

Mechanische Eigenschaften des Festbetons

Druckfestigkeit des Festbetons

Allgemeines

Die Festigkeit ist die auf eine Fläche bezogene Widerstandskraft. Dementsprechend beschreibt die Druckfestigkeit die vom Beton ertragbare Druckbeanspruchung. Sie stellt die wesentliche, häufig sogar die einzige geforderte Eigenschaft eines Festbetons dar. Je nach Zusammensetzung des Betons kann die Druckfestigkeit sehr geringe Werte, ähnlich wie Ziegelstein oder Weichholz, oder sehr hohe Werte, vergleichbar mit üblichem Baustahl, erreichen (Tab. 3.8.1).

Material	Druckfestigkeit [N/mm ²]
Ziegelstein	20–30
Weichholz	30–50
Hartgestein	150–200
Mörtel	5–25
Beton	30–50
Hochfester Beton	50–110
Ultrahochleistungs- faserbeton	150–250

Tab. 3.8.1: Druckfestigkeit für die wichtigsten Baustoffe.

Die Druckfestigkeit eines Betons wird im Wesentlichen von den Eigenschaften des Zementsteins, der Gesteinskörnung und vom Verbund zwischen den Gesteinskörnern und dem Zementstein bestimmt (siehe auch [Anforderungen an Beton](#)). Bei geringem Verbund, z. B. durch die Verwendung ungewaschener Gesteinskörner, stellt diese Übergangszone eine Schwachstelle dar, die sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften des Betons auswirkt. Im Gegensatz dazu bewirken der Einsatz von gebrochener Gesteinskörnung oder die Verwendung von sehr feinen reaktiven Zementzusatzstoffen, wie Silikastaub oder gebranntem Schiefer, eine deutliche Verbesserung des Verbunds zwischen dem Gesteinskorn und dem Zementstein und damit eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des Betons (Abb. 2.1.5–2.1.7 unter [Gefüge des Zementsteins](#)). Für einen Beton mit hoher Festigkeit sind eine hohe Packungsdichte in der Übergangszone zwischen Gesteinskorn und Zementstein und die Verwendung von hochwertigen, druckfesten Gesteinskörnern unabdingbare Voraussetzungen (siehe auch [Hochfester Beton](#)). Neben der Betonzusammensetzung wird die Druckfestigkeit durch die Verarbeitung sowie die Nachbehandlung des Betons

beeinflusst.

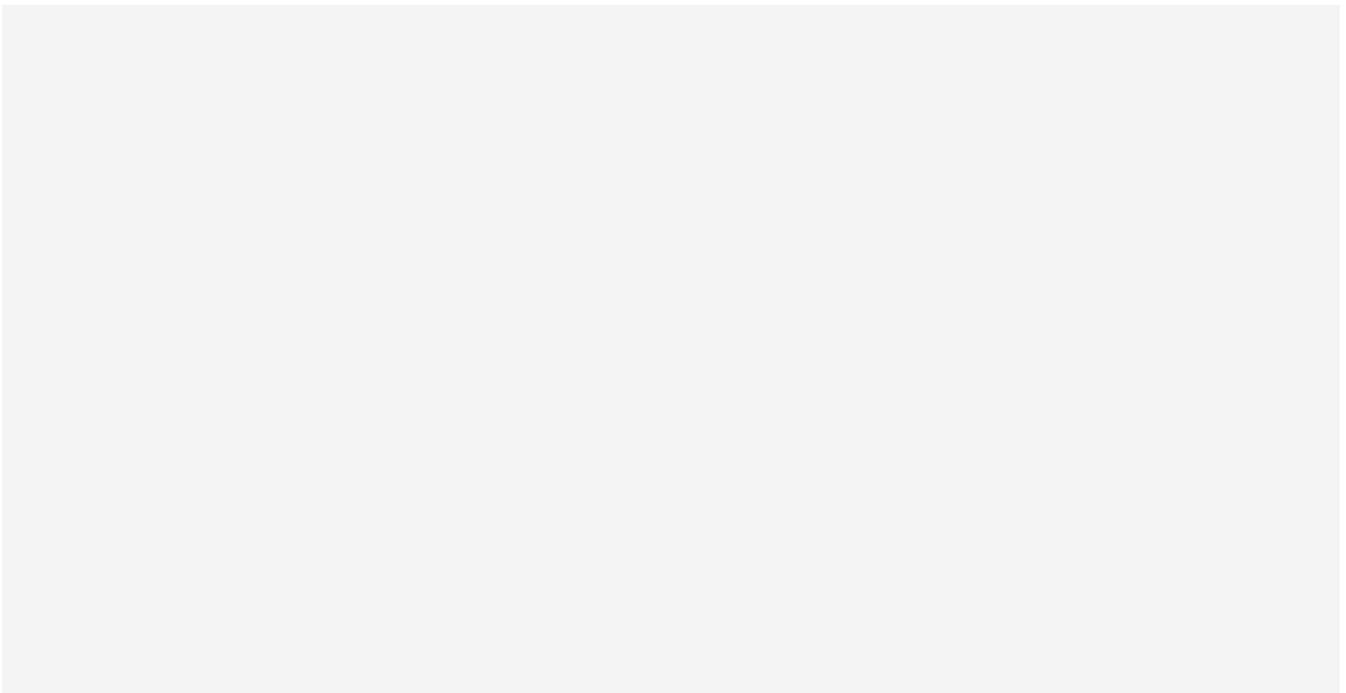
Prüfung der Druckfestigkeit

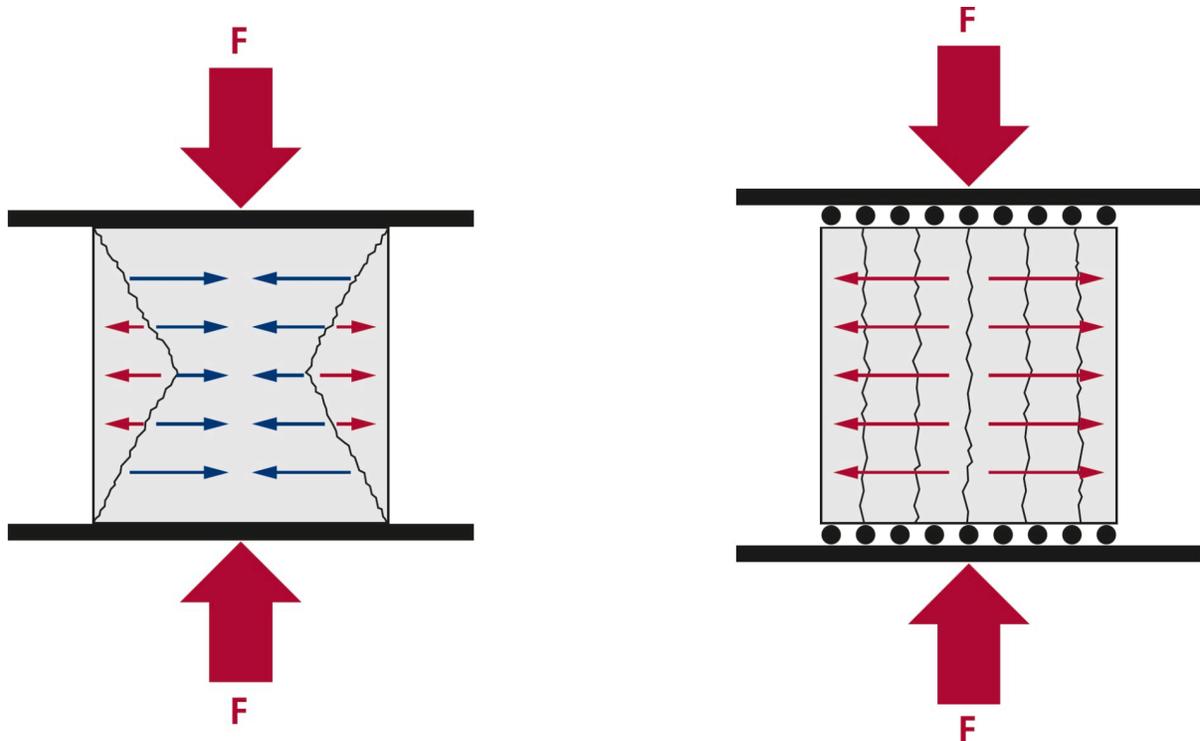
Die Druckfestigkeit von Beton wird in der Regel an gesondert hergestellten Prüfkörpern, z. B. Würfeln, Zylinder oder Prismen, oder Bohrkernen bestimmt und ist abhängig von:

- Schlankheit des Prüfkörpers, Verhältnis Höhe (h) zu Breite (b) oder Durchmesser (d)
- Belastungsgeschwindigkeit
- Prüfkörpergrösse (Verhältnis zum Grösstkorn)
- Feuchtigkeitsgehalt und Planparallelität der Prüfkörper

In der Schweiz erfolgt die Prüfung nach SN EN 12390-3 in der Regel an einem Würfel mit der Kantenlänge von 150 mm (Abb. 3.8.1). Die Würfel werden 1 Tag in der Schalung und 27 Tage im Wasser bei einer Temperatur von 20 °C gelagert. Die Festigkeit bei der Prüfung im Alter von 28 Tagen gilt als Bezugswert. Diese Festigkeit ist massgebend für die Einordnung in eine Festigkeitsklasse (Tab. 2.3.2 unter Beton nach Eigenschaften).

Bei der Prüfung eines Würfels ohne Zwischenschichten ist eine freie Querdehnung nur ausserhalb der unter Querdruck stehenden Doppelpyramide möglich. Der Beton bricht durch Zug-Scherspannungen entlang des Pyramidenrandes, die Doppelpyramide bleibt stehen (Abb. 3.8.3 a). Wird die Querdehnungsbehinderung durch Zwischenschichten oder bürstenartige, schlaffe Druckplatten aufgehoben, bricht der Beton durch Querkzugspannungen und reisst in einzelne Pfeiler auf (Abb. 3.8.3 b).





a) Lasteinleitung durch direkten Kontakt der Prüfplatte mit dem Probekörper mit Querdehnungsbehinderung.

b) Lasteinleitung durch Druckstreben, die die Querdehnung nicht behindern. Der Probekörper kann sich in Querrichtung frei verformen.

Abb. 3.8.3: Querzugspannung (rot) und Druckspannungen (blau) in einem Betonwürfel bei der Druckfestigkeitsprüfung.

Prüfkörper mit einer Schlankheit $h/d > 1$ wie Zylinder oder Prismen ergeben geringere Druckfestigkeiten als jene mit einer Schlankheit $h/d = 1$ wie Würfel. Die höheren Druckfestigkeiten gedrungener Prüfkörper beruhen im Wesentlichen auf einer grösseren Behinderung der Querdehnung durch die Druckplatten der Prüfmaschine. In Abbildung 3.8.4 wird der Einfluss der Prüfkörperschlankheit auf die Druckfestigkeit dargestellt. Bei einer Schlankheit grösser als 2 verschwindet der Einfluss der behinderten Querdehnung auf die gemessene Druckfestigkeit.

Die Auswirkungen der behinderten Querdehnung hängen direkt von der Querdehnung (Querdehnungszahl) des untersuchten Betons ab. Das Verhältnis von 0.80 zwischen der Zylinder- und der Würfeldruckfestigkeit gilt nur für einen Beton, der mit üblicher

Gesteinskörnung hergestellt wurde. Bei Leichtbeton steigt das Verhältnis auf ca. 0.90.

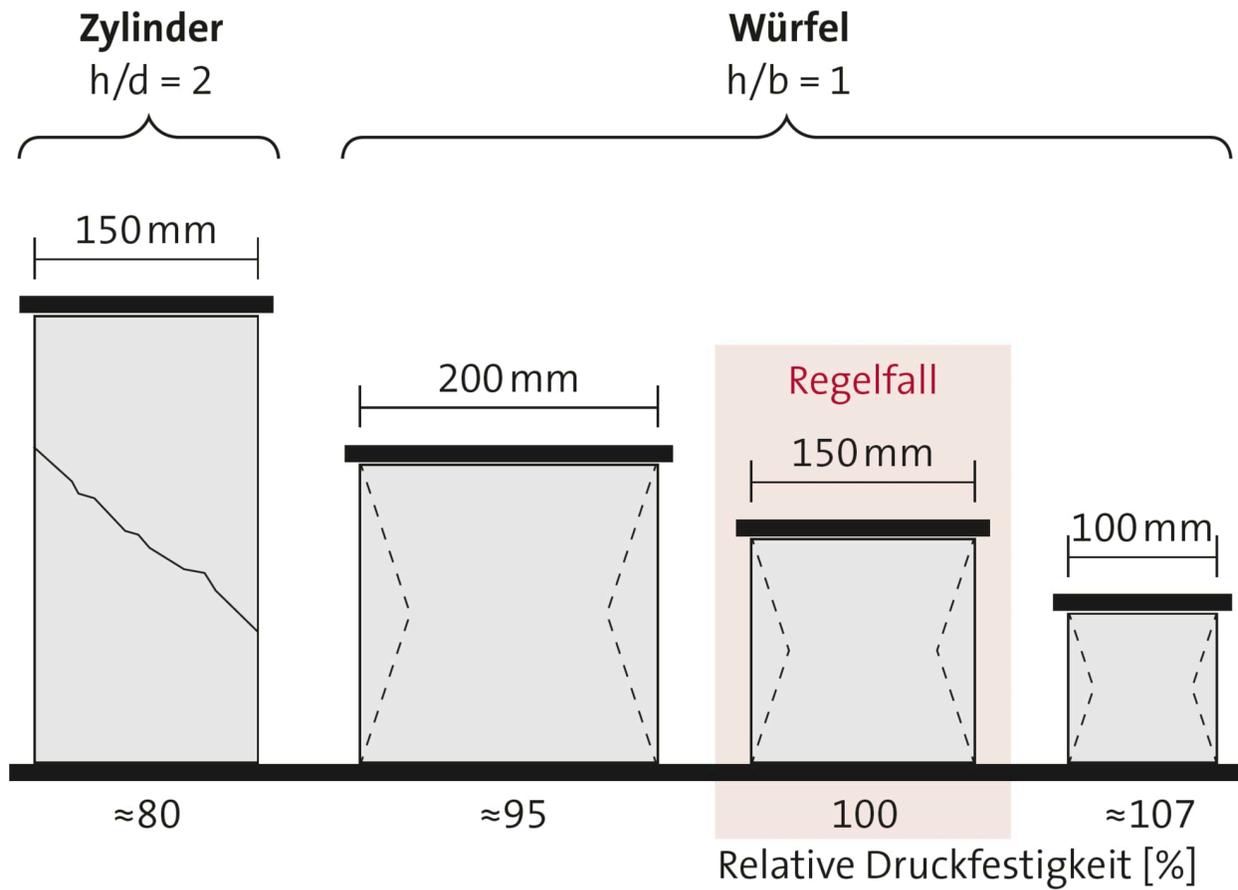


Abb. 3.8.4: Einfluss der Prüfkörperschlankheit auf die gemessene Druckfestigkeit.



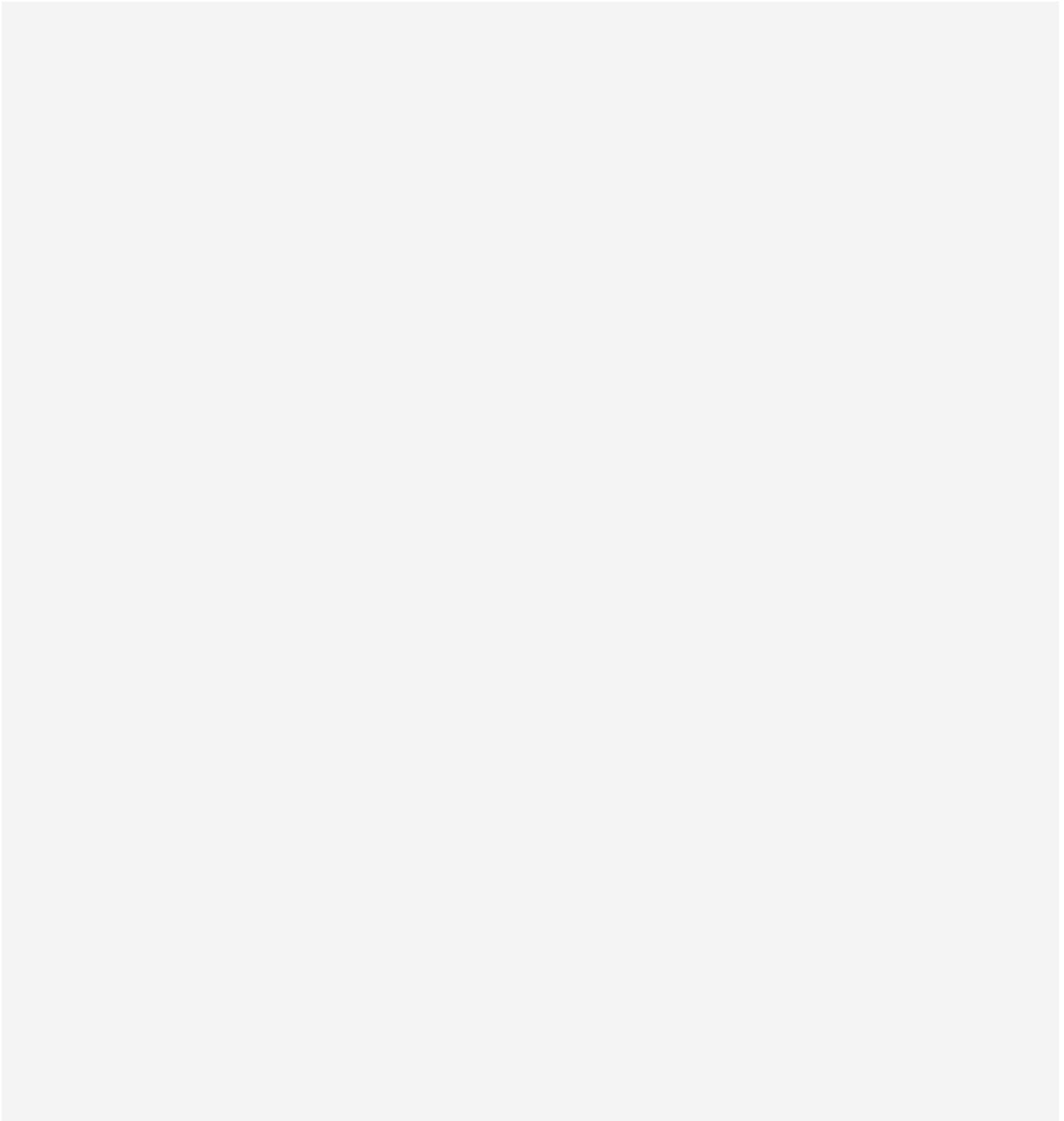
Abb. 3.8.1: Prüfung der Druckfestigkeit am Würfel.

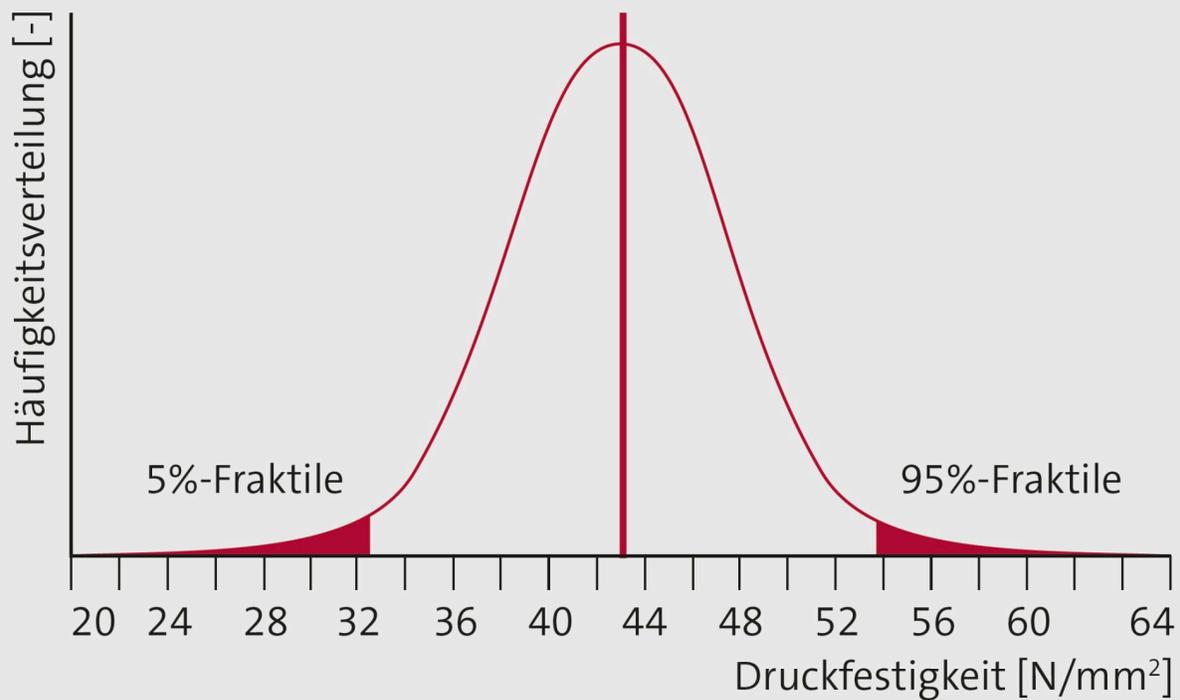


Abb. 3.8.2: Bruchbild eines Würfels.

Streuung der Druckfestigkeit

Bei der Prüfung kann eine Streuung der Ergebnisse der Druckfestigkeit beobachtet werden. Die statistische Verteilung der Prüfergebnisse folgt in der Regel einer Gauss'schen Normalverteilung, welche durch den Mittelwert f_{cm} und die zugehörige Standardabweichung σ beschrieben wird (Abb. 3.8.5).





$$\text{Mittelwert } f_{cm} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\text{Standardabweichung } \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - f_{cm})^2}{(n - 1)}}$$

x_i Einzelwerte der Druckfestigkeit [N/mm²]

n Anzahl der Messwerte [-]

Abb. 3.8.5: Statistische Verteilung der Druckfestigkeit.

Für die Berechnung von Tragwerken wird ein eindeutiger Referenzwert für die Druckfestigkeit festgelegt. In der Norm SIA 262 wird der charakteristische Wert f_{ck} , der der 5 %-Fraktile entspricht, verwendet. Dies bedeutet, dass bei einer unendlichen Anzahl von Prüfergebnissen der Druckfestigkeit 5 % der Werte kleiner und 95 % der

Prüfergebnisse grösser als f_{ck} sind. Diese 5 %-Fraktile dient in der Norm SIA 262 als Basis zur Definition der Druckfestigkeitsklassen des Betons. Die Druckfestigkeitsklasse C30/37 bedeutet z. B.:

- 30 N/mm²: charakteristische Zylinderdruckfestigkeit (5 %-Fraktile)
- 37 N/mm²: charakteristische Würfeldruckfestigkeit (5 %-Fraktile)

Der Fraktilwert lässt sich mit Hilfe des für alle Gauss'schen Normalverteilungen gültigen Faktors k ermitteln. Für den 5 % Fraktilwert ist $k = 1.64$. Bei Annahme einer Standardabweichung von $\sigma = 4.8$ N/mm² gilt der folgende Zusammenhang zwischen Mittelwert und charakteristischem Wert der Zylinderdruckfestigkeit:

$$f_{ck} = f_{cm} - k \cdot \sigma = f_{cm} - 1.64 \cdot 4.8 \approx f_{cm} - 8 \text{ N/mm}^2$$

Gl. 3.8.1

Dieser Zusammenhang beruht auf statistischen Kriterien, die eine unendliche Anzahl von Messwerten annehmen. Er kann vom Planer im Rahmen der Bemessung angewendet werden, gilt aber nicht für die Konformitätsprüfung im Herstellwerk und für die Identitätsprüfung auf der Baustelle.

Abschätzung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen

Der semi-empirische Ansatz von Bolomey erlaubt die Abschätzung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen. Aus gemessenen Mörteldruckfestigkeiten (Zementdruckfestigkeiten nach der Norm SN EN 196-1) werden die entsprechenden Betondruckfestigkeiten mit weiteren Korrekturfaktoren berechnet. Wenn keine Prüfergebnisse vorliegen oder für die Entwicklung einer neuen Betonzusammensetzung kann die zu erwartende Druckfestigkeit mit Gleichung 3.8.2 ermittelt werden.

$$f_c = K_g \cdot f_{nc} \cdot \left(\frac{z}{W_{\text{eff}} + P} - 0.5 \right)$$

f_c Würfeldruckfestigkeit [N/mm²]

K_g Beiwert zur Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnung [-]

Für Gesteinskörnungen aus dem Schweizer Mittelland nimmt K_g Werte zwischen 0.60 für runde Gesteinskörnung und 0.80 für gebrochene Gesteinskörnung an.

f_{nc} Mörteldruckfestigkeit nach SN EN 196-1 [N/mm²]
In erster Näherung können 40, 50 und 60 N/mm² für Zemente der Festigkeitsklassen 32,5; 42,5 und 52,5 angenommen werden.

Z Zementgehalt [kg/m³]

W_{eff} Wirksamer Wassergehalt [l/m³]

P Luftporengehalt [l/m³].

Der Luftporengehalt liegt üblicherweise zwischen 5 und 25 l/m³.

Gl. 3.8.2

Gleichung 3.8.2 ist für Normalbetone mit einem w/z- Wert von 0.40 bis 0.65 anwendbar. Für Betone, deren mittlere Würfeldruckfestigkeit 70 N/mm² übersteigt, kann die Gesteinskörnung als schwächstes Glied massgebend werden und die Formel nach Bolomey verliert ihre Gültigkeit.

Eine andere Möglichkeit bieten die Kurvenbänder nach Walz (Abb. 3.8.6). Sie erlauben eine

rasche Abschätzung der Würfeldruckfestigkeit eines Betons nach 28 Tagen in Abhängigkeit vom w/z-Wert und für Zemente unterschiedlicher Zementfestigkeitsklassen.

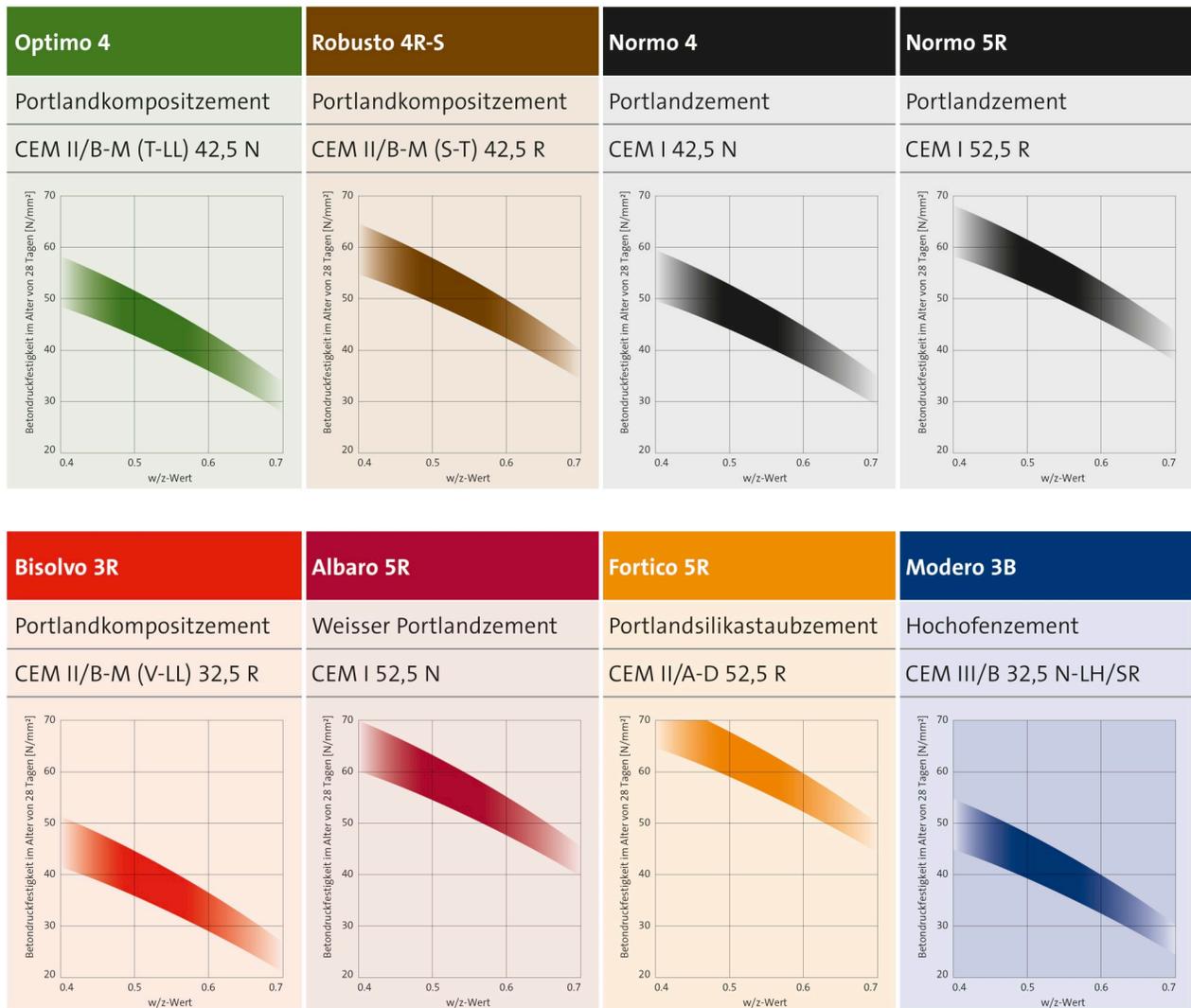


Abb. 3.8.6: Würfeldruckfestigkeit in Abhängigkeit vom w/z-Wert für Zemente unterschiedlicher Festigkeitsklassen (Alter 28 Tage, normgerechte Herstellung und Lagerung bei 20 °C).

Festigkeitsentwicklung

Unter der Festigkeitsentwicklung wird die Zunahme der Festigkeit mit zunehmendem Alter des Betons verstanden. Sie ist von Bedeutung für Ausschallfristen, die Dauer der Nachbehandlung, das Aufbringen der Vorspannung, den Bauablauf und den Belastungszeitpunkt. Sie wird beschrieben, indem die Festigkeit zu ausgewählten Zeitpunkten, z. B. 2, 7, 28, 56, 90 und 180 Tage, auf die 28- Tage Druckfestigkeit bezogen wird. In Tabelle 3.8.2 ist die Festigkeitsentwicklung von Beton bei einer Temperatur von 20

°C in Abhängigkeit des Schätzwertes vom Festigkeitsverhältnis gemäss SN EN 206-1 aufgeführt. Das Festigkeitsverhältnis wird aus der mittleren Druckfestigkeit nach 2 Tagen (f_{c2}) und der mittleren Druckfestigkeit nach 28 Tagen (f_{c28}) gebildet und ist während der Erstprüfung oder auf der Grundlage eines bekannten Verhältnisses von Betonen vergleichbarer Zusammensetzung (z. B. gleicher Zement, gleicher w/z-Wert) zu ermitteln.

Die Festigkeitsentwicklung wird nicht nur von der Festigkeitsentwicklung des Zements, vom w/z-Wert und vom Hydratationsgrad, sondern auch von der aktuellen Einbausituation und den Witterungsverhältnissen beeinflusst.

Festigkeitsentwicklung	Verhältnis $f_{cm,2}/f_{cm,28}$
Schnell	≥ 0.5
Mittel	≥ 0.3 bis < 0.5
Langsam	≥ 0.15 bis < 0.3
Sehr langsam	< 0.15

Tab. 3.8.2: Festigkeitsentwicklung und Verhältnis der 2d/28d-Druckfestigkeit von Beton bei einer Temperatur von 20 °C.

Abschätzung der Festigkeitsentwicklung

Die technisch einfachste, aber aufwändigste Methode zur Bestimmung der Festigkeitsentwicklung ist die Herstellung von Prüfkörpern, die unter den gleichen Bedingungen gelagert werden, wie der Bauwerksbeton und an denen nach definierten Zeitpunkten die Druckfestigkeit bestimmt wird. Die Festigkeit in einem solchen Prüfkörper ist in der Regel geringer als jene im Bauwerk zum gleichen Zeitpunkt, da sich im Bauwerksbeton das grössere Betonvolumen positiv auf die Festigkeitsentwicklung auswirkt.

Für eine Abschätzung der Festigkeitsentwicklung werden auch häufig zerstörungsfreie Prüfungen eingesetzt, bei denen über eine empirische oder physikalische Beziehung von einem Prüfwert auf die Festigkeit geschlossen wird. Detaillierte Schätzungen der

Festigkeitsentwicklung des Betons können auf einem der folgenden Verfahren beruhen:

- Berechnung der Festigkeitsentwicklung aus Temperaturmessungen
- Berechnung der Festigkeitsentwicklung aus numerischer Simulation
- Rückprallhammerprüfung an der Betonoberfläche

Berechnung der Festigkeitsentwicklung aus Temperaturmessungen

Der Einfluss der Temperatur auf die Festigkeitsentwicklung kann näherungsweise durch die Reife bzw. den Reifegrad R erfasst werden. Durch die Messung des Temperaturverlaufs des Bauwerksbetons mittels einbetonierter Thermolemente kann die Festigkeitsentwicklung unter Berücksichtigung der thermischen Randbedingungen während der Lagerung ermittelt werden. Dazu muss vorab eine Näherung erfolgen, die durch Ermittlung der Festigkeitsentwicklung des Betons bei konstanter Temperatur (üblicherweise 20 °C) erfolgt. Anschliessend kann die tatsächliche Festigkeit des Bauwerksbetons mit Hilfe der gewonnenen Zusatzinformationen bestimmt werden. Diese Methode ermöglicht Parameter, die an die Temperatur geknüpft sind, wie Frischbetontemperatur, Umgebungstemperatur, Bauteilgeometrie und Nachbehandlung, zu berücksichtigen.

Berechnung der Festigkeitsentwicklung mittels numerischer Simulation

Die numerische Simulation läuft nach dem zuvor erläuterten Prinzip ab. Jedoch wird der Temperaturverlauf des Betonquerschnitts nicht gemessen, sondern numerisch simuliert auf Basis der Hydratationswärmeentwicklung des Zements, der Geometrie, der angenommenen Frischbetontemperatur und der Randbedingungen (Nachbehandlung, wärmedämmende Wirkung der Schalung, Umgebungstemperatur). Die numerische Simulation wird nur in Spezialfällen durch Experten durchgeführt.

Rückprallhammerprüfung an der Betonoberfläche

Die Druckfestigkeit von Beton kann auch mit einem Rückprallhammer bestimmt werden. Das Gerät misst den Rückschlag einer Masse, die auf die Betonoberfläche aufschlägt und erlaubt so auf indirekte Art die Bestimmung der Druckfestigkeit. Die Methode ist einfach und schnell, ermöglicht aber nur eine Schätzung der oberflächennahen Festigkeit des Betons, die zudem einer grossen Streuung unterworfen ist. Zur Abschätzung der Druckfestigkeit ist eine Kalibrierung mit Hilfe von Festigkeitswerten, welche z. B. an Bohrkernen gewonnen werden, notwendig.

Eine weitere Möglichkeit, langfristige Festigkeitsentwicklungen rechnerisch abzuschätzen, stellt die Berechnung der Festigkeitsentwicklung mit Hilfe des Ansatzes aus

dem fib CEB Model Code 2010 dar. Die Festigkeitsentwicklung von Normal- und Schwerbetonen kann auf Basis der mittleren Druckfestigkeit nach 28 Tagen abgeschätzt werden. Im zeitabhängigen Beiwert β_{cc} (Gl. 3.8.4) wird durch Einfügen des Beiwerts s die Festigkeitsklasse des Zements berücksichtigt. Für die Lagerung bei einer Temperatur von 20° C gilt:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm28}$$

Gl. 3.8.3

$$\beta_{cc} = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\}$$

$f_{cm}(t)$ mittlere Druckfestigkeit zum Zeitpunkt t [N/mm²]

f_{cm28} mittlere Druckfestigkeit nach 28 Tagen [N/mm²]

$\beta_{cc}(t)$ zeitabhängiger Beiwert

t Betonalter [d]

s Beiwert zur Berücksichtigung der Zementfestigkeitsklasse:

$s = 0.20$ für CEM 52,5 N, CEM 42,5 R

$s = 0.25$ für CEM 42,5 N und CEM 32,5 R

$s = 0.38$ für CEM 32,5 N

Gl. 3.8.4

Die Ergebnisse der Gleichungen 3.8.3 und 3.8.4 sind für ausgewählte Betonalter in Tabelle 3.8.3 aufgeführt. Sie haben jedoch nur Näherungscharakter, da sie weder die genaue Betonzusammensetzung noch die Einbau- und Nachbehandlungsbedingungen des Betons

berücksichtigen.

Alter t [d]	Verhältnis $f_{cm}(t)/f_{cm28}$		
	s = 0.20	s = 0.25	s = 0.38
2	≈ 0.82	≈ 0.78	≈ 0.35
7	≈ 1.00	≈ 1.00	≈ 0.68
28	≈ 1.09	≈ 1.12	≈ 1.00
90	≈ 1.16	≈ 1.20	≈ 1.18
365	≈ 1.16	≈ 1.20	≈ 1.32

Tab. 3.8.3: Festigkeitsentwicklung gemäss fib CEB Model Code 2010.

Auch nach 28 Tagen besitzt Beton noch ein Erhärtungspotenzial. Das Mass dieser Nacherhärtung ist je nach Zementart, Betonzusammensetzung und weiteren Einflussgrössen recht unterschiedlich. Bezogen auf die 28-Tage-Druckfestigkeit ist mit einer umso grösseren Nacherhärtung zu rechnen, je langsamer der Zement erhärtet, je höher die Lagerungsfeuchte und je niedriger die Lagerungstemperatur ist.

Objektspezifisch kann der Zeitpunkt, zu dem die gewünschte Festigkeitsklasse erreicht wird, auch später als 28 Tage festgelegt werden. Dies kann bei massigen Bauteilen, bei denen zur Begrenzung der Hydratationswärmeentwicklung eine langsame Festigkeitsentwicklung angestrebt wird, von Vorteil sein.

Zugfestigkeit des Festbetons

Allgemeines

Beton weist unter Zugbeanspruchung eine geringe Festigkeit und ein sprödes Bruchverhalten auf. Daher wird die Zugfestigkeit von Beton im Allgemeinen bei den

Berechnungen durch den Tragwerksplaner nicht berücksichtigt. Bei Stahlbeton wird eine Bewehrung eingelegt, die die Kräfte in der Zugzone vollständig aufnehmen kann. In einigen Fällen spielt die Zugfestigkeit des Betons für die Tragfähigkeit dennoch eine bedeutende Rolle, z. B. beim Querkraft- oder Durchstanzwiderstand von Platten ohne Bügelbewehrung, bei der Übertragung von Kräften von einem Bewehrungsstab auf den nächsten im Bereich von Überlappungsstößen oder bei der Verteilung von konzentrierten Lasten sowie bei Verbundankern. Zudem ist beim Nachweis des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit die Kenntnis der Zugfestigkeit des Betons notwendig, um das Ausmass der Rissbildung in einem Bauteil zu bestimmen.

Die Zugfestigkeit hängt zum Teil von den gleichen Einflussgrössen ab, die auch für die Druckfestigkeit massgebend sind, d. h. von den Eigenschaften des Zementsteins und dem Verbund zwischen dem Gesteinskorn und dem Zementstein. Entsprechend nimmt die Zugfestigkeit mit geringerem w/z-Wert zu, jedoch deutlich weniger als die Druckfestigkeit. Betone mit gebrochener Gesteinskörnung weisen in der Regel eine um 10 bis 20 % höhere Zugfestigkeit auf als die gleichen Betone mit runder Gesteinskörnung. Versagensart und Bruchlast eines auf Zug belasteten Prüfkörpers werden vorwiegend durch Gefügemerkmale bestimmt wie z. B.:

- Verdichtungsstörungen
- schlechter Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskorn
- Mikrorisse im Zementstein und/oder Gesteinskorn
- Luftporen

In den meisten Fällen erfolgt das Versagen unter Zugbelastung mit einem Bruch in der Verbundzone zwischen Zementstein und Gesteinskorn. Die Gesteinskörner werden überwiegend freigelegt (Abb. 3.8.7). Wird die Qualität der Verbundzone verbessert, steigt die Zugfestigkeit deutlich an. Erreicht die Zugfestigkeit das Niveau der Gesteinskörnung, erfolgt der Bruch innerhalb der Gesteinskörner und nicht in der Verbundzone.



Abb. 3.8.7: Bruchbild nach direkter Zugbelastung eines Prüfkörpers. Versagen in der Verbundzone.

Prüfung der Zugfestigkeit

Das Verhalten von Beton unter Zugbeanspruchung kann entweder im direkten Zugversuch oder indirekt im Spaltzug- bzw. Biegezugversuch bestimmt werden (Abb. 3.8.8).

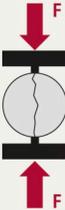
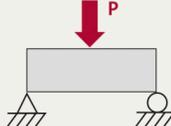
	Zentrischer Zug	Spaltzugversuch	3-Punkt Biegeversuch
Prinzip			
Empfehlung bzw. Norm	RILEM Recommendation CPC7	SN EN 12390-6	SN EN 12390-5
Probekörper	Zylinder (auch gekerbt)	Zylinder	Prisma
Belastung	zentrischer Zug entlang der Zylinderachse	Druckbelastung entlang zweier gegenüberliegender Mantellinien	Mittige Einzellast
Parameter	T = Bruchlast (Zug) d = Probendurchmesser	F = Bruchlast (Druck) d = Probendurchmesser L = Probenlänge	P = Bruchlast (Biegung) h = Probenhöhe b = Probenbreite L = Spannweite
Versuchsergebnis	$f_{ct} = \frac{T}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2}$	$f_{c, Spaltzug} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{F}{d \cdot L}$	$f_{c, Biegung} = \frac{M}{W} = \frac{P \cdot L}{4} \cdot \frac{6}{b \cdot h^2}$
näherungsweise Korrelation	–	$f_{c, Spaltzug} \approx 1.25 f_{ct}$	$f_{c, Biegung} \approx 2.0 f_{ct}$
Richtwerte [N/mm ²]	1.5–4.0	2.0–6.0	3.0–8.0

Abb. 3.8.8: Verfahren zur Bestimmung der Zugfestigkeit.

Berechnung der Zugfestigkeit

Näherungsweise kann die mittlere Zugfestigkeit f_{ctm} von Normalbeton (mit $f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$) nach der Norm SIA 262 aus der Druckfestigkeit berechnet werden:

$$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3}$$

f_{ctm} mittlere, direkte Zugfestigkeit [N/mm²]

f_{ck} charakteristische Zylinderdruckfestigkeit [N/mm²]

Die mit Gleichung 3.8.5 berechneten, mittleren Zugfestigkeiten sind für die Druckfestigkeitsklassen bis C50/60 in Tabelle 3.8.4 aufgeführt.

Im fib CEB Model Code 2010 wird für die Berechnung der mittleren Zugfestigkeit ab der Druckfestigkeitsklasse C55/67 die folgende Gleichung angegeben:

$$f_{ctm} = 2.12 \cdot \ln(1 + 0.1 \cdot (f_{ck} + \Delta f))$$

f_{ctm} mittlere Zugfestigkeit [N/mm²]

f_{ck} charakteristische Zylinderdruckfestigkeit [N/mm²]

Δf 8 N/mm²

Gl. 3.8.6

Wenn die charakteristische Betonzugfestigkeit erforderlich ist, können die 5 %- und 95 %-Fraktile mit $0.7 \cdot f_{ctm}$ und $1.3 \cdot f_{ctm}$ angenommen werden.

	Druckfestigkeitsklasse							
	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
Mittelwert der Zugfestigkeit f_{ctm} [N/mm ²]	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1

Tab. 3.8.4: Mittlere Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Druckfestigkeitsklasse gemäss Norm SIA 262.

Elastizitätsmodul für Festbeton

Allgemeines

Ein wichtiges Merkmal eines Materials ist sein Verformungsverhalten, welches in der sogenannten Spannungs- Verformungs (Dehnungs)-Linie abgebildet wird. Der Elastizitätsmodul (E-Modul) eines Materials entspricht dem Verhältnis von Spannung zu Verformung. Je höher der E-Modul ist, umso mehr Kraft ist zur Verformung des Materials notwendig. Wenn das Material linear-elastisch ist, ist der E-Modul eine Konstante und das Material nimmt nach der Be- und Entlastung wieder seine Ausgangslänge ein. Es folgt

dann dem sogenannten Hooke'schen Gesetz.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \Delta l / l$$

σ Spannung [N/mm²]

E E-Modul [N/mm²]

ε Dehnung [‰]

l Länge des unbelasteten Körpers [mm]

Δl Längenänderung des belasteten Körpers [mm]

Gl. 3.8.7

Die Spannungs-Dehnungslinien von Zementstein und Gesteinskörnung verlaufen annähernd linear. Das Verhalten von Beton ist nur bereichsweise linear-elastisch. Jedoch ist die Verformung bei Beton nicht direkt proportional zur Spannung, sondern steigt mit zunehmender Belastung stärker an. Die Spannungs-Dehnungslinien verlaufen nicht linear, sondern verlaufen flacher je mehr sich die Spannung der Bruchlast nähert. Das nicht-lineare Verhalten von Beton wird mit der Bildung von Mikrorissen in der Übergangszone zwischen Gesteinskörnern und Zementstein erklärt. Im Allgemeinen liegt das Lastniveau im Gebrauchszustand jedoch deutlich unterhalb der Bruchlast bzw. des Bereichs, in dem plastische Verformungen auftreten. Im Bereich der Gebrauchsspannungen ist das Verhalten von Beton annähernd linear (Abb. 3.8.9).

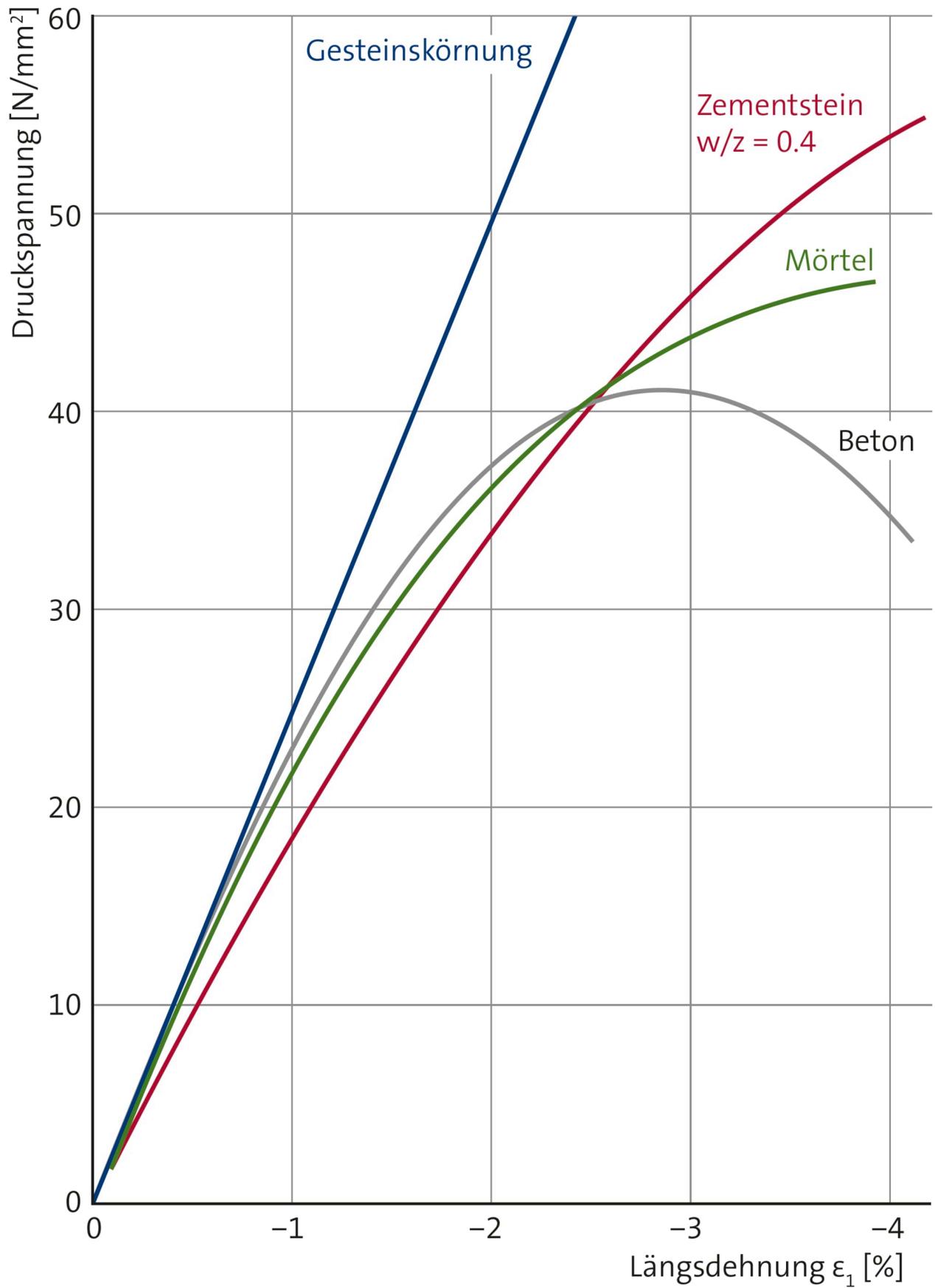


Abb. 3.8.9: Spannungs- Dehnungslinie von Zementstein, Gesteinskörnung und Beton.

Der E-Modul von Beton hängt direkt vom Volumenverhältnis und den E-Moduli der Gesteinskörnung und des Zementsteins ab. Mit einem Anteil von ca. 70 Vol.-% stellt die Gesteinskörnung die massgebende Komponente dar. Bei geeigneter Gesteinskörnung liegt der E-Modul zwischen 50 000 und 70 000 N/mm². Der E-Modul des Zementsteins liegt deutlich tiefer im Bereich von 15 000 bis 22 000 N/mm².

Der E-Modul hat die folgende baupraktische Bedeutung: Ein hoher E-Modul ist z. B. bei biege- oder druckbeanspruchten Bauteilen (Platten, Balken, Stützen) für die Begrenzung der Verformungen von Vorteil. Dagegen ist ein geringer E-Modul z. B. bei aufgezwungenen Verformungen (Stützensenkung, Schwinden, Temperaturschwankungen) vorteilhaft, weil dadurch geringere Zugspannungen und damit ein geringeres Rissrisiko entstehen.

Prüfung des E-Moduls

Innerhalb der Gebrauchsspannungen ist es zulässig, ein näherungsweise elastisches Verhalten des Betons anzunehmen und dieses mit einem festen Sekantenmodul $E_{c,s}$ für einen definierten Spannungsbereich zu beschreiben. Die Spannungs-Dehnungs-Linie enthält neben den elastischen auch zeitabhängige Verformungsanteile sowie bleibende Verformungen nach der Entlastung (Restdehnung). Durch mehrere Belastungswechsel wird ein Grenzwert der Restdehnung erreicht und ein nahezu elastisches Verhalten tritt ein. Dieses wird zur Bestimmung des E-Moduls nach der Norm SN EN 12390-13 (Regelfall Verfahren B) benutzt.

Der E-Modul von Beton wird in einem Druckversuch an Zylindern oder Prismen bestimmt (Abb. 3.8.10). Die Prüfkörper durchlaufen drei Be- und Entlastungszyklen zwischen einer Unterspannung von 0.5 bis 1.0 N/mm² und einer Oberspannung von maximal einem Drittel der Druckfestigkeit. Der E-Modul wird beim dritten Belastungszyklus gemessen (Abb. 3.8.11).

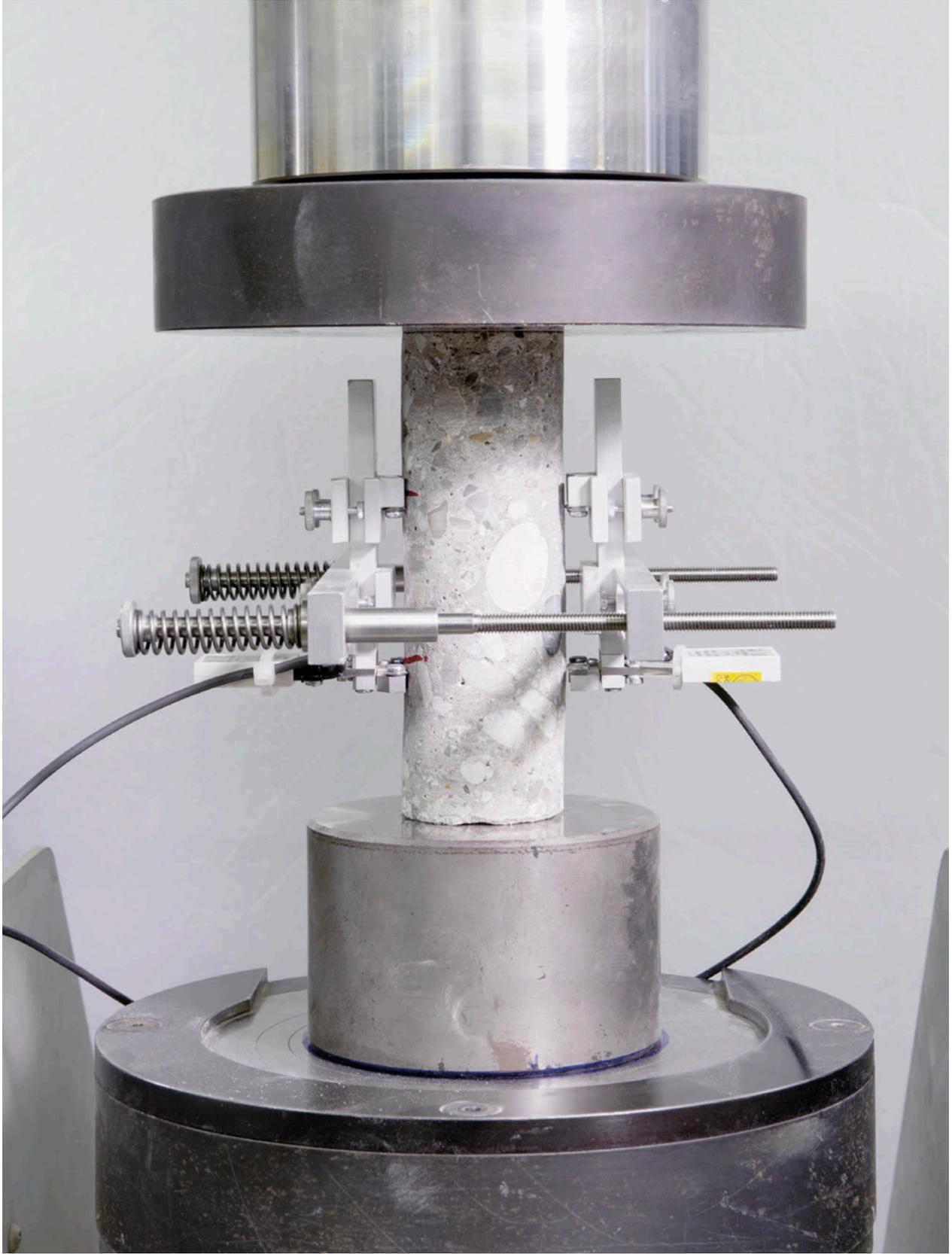


Abb. 3.8.10: Messung des E-Moduls (Sekantenmodul).

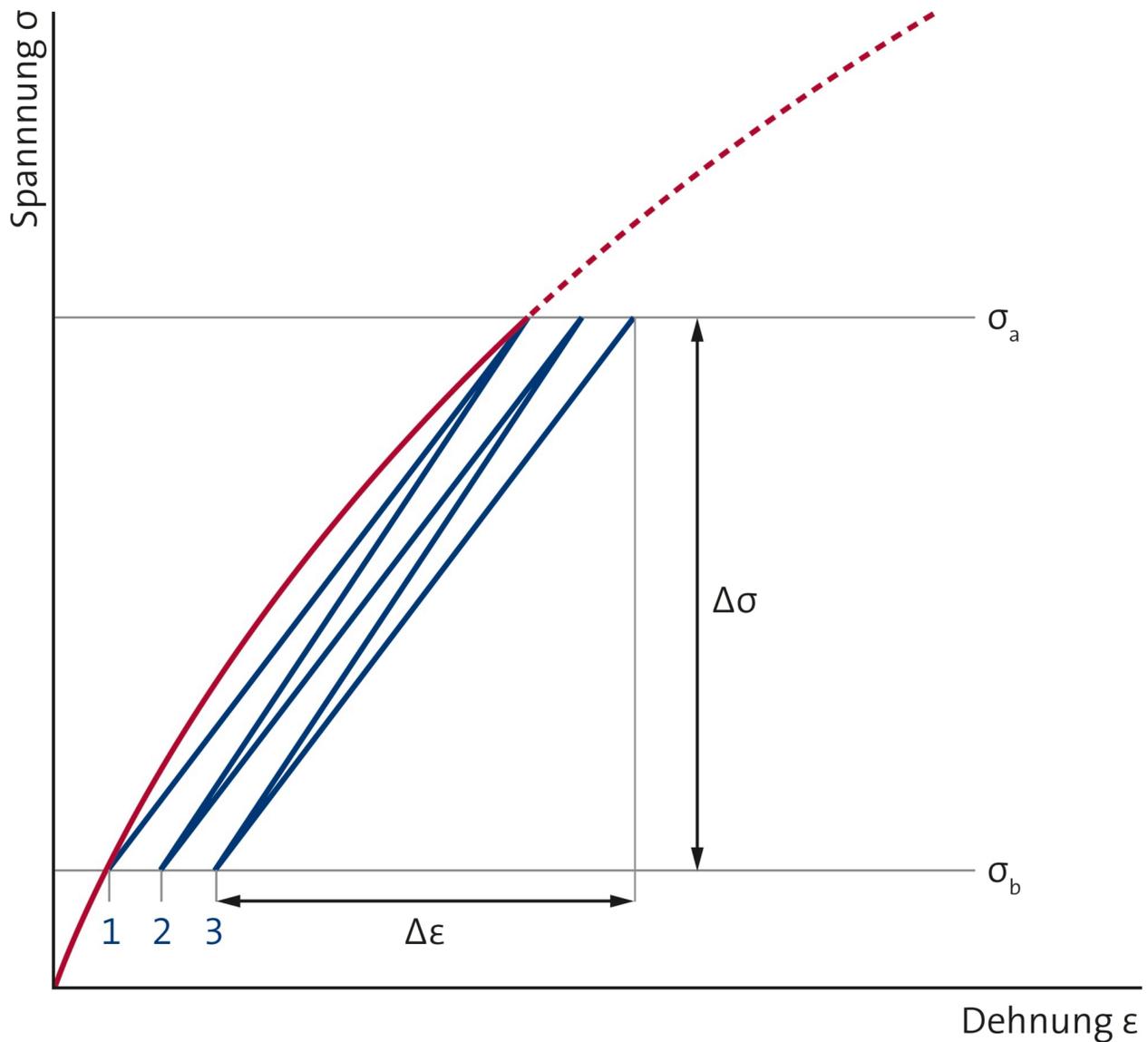


Abb. 3.8.11: Bestimmung des Elastizitätsmodul von Beton unter zyklischer Druckbelastung.

Berechnung des E-Moduls

Näherungsweise kann der rechnerische E-Modul E_{cm} von Normalbeton nach der Norm SIA 262 aus der Druckfestigkeit berechnet werden:

$$E_{cm} = k_E \cdot \sqrt[3]{f_{cm}}$$

E_{cm} rechnerischer E-Modul des Betons [N/mm²]

k_E Beiwert, abhängig von der Art der Gesteinskörnung [-]:

12 000 bis 10 000 Alluvialkies

10 000 bis 8 000 gebrochener Kalkstein

8 000 bis 6 000 glimmerhaltige Gesteinskörnung

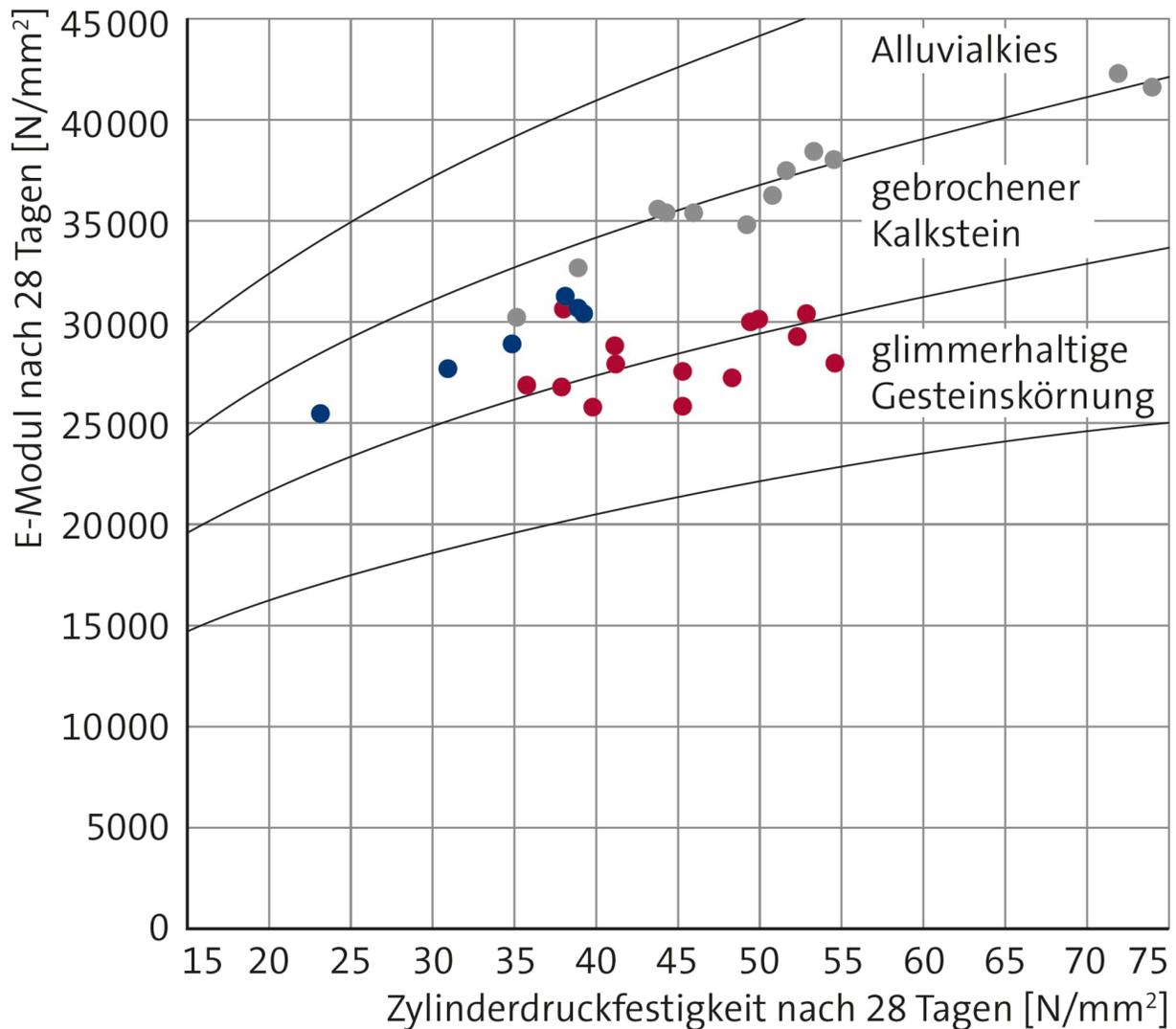
f_{cm} mittlere Zylinderdruckfestigkeit

($f_{cm} \approx f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2$) [N/mm²]

f_{ck} charakteristische Zylinderdruckfestigkeit [N/mm²]

Gl. 3.8.8

In Abbildung 3.8.12 sind gemessene E-Moduli in Abhängigkeit der Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen für unterschiedliche Betone dargestellt. Die durchgezogenen Linien wurden mit Hilfe von Gleichung 3.8.8 für die unterschiedlichen Gesteinsarten berechnet. Die Messwerte stimmen mit den Normkurven gut überein.



- natürlich gerundete Gesteinskörnung (Standort 1)
- natürlich gerundete Gesteinskörnung (Standort 2)
- gebrochene alpine Gesteinskörnung
- Bereiche zwischen den Kurven: Normalbeton aus natürlicher Gesteinskörnung gemäss SIA 262

Abb. 3.8.12: E-Modul in Abhängigkeit von der Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen für unterschiedliche Betone.

In Gleichung 3.8.8 wird die Art der Gesteinskörnung sowie indirekt die Qualität des Zementsteins durch die Druckfestigkeit berücksichtigt, aber nicht die tatsächlichen Volumenverhältnisse von Gesteinskörnung und Zementstein. Bei gleicher Druckfestigkeit wird der durch Gleichung 3.8.8 berechnete E-Modul daher leicht überschätzt, was vor allem

bei Betonen mit hohem Zementleimvolumen, wie z. B. selbstverdichtende Betone zu berücksichtigen ist (ca. -15 %).

Zeitliche Entwicklung des E-Moduls

Bei der Belastung von Beton zu einem anderen Zeitpunkt als nach 28 Tagen (z. B. Ausschalen oder Aufbringen der Vorspannung) muss der E-Modul zum Belastungszeitpunkt abgeschätzt werden, um die Verformungen bestimmen zu können. Der zeitliche Anstieg des E-Moduls folgt näherungsweise der Entwicklung der Druckfestigkeit, verläuft sogar etwas schneller. Richtwerte in erster Näherung für die Entwicklung des E-Moduls können der Tabelle 3.8.6 aufgenommen werden.

Alter [d]	Verhältnis $E_{cm}(t) / E_{cm28}$
3	≈ 0.80
7	≈ 0.90
28	$= 1.0$
56	≈ 1.05
90	≈ 1.07

Tab. 3.8.6: Richtwerte der zeitlichen Entwicklung des E-Moduls (Normalbeton mit $f_{c, cube} \approx 58 \text{ N/mm}^2$ nach 28 Tagen).



Abb. 3.8.13: Lastabhängiges Verformungsverhalten einer dünnen Platte aus Ultrahochleistungsfaserbeton (siehe Ultrahochleistungs-Faserbeton).

