3

γ_c [kN/m ³]	α
10	0,40
14	0,56
18	0,72
22	0,88
25	1,00
26	1,04
30	1,20
40	1,60

- Die Frischbetonrohichte beträgt $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$.
- Das tatsächliche Erstarrungsende des in die Schalung eingebauten Frischbetons darf t_E nicht überschreiten.
- Der Frischbeton der Konsistenzklassen F1 bis F6 wird mit Innenrüttlern verdichtet.
- Die Schalung ist dicht.
- Die mittlere Steiggeschwindigkeit v beträgt bei Verwendung der Betone der Konsistenzklassen F1 bis F4 an jedem Punkt höchstens $7,0 \text{ m/h}$ und
- der Beton wird gegen die Steigrichtung, also von oben eingebracht.
- Bei Abweichungen der Einbautemperatur $T_{c, \text{Einbau}}$ des Frischbetons von der Referenztemperatur $T_{c, \text{Ref}}$, die dem Erstarrungsende t_E zugrunde liegt, um mehr als 1 K ist nach Abschnitt 5.3.2 der DIN 18218 der Frischbetondruck zu vermindern oder zu erhöhen.

Übersteigt die Frischbetontemperatur $T_{c, \text{Einbau}}$ beim Einbau des Betons die Referenztemperatur $T_{c, \text{Ref}}$, darf der Frischbetondruck $\sigma_{hk, \text{max}}$ für je 1 K Temperaturdifferenz um 3% vermindert werden, höchstens um 30% .

Ist die Frischbetontemperatur beim Einbau $T_{c, \text{Einbau}}$ niedriger als die Referenztemperatur $T_{c, \text{Ref}}$ oder kann eine höhere Frischbetontemperatur als $T_{c, \text{Ref}}$ nicht aufrechterhalten werden, muss $\sigma_{hk, \text{max}}$ bei den Konsistenzklassen F1, F2, F3 und F4 um 3% je 1 K Temperaturdifferenz und bei den

Konsistenzklassen F5, F6 und SVB um 5 % je 1 K Temperaturdifferenz vergrößert werden.

Wird der Beton wie bei selbstverdichtendem Beton (SVB) durch Pumpen von unten eingebaut, ist für $\sigma_{hk,max}$ mindestens der hydrostatische Frischbetondruck bezogen auf die Einfüllstelle anzusetzen. Die maximale Höhendifferenz zwischen der Einfüllstelle und dem oberen Betonspiegel sollte dabei 3,5 m nicht überschreiten. Der Betoniervorgang soll kontinuierlich erfolgen und nicht länger als eine Stunde dauern, mögliche Unterbrechungen sollten höchstens 10 Minuten dauern.

Der größtmögliche Wert ist in jedem Fall der hydrostatische Frischbetondruck $\sigma_{hk,max,hydr} = \gamma_c \cdot H$.

Bei Verwendung von **Leicht-** oder **Schwerbeton** ist der Frischbeton um die Faktoren gemäß *Tabelle 2.5* zu verringern oder zu erhöhen. Der Frischbetondruck wird dann mit dem Faktor α berechnet:

$$\alpha = \frac{\gamma_c}{25} \quad (2.21)$$

Die Berechnung des **Frischbetondrucks** nach DIN 18218 erfolgt in den folgenden Schritten:

- Festlegung des Betonierabschnitts für die maßgebliche Betonmenge. Maßgebend ist in der Regel derjenige Betonierabschnitt mit der geringsten Betonmenge, bei dem die Steiggeschwindigkeit am höchsten ist.
- Ermittlung der Betonmenge V_b ,
- Festlegung der Betonierleistung Q_b ,
- Berechnung der **Betonierdauer** T_b für den maßgebenden Betonierabschnitt:

$$T_b = \frac{\text{Betonmenge}}{\text{Betonleistung}} = \frac{V_b}{Q_b} \quad (2.22)$$

- Berechnung der **Steiggeschwindigkeit**:

$$v = \frac{\text{Höhe des Bauteils}}{\text{Betonierdauer}} = \frac{H}{T_b} \quad (2.23)$$

- Festlegung der Betonkonsistenz,
- Berechnung des maximalen Frischbetondrucks nach DIN 18218 „Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen“ nach den Formeln der *Tabelle 2.3* und den Faktoren $K1$ nach *Tabelle 2.4*:

Einflüsse auf den Frischbetondruck

Über das **Erstarrungsverhalten** hinaus wird der Frischbetondruck durch verschiedene Einflüsse erhöht oder vermindert:

- Frischbeton- und Außentemperatur
- Kühlen des Betons
- Verdichten
- Betonzusatzmittel und Betonzusatzstoffe
- Erschütterungen und die
- Bewehrung

$$\sigma_{hk,max} = (A_n \cdot v + B_n) \cdot K1 \geq 25 \quad (2.24)$$

für die Konsistenzen F1 bis F4 ($n = 1$ bis 4) und

$$\sigma_{hk,max} = C_n \cdot K1 \geq 30 \quad (2.25)$$

für die Konsistenzen F5, F6 und SVB ($n = 5; 6; SVB$).

- Berechnung der **hydrostatischen Druckhöhe**. Bei einer Frischbetonrohichte von $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ wird der maximale Frischbetondruck auf die Schalung bei folgender hydrostatischer Druckhöhe erreicht:

$$h_s = \frac{\sigma_{hk,max}}{\gamma_c} \quad (2.26)$$

Im folgenden *Übungsbeispiel 2.1* ist die Berechnung des maximalen Frischbetondrucks auf eine Wandschalung dargestellt.

Frischbetondruck auf eine Wandschalung

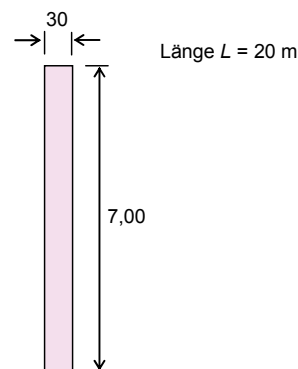


Bild 2.2 Beispiel: Frischbetondruck auf eine Wandschalung

Übungsbeispiel 2.1

Festlegung der Länge des Betonierabschnitts: $L = 20,0 \text{ m}$.

Ermittlung der Betonmenge V_b :

$$V_b = 0,3 \text{ m} \cdot 7,0 \text{ m} \cdot 20,0 \text{ m} = 42,0 \text{ m}^3$$

Festlegung der Betonierleistung: $Q_b = 20,0 \text{ m}^3/\text{h}$.

Berechnung der Betonierdauer T_b :

$$T_b = \frac{42,0 \text{ m}^3}{20,0 \text{ m}^3/\text{h}} = 2,1 \text{ h}$$

Berechnung der Steiggeschwindigkeit v :

$$v = \frac{7,0 \text{ m}}{2,1 \text{ h}} = 3,3 \text{ m/h}$$

Festlegung der Betonkonsistenz: F3.

Berechnung des maximalen Frischbetondrucks für Konsistenz F3:

$$\sigma_{hk,max} = (14 \cdot v + 18) \cdot K1 = (14 \cdot 3,3 + 18) \cdot 1,0 = 64,6 \text{ kN/m}^2$$

Berechnung der hydrostatischen Druckhöhe h_s :

$$h_s = \frac{64,6 \text{ kN/m}^2}{25,0 \text{ kN/m}^3} = 2,58 \text{ m}$$

Darstellung des Betondruckverlaufs über die Wandhöhe:

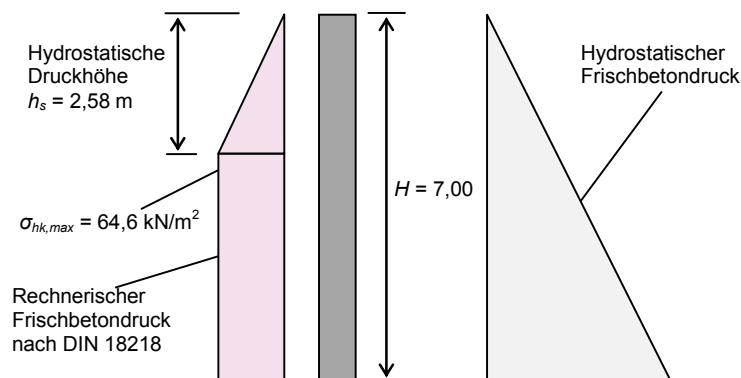


Bild 2.3 Betondruckverlauf

2.5 Nachweis der Ebenheitstoleranzen

Die Schalung muss zusammen mit ihrer Unterkonstruktion die geforderte **Ebenheit** der Betonoberfläche nach DIN 18202 „Toleranzen im Hochbau“ Tabelle 3 „Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen“ gewährleisten. Die Zeilen 1 bis 4 dieser Tabelle betreffen nicht geschalte Oberflächen von Decken und Böden einschließlich deren Beläge.

Für geschaltete Betonoberflächen kommen die Zeilen 5 bis 7 der Grenzwerte-Tabelle in DIN 18202 in Betracht. Als **Grenzwerte** werden hier Stichmaße s bezeichnet, die bei der Prüfung mit einer Richtlatte (Bild 2.4) bei entsprechenden **Messpunktabständen** m gemessen werden können. In **Tabelle 2.6** sind für die bei Schalungen maßgeblichen Messpunktabstände m die zugehörigen **Stichmaße** s der Zeilen 5 bis 7 wiedergegeben.

Die Prüfung der Ebenheitstoleranzen kann erst nach der Herstellung der Betonbauteile z.B. bei der **Abnahme** erfolgen. Eine Korrektur ist dann in der Regel nicht mehr möglich. Daher ist es sinnvoll, die Schalung schon von vornherein dafür zu bemessen. Erfahrungsgemäß sind die Anforderungen der DIN 18202 meist maßgebend gegenüber anderen Begrenzungen der Durchbiegung aus den Normen. Dies rührt daher, dass die Scha-

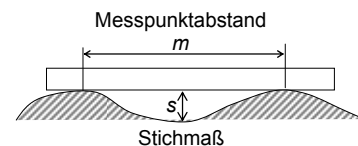


Bild 2.4 Messpunktabstand und Stichmaß bei der Prüfung mit einer Richtlatte