

5 Festigkeit und Festigkeitsentwicklung von Beton

5.1 Festigkeit

5.1.1 Festigkeitsarten

Der Widerstand eines Körpers gegen verformende oder trennende mechanische Beanspruchungen wird als „Festigkeit“ bezeichnet. Die Festigkeit ist die wichtigste Bemessungsgröße für Baustoffe in tragenden Bauteilen. Sie wird an Probekörpern in Kraft-Verformungs-Versuchen ermittelt, wobei die erzielte Höchstlast die Festigkeit definiert und i. d. R. in der Einheit N/mm^2 angegeben wird.

Die in **Tafel II.5.1-1** aufgeführten wesentlichen Festigkeitsarten werden zur Charakterisierung des Baustoffs Beton häufig benötigt und durch Prüfungen ermittelt. In den folgenden Abschnitten II.5.1.2 und II.5.1.3 werden die Prüfung und die Bedeutung der aufgelisteten Festigkeiten für den Baustoff Beton näher erläutert.

Neben der Art der Belastung hängt die Festigkeit auch von deren zeitlicher Entwicklung ab (**Tafel II.5.1-2**). Das übliche Belastungsspektrum für tragende Bauteile, das „unendlich oft“ oder „unendlich lange“ ertragen werden soll, besteht aus einem mittleren Belastungsniveau, zum Beispiel infolge Eigenlast, und aus wechselnden Beanspruchungen unterschiedlicher Größe, zum Beispiel infolge Verkehrs-, Schnee- oder Windlast. Da die wechselnden Beanspruchungen eines Bauteils in der Regel in unregelmäßiger Folge auftreten, spricht man von „Betriebsfestigkeit“ eines Bauteils.

Tafel II.5.1-1: Festigkeitsarten zur Charakterisierung des Baustoffs Beton

| Festigkeitsart | Probekörper |
|---|--------------------------------------|
| Druckfestigkeit | Würfel, Zylinder |
| zentrische Zugfestigkeit | Zylinder |
| Biegezugfestigkeit | Balken |
| Spaltzugfestigkeit | Zylinder, Würfel, Balken |
| Haftzugfestigkeit bzw. Abreißfestigkeit | kreisförmig freigebohrte Prüfflächen |

Der Widerstand des Baustoffs nimmt in der Rangfolge *Kurzzeitfestigkeit*, *Dauerstandfestigkeit*, *Betriebsfestigkeit* ab. Die Bemessung von Betonbauteilen erfolgt nach DIN 1045-1 auf der Basis der Betondruckfestigkeit (Kurzzeitdruckfestigkeit). Dauerstand- und Betriebsfestigkeit werden dabei für übliche Bemessungen durch entsprechend gewählte Bemessungswerte der Betondruckfestigkeit berücksichtigt.

Im Folgenden wird nur auf die kurzzeitige Druck- und Zugfestigkeit von Beton unter einaxialer Beanspruchung eingegangen. Angaben zur mehraxialen Festigkeit von Beton sind beispielsweise in [CEB1, Kup1, Sch9, Guo1, Dia1] zu finden. Der Einfluss von Dauerbelastungen, Wechselbelastungen sowie von hohen und niedrigen Temperaturen ist in [Hil1, Wes1] dargestellt.

5.1.2 Druckfestigkeit von Beton

Für die Beurteilung der Betonfestigkeit ist im Allgemeinen die *28-Tage-Druckfestigkeit* maßgebend. In besonderen Fällen kann

Tafel II.5.1-2: Festigkeitsarten von Beton in Abhängigkeit von der zeitlichen Entwicklung der Belastung

| Festigkeitsart | Art der Belastung |
|------------------------|---|
| Kurzzeitfestigkeit | einmalige kurzzeitige Belastung |
| Dauerstandfestigkeit | dauernde konstante Belastung |
| Dauerschwellfestigkeit | von Null auf einen Höchstwert ständig wechselnde Belastung |
| Dauerschwingfestigkeit | um einen Mittelwert schwingende Lastwechsel zwischen Ober- und Unterlast unter Druckbelastung |

auch die Festigkeit im Alter von einigen Stunden oder Tagen (*Frühfestigkeit*) maßgeblich sein. Dies ist zum Beispiel der Fall bei der Festlegung von Terminen zum Aufbringen der Vorspannung oder zum Ausschalen bzw. Aufbringen früher Belastungen oder zur Abschätzung eines ausreichenden Frostwiderstands im jungen Alter (s. Abschnitt II.5.5). Für Sicherheitsbetrachtungen sowie für die nachträgliche Ermittlung der Betonfestigkeitsklasse, aber auch für Bauteile, für die eine bestimmte Festigkeit erst in späterem Alter gefordert wird, ist demgegenüber die *Nacherhärtung* bedeutsam (s. Abschnitt II.5.4.2).

Während die 28-Tage-Druckfestigkeit in der Regel an gesondert hergestellten Probekörpern nach normgemäßer Lagerung bestimmt wird, ist für den Nachweis der Frühfestigkeit der tatsächliche Erhärtungszustand des Betons im Bauteil zu ermitteln. Dies kann an gesondert hergestellten Probekörpern erfolgen, deren Lagerungstemperatur entsprechend der Bauwerkstemperatur gesteuert wird, oder durch zerstörende oder zerstörungsfreie Prüfungen am Bauwerk. Zu letzteren gehören zum Beispiel die mechanische Prüfung mit dem Rückprallhammer oder die

Ermittlung der Festigkeit in Abhängigkeit von dem am Bauteil gemessenen Temperaturverlauf (s. Abschnitt II.5.4.1).

In DIN EN 206-1/DIN 1045-2 erfolgt die Einteilung der Betone in Festigkeitsklassen, denen die 28-Tage-Druckfestigkeit zugrunde liegen (s. Tafeln IV.3-8 und IV.3-9).

Die Druckfestigkeit f_c von Beton wird in der Regel an gesondert hergestellten Probekörpern bestimmt. Üblich sind Würfel von 150 mm Kantenlänge ($f_{c,cube}$) oder Zylinder mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe ($f_{c,cyl}$), die nach in DIN 1048 genormtem Verfahren hergestellt und geprüft werden. Die Festigkeit bei Prüfung im Alter von 28 Tagen, d. h. das 5 % Quantil nach statistischer Auswertung der Prüfergebnisse, wird als charakteristische Mindestdruckfestigkeit f_{ck} bezeichnet.

Die im einachsialen Druckversuch ermittelte Festigkeit f_c wird berechnet nach

$$f_c = \max \sigma_D = \frac{\max F}{A} \quad [\text{Gl.II.5.1-1}]$$

$\max \sigma_D$ = größte Druckspannung

$\max F$ = Höchstdruckkraft

A = Ausgangsquerschnitt

Das Versagen von Beton unter einachsialer Druckbeanspruchung wird durch Zugspannungen zwischen Matrix und Gesteinskörnung verursacht (s. Abschnitt II.3). Das Maß einer Querdehnungsbehinderung bei der Prüfung beeinflusst deshalb das Messergebnis, beispielsweise den Unterschied zwischen Würfel- und Zylinderdruckfestigkeit.

Wenn nicht anders vereinbart, wird die Druckfestigkeit an Probewürfeln mit 150 mm Kantenlänge $f_{c,dry,cube}$ ermittelt, die nach dem nationalen Anhang zur DIN EN 12390-2 einen Tag in ihrer Form verbleiben, sechs Tage wassergelagert und anschließend

bis zum Prüftermin luftgelagert werden (bisherige Lagerung nach DIN 1048-5). Die Druckfestigkeit an Probewürfeln mit 150 mm Kantenlänge $f_{c, \text{cube}}$, die entsprechend dem Referenzverfahren DIN EN 12390-2 bis zum Prüftermin wassergelagert werden, kann aus der Druckfestigkeit $f_{c, \text{dry, cube}}$ berechnet werden. Die Umrechnungsfaktoren sind von der Betonfestigkeitsklasse abhängig:

Normalbeton bis zur Festigkeitsklasse C55/67

$$f_{c, \text{cube}} = 0,92 \cdot f_{c, \text{dry, cube}} \quad [\text{Gl.II.5.1-2}]$$

Hochfester Normalbeton ab Festigkeitsklasse C60/75

$$f_{c, \text{cube}} = 0,95 \cdot f_{c, \text{dry, cube}} \quad [\text{Gl.II.5.1-3}]$$

Die Druckfestigkeit kann auch an 100-mm-Würfeln ermittelt werden. Der durch die Würfelabmessungen bedingte Unterschied der ermittelten Druckfestigkeit wird dabei mit Hilfe eines in DIN EN 1045-2 enthaltenen Gestaltfaktors berücksichtigt.

$$f_{c, \text{dry (150 mm)}} = 0,97 \cdot f_{c, \text{dry (100 mm)}} \quad [\text{Gl.II.5.1-4}]$$

Die Festigkeit im Bauwerk, die durch zerstörende Prüfverfahren nach DIN 1048-4 an Bohrkernen ermittelt wird, kann bis zu ca. 15 % niedrigere Festigkeitswerte liefern als die an gesondert hergestellten Prüfkörpern bestimmte Festigkeit. Ursache dafür sind unter anderem die häufig geringere Verdichtung oder bei massigen Bauteilen die erhöhte Erhärtungstemperatur. Bei den aus Bauteilen entnommenen Prüfkörpern soll die geringste Prüfkörperabmessung das 3fache des Größtkorns der Gesteinskörnung nicht unterschreiten.

Durch zerstörungsfreie Prüfverfahren nach DIN 1048 Teil 2 und Teil 4 mit dem Rückprallhammer bzw. nach DIN ISO 8047 mit dem Ultraschallprüfgerät sind überschlägige Prüfungen der Bauwerkfestigkeit möglich. Diese Verfahren erlauben eine Erfassung der Festigkeitsänderungen und eine Abgrenzung verschiedener Betonbereiche im Bauwerk.

5.1.3 Zugfestigkeit von Beton

Das Verhalten von Beton unter Zugbeanspruchung kann entweder im *zentrischen Zugversuch* oder alternativ im Spaltzug- bzw. Biegezugversuch bestimmt werden. **Bild II.5.1-1** zeigt die Verfahren zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit.

Die Festigkeit unter zentrischer Zugbeanspruchung f_{ct} wird berechnet nach

$$f_{ct} = \max \sigma_z = \frac{\max F}{A} \quad [\text{Gl.II.5.1-5}]$$

$\max \sigma_z$ = größte Zugspannung

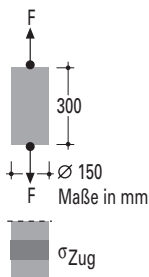
$\max F$ = Höchstzugkraft

A = Ausgangsquerschnitt

Für die Prüfung der zentrischen Zugfestigkeit ist es zweckmäßig, den Querschnitt der Probekörper im mittleren Bereich zu verjüngen, um den Bruch in diesem Bereich zu erzwingen. In diesem Bereich kann von einem nahezu einachsigen Spannungszustand ausgegangen werden. Die zentrische Zugfestigkeit von Beton liegt etwa zwischen 1,5 und 4 N/mm².

Zur Ermittlung der *Spaltzugfestigkeit* $f_{ct, sp}$ werden Probekörper auf zwei gegenüberliegenden parallelen Linien ihrer Oberflächenbegrenzung bis zur Spaltung belastet. Dabei treten in Richtung der Lastebene Druck-, senkrecht dazu Zugspannungen, also ein zweiachsiger Spannungszustand auf. Die so ermittelte Spaltzugfestigkeit mit Werten zwischen 2 und 6 N/mm² [Hil1] liegt damit geringfügig über denen der zentrischen Zugfestigkeit.

Die *Biegezugfestigkeit* $f_{ct, fl}$ ist die an Balken auf zwei Stützen bis zum Bruch erreichte Höchstbiegespannung, die in der Regel durch eine mittige Einzellast (3-Punkt-Biegeversuch) oder durch zwei symmetrische Einzellasten (4-Punkt-Biegeversuch) erzeugt wurde. Bei Beton mit einer gegenüber der Druckfestigkeit wesentlich geringeren Zugfestigkeit tritt der Bruch durch Versa-



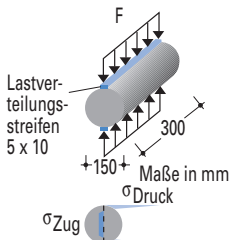
Zentrische Zugfestigkeit

$$f_{\text{ct}} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2}$$

f_{ct} Zugfestigkeit in N/mm^2

F Höchstlast in N

d Durchmesser des Zylinders in mm



Spaltzugfestigkeit

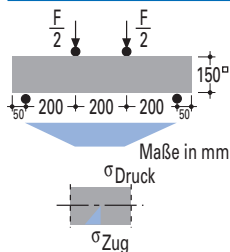
$$f_{\text{ct,sp}} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l}$$

$f_{\text{ct,sp}}$ Spaltzugfestigkeit in N/mm^2

F Höchstlast in N

d Durchmesser des Zylinders in mm

l Länge des Zylinders in mm



Biegezugfestigkeit

$$f_{\text{ct,fl}} = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2}$$

$f_{\text{ct,fl}}$ Biegezugfestigkeit in N/mm^2

F Höchstlast in N

l Stützweite des Balkens in mm

b Breite des Balkens im Bruchquerschnitt in mm

h Höhe des Balkens im Bruchquerschnitt in mm

Bild II.5.1-1: Verfahren zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit

gen der Zugzone ein. Die Biegezugfestigkeit ist ungefähr doppelt so groß wie die zentrische Zugfestigkeit. Die Biegezugfestigkeit üblicher Betone liegt etwa zwischen 3 und 8 N/mm² [Hil1] und ist maßgeblich für auf Biegezug beanspruchte, unbewehrte bzw. schwach bewehrte Betonbauteile, wie zum Beispiel Betonfahrbahnplatten, Estriche, Gehwegplatten.

Näherungsweise kann die mittlere Zugfestigkeit f_{ctm} von Normalbeton nach DIN 1045-1 aus der Druckfestigkeit berechnet werden:

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad [\text{Gl.II.5.1-6}]$$

bis Festigkeitsklasse C50/60 und

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{ck} + 8)/10)) \quad [\text{Gl.II.5.1-7}]$$

ab Festigkeitsklasse C55/67

Die mittlere Zugfestigkeit von Leichtbeton f_{lctm} kann unter Berücksichtigung des Beiwerts η_1 mit Gleichungen Gl.II.5.1-6 und Gl.II.5.1-7 berechnet werden:

$$f_{lctm} = \eta_1 \cdot f_{ctm} \quad [\text{Gl.II.5.1-7}]$$

wobei

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \cdot \rho / 2200 \quad [\text{Gl.II.5.1-8}]$$

mit ρ in kg/m³.

5.2 Einflüsse auf die Festigkeitsentwicklung

Eine Zusammenstellung der Einflüsse auf die Betondruckfestigkeit zeigt **Bild II.5.2-1**.

Fast alle Festbetoneigenschaften werden von der Zusammensetzung der Matrix und dabei maßgebend vom Zementsteinporenraum, d. h. insbesondere vom Wasserzementwert und vom Hydratationsgrad, bestimmt. **Bild II.5.2-2** zeigt beispielhaft den Einfluss des Wasserzementwerts auf die absolute und auf die relative *Festigkeitsentwicklung*. Ein niedrigerer Wasserzementwert führt nicht nur zu einer größeren Festigkeit nach 28 Tagen

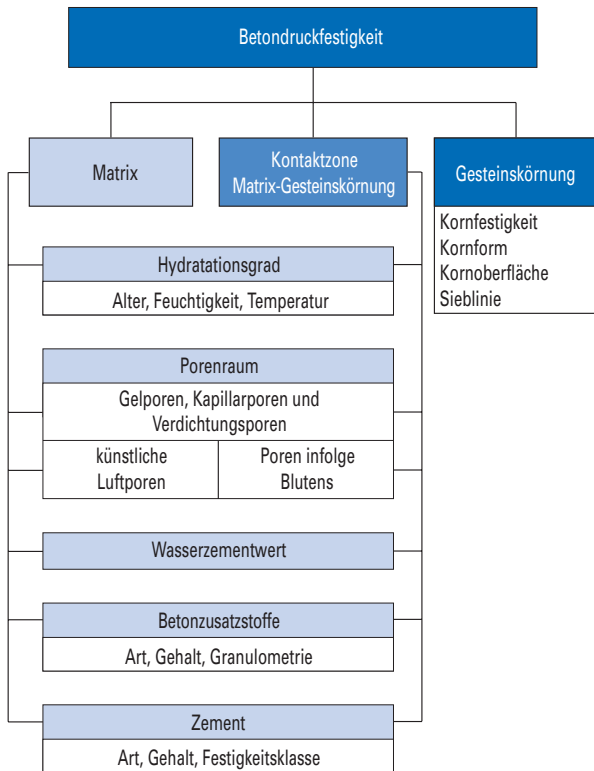


Bild II.5.2-1: Wesentliche Einflüsse auf die Betondruckfestigkeit

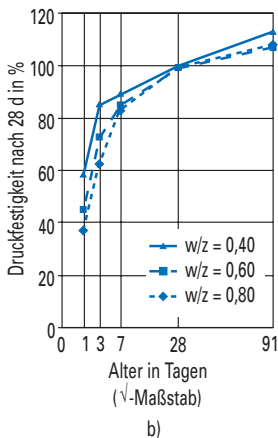
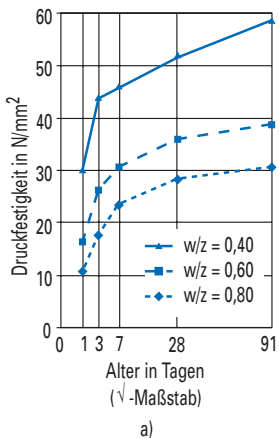


Bild II.5.2-2: Festigkeitsentwicklung von Betonen mit verschiedenen Wasserzementwerten (CEM I 32,5 R, Zementgehalt 200, 270 und 400 kg/m³) [Wis6]

a) Absolute Werte

b) Relative Werte (28 Tage entspricht 100 % Druckfestigkeit)

(Bild II.5.2-2 (a)), sondern auch zu einer schnelleren Festigkeitsentwicklung (Bild II.5.2-2 (b)) [Wis6, Mey2]. Die Druckfestigkeitsentwicklung wird weiterhin durch schnellere Hydratation beschleunigt. Der Hydratationsfortschritt steigt beispielsweise durch feinere Mahlung der Zemente, bei höherer Zementfestigkeitsklasse, durch höhere Reaktivität der Betonzusatzstoffe und durch höhere Temperatur, zum Beispiel infolge Hydratationswärme.

Zu den übrigen Einflussgrößen auf die Betondruckfestigkeit nach Bild II.5.2-1, z. B. zum Einfluss der Gesteinskörnung

siehe Abschnitt II.3. Hinweise zum Porenraum sind in Abschnitt II.3.3 enthalten. Mit Poren infolge Blutens sind die Poren gemeint, die durch Wasserabsetzen unter groben Körnern entstehen können [Gru3].

5.3 Festigkeits- und Hydratationswärmeentwicklung

5.3.1 Temperaturverlauf infolge Hydratationswärme

Das Erhärten des Betons, das durch die Hydratation des Zements (s. Abschnitt I.4.1.3) verursacht wird, ist ein exothermer Vorgang. Gleichzeitig mit dem Erhärten wird Wärme freigesetzt, die zu einer *Temperaturerhöhung* im Bauteil führen kann. Erhöhte Temperatur hat eine beschleunigte *Frühfestigkeitsentwicklung* des Betons zur Folge, gleichgültig, ob sie durch einen Zement mit hoher Anfangsfestigkeit, einen erhöhten Zementgehalt, höhere Frischbeton- oder Umgebungstemperaturen oder durch einen langsamen Wärmeabfluss hervorgerufen wird.

Erhöhte Temperaturen im Bauteil während der Erhärtung haben auch entsprechende Temperaturverformungen zur Folge. Werden diese behindert, so treten Zwangsspannungen auf (s. Abschnitt II.6).

Bei entsprechenden *Wärmeabflussbedingungen*, zum Beispiel in dünnen Bauteilen, kann die *Hydratationswärme* unmittelbar aus dem Beton abfließen, ohne einen spürbaren Temperaturanstieg im Beton zu verursachen. Je kleiner der Wärmeabfluss ist, umso größer ist der Temperaturanstieg. So entwickeln sich zum Beispiel in dickeren Betonbauteilen (s. Abschnitt II.10.4) oder bei wärmedämmender Schalung bzw. wärmedämmenden Abdeckungen vergleichbar höhere Bauteiltemperaturen im gleichen Beton. Die unterschiedlichen Temperaturbedingungen, unter denen die Hydratation erfolgen kann, werden als *isotherme*, *adiabatische* oder *teiladiabatische Bedingungen* bezeichnet.

Tafel II.5.3-1: Richtwerte für die Hydratationswärme von Zementen bestimmt mit dem Lösungskalorimeter nach DIN 1164-8:1978 (isotherme Lagerung, 20 °C)

| Zement- festigkeits- klasse | Hydratationswärme in kJ/kg nach ... Tagen | | | | HW _∞ in kJ/kg | |
|-----------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|--------------------------|--|
| | 1 | 3 | 7 | 28 | Portland- zement | Portlandhütten- und Hoch- ofenzement |
| 32,5 N | 60...175 | 125...250 | 150...300 | 200...375 | 375...525 | 355...440 |
| 32,5 R/42,5 N | 125...200 | 200...335 | 275...375 | 300...425 | | |
| 42,5 R/52,5 N 52,5 R | 200...275 | 300...350 | 325...375 | 375...425 | | |

Bleibt die Temperatur konstant, liegen isotherme Bedingungen vor. Bei vollständiger Hydratation wird bei konstanter Lagerungstemperatur die Wärmemenge HW freigesetzt (s. Abschnitt I.4.1.3). Die Mittelwerte für HW_∞ von den am häufigsten in Konstruktionsbetonen eingesetzten Zementen unterscheiden sich nur um ca. 20 % voneinander [Hin1]. Im zeitlichen Verlauf der bei konstanter Lagerungstemperatur von 20 °C freigesetzten Hydratationswärmern unterscheiden sich jedoch die verschiedenen Zementarten und –festigkeitsklassen. Aus **Tafel II.5.3-1** geht hervor, dass rund 30 bis 50 % der gesamten Wärme innerhalb des ersten Tages und rund 50 bis 75 % in den ersten sieben Tagen freigesetzt wird. Zemente, die innerhalb der ersten sieben Tage in der Prüfung gemäß DIN 1164-8:1978 weniger als 270 J/g Wärme entwickeln, werden nach DIN 1164 als Zemente mit niedriger Wärmeentwicklung (NW-Zemente) bezeichnet.

Solche isothermen Bedingungen können nur aufrecht erhalten werden, wenn eine Wärmemenge entsprechend der durch die

Hydratation freigesetzten Wärme abgeführt wird. Wenn keine Wärme zwischen dem Bauteil und der Umgebung ausgetauscht wird, handelt es sich um adiabatische Temperaturbedingungen, wie sie in etwa im Kern einer Schwergewichtsstaumauer in den ersten Stunden nach dem Betonieren vorherrschen. Eine vollständige adiabatische Temperaturerhöhung (s. Abschnitt II.5.3.2) im gesamten Bauteil ist in der Praxis nicht möglich, da während der Erwärmung bereits immer Wärme abfließt (**Bild II.5.3-1**).

Übliche Bauteilabmessungen führen dazu, dass die Hydratation des Zements weder unter isothermen noch unter adiabatischen Bedingungen abläuft. Der Vorgang ist dadurch gekennzeichnet, dass nur die schnelle Anfangsreaktion unter fast adiabatischen Verhältnissen abläuft [Hub1]. Das Temperaturmaximum wird erreicht, sobald sich ein Gleichgewicht zwischen entstehender und abfließender Wärmemenge einstellt (**Bild II.5.3-2**). Der zeitliche Verlauf der *Hydratationswärme*freisetzung, der im Labor bei isothermen oder adiabatischen Bedingungen ermittelt wird, stellt, bezogen auf die gleiche Starttemperatur von zum Beispiel 20 °C, für eine bestimmte Mörtel- oder Betonzusammensetzung einen definierten unteren und oberen Grenzverlauf dar [Hin1].

5.3.2 Adiabatische Bauteilbedingungen

Zur Vorhersage der *Temperaturerhöhung* ΔT_n nach t Tagen im Kern dickwandiger Bauteile (nahezu adiabatisch) eignen sich adiabatische Versuche. Die adiabatische Temperaturerhöhung im Bauwerk kann unter Berücksichtigung der adiabatisch bis zum untersuchten Zeitpunkt jeweils ermittelten *Hydratationswärme* des Zements $H_n(t)$ (in kJ/kg) näherungsweise wie folgt berechnet werden:

$$\Delta T_n(t) = \frac{z \cdot H_n(t)}{Q_B} \text{ in K (Kelvin)} \quad [\text{Gl.II.5.3-1}]$$

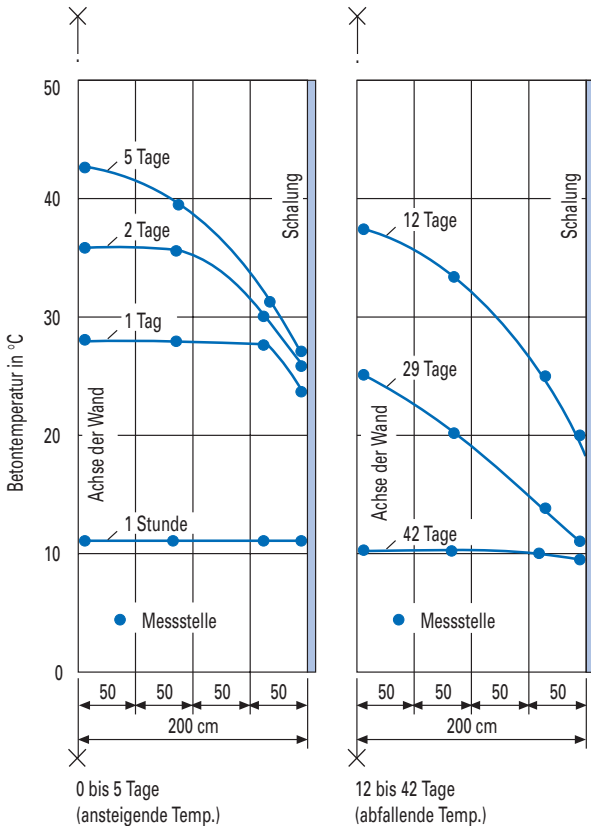


Bild II.5.3-1: Temperaturverlauf in einer 4 m dicken Wand bei Erwärmung infolge Hydratation und nachfolgender Abkühlung [Bas1]

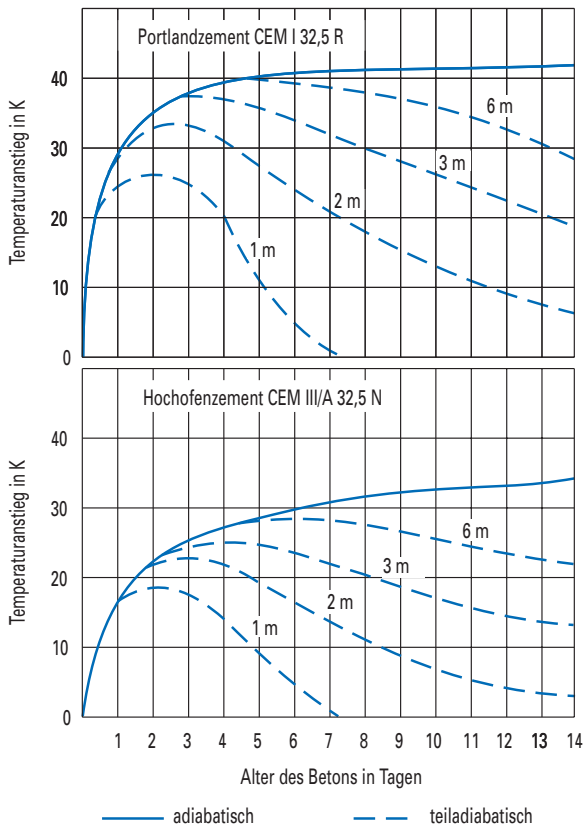


Bild II.5.3-2: Verlauf des Temperaturanstiegs infolge Hydrationswärme im Kern von Betonbauteilen unterschiedlicher Dicke. Beispiele für Betone mit 300 kg/m^3 Zement [Bas1]

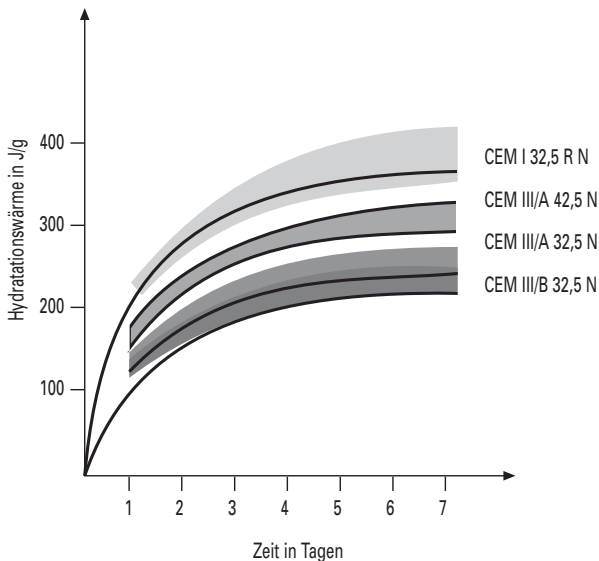


Bild II.5.3-3: Hydrationswärme H_n verschiedener Zemente unter adiabatischen Bedingungen [Vin1]

mit:

z = Zementgehalt in kg/m^3

Q_B = Wärmekapazität des Betons in $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ mit

$$Q_B = \rho_B \cdot c_B$$

Für Normalbeton können näherungsweise für die Betonrohddichte $\rho_B = 2350 \text{ kg}/\text{m}^3$ und für die spezifische Wärmekapazität des Betons $c_B = 1,1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ eingesetzt werden.

Für die Berechnung des anfänglichen Temperaturverlaufs im Bauwerk nach Gleichung II.5.3-1 sind die bis zum jeweiligen

Zeitpunkt (t) adiabatisch gemessenen Werte für die Hydrationswärme $H_n(t)$ anzusetzen, die für verschiedene Zemente in **Bild II.5.3-3** dargestellt sind. Die adiabatisch bestimmten Werte für die Hydrationswärme liegen über den unter konstanter Temperatur (isotherm bei 20 °C) nach Tafel II.5.3-1 ermittelten Werten. Für Zemente mit hoher Anfangsfestigkeit beträgt nach sieben Tagen die unter isothermen Bedingungen ermittelte Hydrationswärme ca. 90 % der adiabatisch bestimmten Wärme. Für Hochofenzemente mit niedriger Hydrationswärme liegt das Verhältnis bei etwa 75 % [Eis1]. Für ein geringeres Alter oder bei tieferen Temperaturen sind die Unterschiede noch größer.

Der Zeitpunkt $t_{\max T}$ bis zum Erreichen des Temperaturmaximums im Kern für Bauteildicken über 1 m kann mit der folgenden empirisch ermittelten Formel überschlägig berechnet werden [Wei1, Loh1, Bas1]:

$$t_{\max T} = 0,8 d + 1 \text{ in Tagen,} \quad [\text{Gl. II.5.3-2}]$$

wobei d für die Bauteildicke in m steht. Mit Hilfe der bis dahin freigesetzten Hydrationswärme kann die maximale Temperaturerhöhung im Bauteil abgeschätzt werden.

Zur Verminderung der Temperaturerhöhung hat sich für massige Bauteile der Einsatz von NW-Zementen bewährt, wenn die langsamere Festigkeitsentwicklung erwünscht ist (s. Abschnitt II.10.4) bzw. toleriert werden kann. Außerdem kann die Temperaturerhöhung durch einen möglichst geringen Zementgehalt und den Einsatz puzzolanischer Zusatzstoffe gemindert werden.

5.3.3 Teiladiabatische Bedingungen

Die rechnerische Ermittlung der Festigkeitsentwicklung unter teiladiabatischen Bedingungen in einem Bauteil erfordert mathematische Formulierungen, die den Einfluss der Betonzusammensetzung, der Ausgangstemperatur, der Wärmeabflussbedingun-

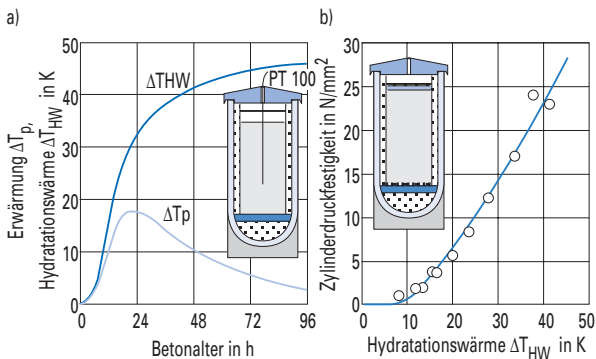


Bild II.5.3-4: Ergebnisse der experimentellen Bestimmung der Wärmefreisetzung und der Druckfestigkeitsentwicklung in einem Thermosflaschenversuch [Hin2]

gen (Bauteildicke, Schalung und wärmedämmende Ummantelung) sowie der Umgebungstemperatur auf die Hydrationswärmefreisetzung und damit auf den Temperaturverlauf berücksichtigen [Wei1]. Um die Übertragbarkeit solcher Modellrechnungen auf die Praxisverhältnisse zu verbessern, sind Erhärtungsprüfungen oft ein einfacher Weg, wenn sie näherungsweise die Bauteilbedingungen (Betonzusammensetzung, Frischbetontemperatur, Wärmeabflussverhältnisse) berücksichtigen. Hierfür eignen sich teiladiabatische Messsysteme [Me83], wie zum Beispiel solche mit einem handelsüblichen *Thermosgefäß* [Gru4]. Dabei teilt sich die freigesetzte Hydrationswärme in einen Anteil, der zur Temperaturerhöhung der Betonprobe führt, einen Anteil der je nach Dämmeigenschaften des Gefäßes in die Umgebung abfließt und einen Anteil der zur Erwärmung des Kalorimeters erforderlich ist (**Bild II.5.3-4 (a)**).

Durch eine Energiebilanz lässt sich aus der Erwärmungskurve der Betonprobe ΔT_P die zugrunde liegende Hydratationswärme-freisetzung als „Temperaturänderung“ des Betons ΔT_{HW} berechnen. Ein solcher Hydratationswärmeverlauf gilt zunächst nur für den Temperaturgang der Messung, da die Hydratationsgeschwindigkeit temperaturabhängig ist. Diese Abhängigkeit kann über Reifefunktionen erfasst werden (s. Abschnitt II.5.4) [Hin2, Hin1, Gru4].

In den gleichen Gefäßen, die für die Wärmemessung eingesetzt werden, lassen sich auch zylindrische Prüfkörper für die Festigkeitsbestimmung lagern. Für unterschiedliche Temperaturgänge bei Variation der Frischbeton- und Umgebungstemperatur bzw. für unterschiedliche Prüfalter lassen sich frühe Druckfestigkeiten ermitteln. Bezogen auf die freigesetzte Hydratationswärme ΔT_{HW} erhält man eine weitere Kennlinie des jeweiligen Betons (**Bild II.5.3-4 (b)**). Es handelt sich dabei um eine praxisnah geprüfte *Festigkeits-Hydratationsgrad-Beziehung*. Mit dieser Kennlinie liegt ein objektives Kriterium vor, mit dem verschiedene Betone hinsichtlich einer Optimierung von Wärmefreisetzung und Festigkeitsentwicklung beurteilt werden können.

Im **Bild II.5.3-5** sind die Kennlinien für Normalbetone, die jeweils mit verschiedenen Zementen hergestellt wurden, dargestellt. Für Betone üblicher Zusammensetzung ist zum Erreichen einer angestrebten Festigkeit die erforderliche Wärmefreisetzung im Bereich von Wasserzementwerten zwischen 0,5 (hier nicht gezeigt) und 0,6 nahezu unabhängig vom eingesetzten Zement [Hin1, Hin2]. Der dargestellte Zusammenhang zeigt, dass schon relativ geringe Festigkeiten eine erhebliche Wärmefreisetzung bedingen. Beispielsweise wird für eine Druckfestigkeit von lediglich 5 bis 7 N/mm² eine Hydratationswärme benötigt, die einer rechnerischen Temperaturerhöhung ΔT_{HW} von rd. 20 K entspricht. Diese Wärmefreisetzung wird von den verschiedenen

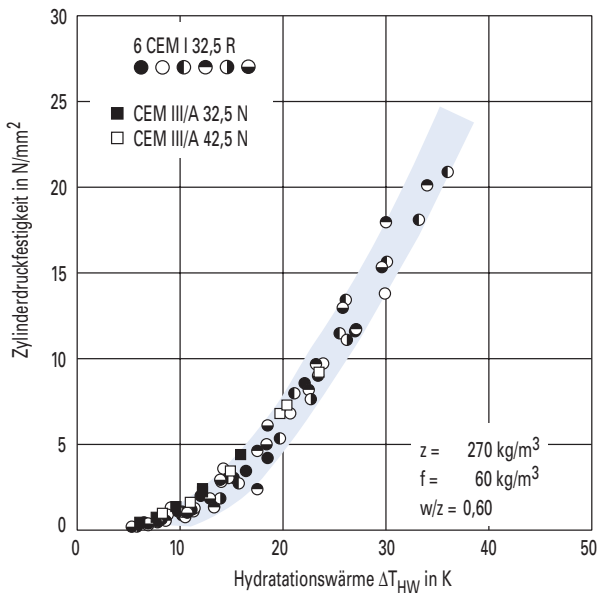


Bild II.5.3-5: Zylinderdruckfestigkeit nach Lagerung im Thermosgefäß (Gesteinskörnung Rheinkiessand, Sieblinie A16/B16) [Hin2]

zusammengesetzten Betonen in Abhängigkeit zum Beispiel von Zementart und -festigkeitsklasse, Wassermenge und der Frischbetontemperatur in sehr unterschiedlichen Altern erreicht.

Die bei normalfesten Betonen bestehende enge Korrelation zwischen der zum Prüfzeitpunkt entwickelten „quasi-adiabatischen“ Temperaturerhöhung und der zugehörigen Druckfestig-

keit besteht auch bei hochfesten Betonen. Allerdings wurden, wie in **Bild II.5.3-6** dargestellt, bei den hochfesten Betonen mit abnehmenden w/z -Werten und besonders infolge der Zugabe von Silicastaub etwas höhere Festigkeiten bei gleicher „quasi-adiabatischen“ Temperaturerhöhung gemessen. Dies kann zum einen auf das hohe Verhältnis von reaktiver Oberfläche zum Wasserangebot zurückgeführt werden, wodurch auch wesentlich

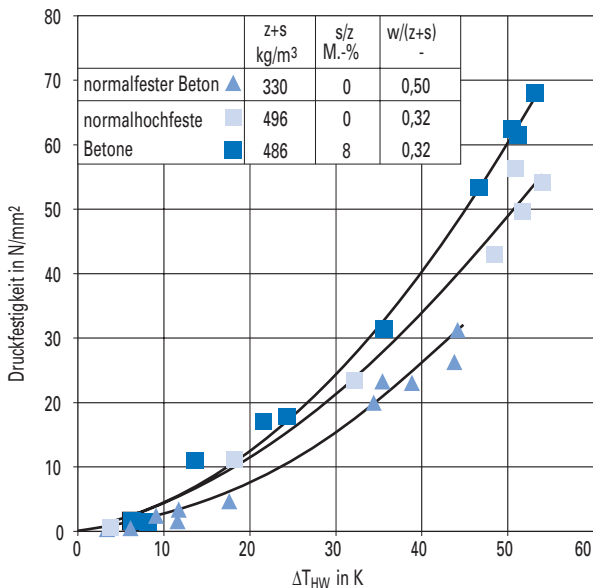


Bild II.5.3-6: Zylinderdruckfestigkeit nach Lagerung im Thermosgefäß (Gesteinskörnung Rheinkiesand, Sieblinie A16/B16; Zement CEM I 42,5 R) [Thi6]

höhere Temperaturen in teiladiabatischen Versuch erreicht werden als bei normalfestem Beton. Zum anderen trägt die puzzolanische Reaktion des Silicastaubs bei vergleichbar geringerer Hydratationswärme erheblich zur Festigkeit bei [Thi6].

Die Festigkeitserhöhung infolge Silicastaubzugabe entsteht zum einen durch eine Verringerung der Kapillarporosität in der Mehlkornmatrix und zum anderen durch den verbesserten Verbund zwischen Matrix und Gesteinskörnung.

5.3.4 Einfluss der Frischbeton- bzw. Umgebungstemperatur auf die Festigkeitsentwicklung

Je höher die Frischbetontemperatur ist, umso schneller wird infolge der rascher ablaufenden Hydratation Wärme freigesetzt. Entsprechend schneller steigt die Frühfestigkeit und entsprechend höher wächst die Temperatur im Betonbauteil an. Bei niedrigeren Frischbetontemperaturen steigt die Frühfestigkeit langsamer und die Temperatur bleibt im Bauteil niedriger. Zur Steigerung der Frühfestigkeit stehen somit folgende Maßnahmen zur Verfügung: Eine Betonzusammensetzung mit hoher Frühfestigkeit durch entsprechende Wahl von Zement, Wasserzementwert und Zusatzmittel, eine erhöhte Temperatur des Frischbetons sowie eine *Wärmebehandlung* des verdichteten Betons. Diese Maßnahmen lassen sich teilweise miteinander kombinieren.

Frischbetontemperaturen oberhalb 20 °C beschleunigen die Festigkeitsentwicklung erheblich (**Bild II.5.3-7**). Im Alter von zwölf Stunden wird zum Beispiel bei gleichen Wärmeabfließbedingungen die Festigkeit bei einer Frischbetontemperatur von 25 °C im Vergleich zu einer Frischbetontemperatur von 20 °C fast verdoppelt bzw. eine Festigkeit von zum Beispiel 4 N/mm² zwei bis drei Stunden früher erreicht. Bei niedrigen Frischbetontempera-

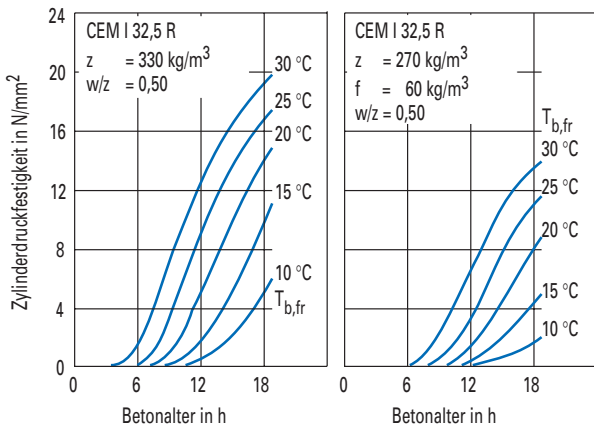


Bild II.5.3-7 Zylinderdruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Frischbetontemperatur für zwei Betone in einem Bauteil mit 0,6 m Dicke in Stahlschalung [Hin2]

turen wird die Festigkeitsentwicklung deutlich verzögert, und zwar um ca. drei Stunden je 5 K Temperatursenkung. Ein Beton, der mit einem vergleichbar schnell erhärtenden Zement CEM I 32,5 R hergestellt wurde, braucht zum Beispiel eine Frischbetontemperatur von wenigstens 15 °C, um nach zwölf Stunden eine Festigkeit von 4 N/mm² sicher zu erreichen. Bei noch niedrigeren Temperaturen müsste entweder der Wasserzementwert nennenswert gesenkt werden oder ein deutlich schneller erhärtender Zement eingesetzt werden. Wird in einem Beton mit demselben Zement ein Teil des Zements durch Flugasche ausgetauscht (Bild II.5.3-7) wird eine Festigkeit von 4 N/mm² nach zwölf Stunden nur sicher erreicht, wenn die Frischbetontemperatur wenigstens 25 °C beträgt. Die in den Bil-

dern II.5.3-5 und II.5.3-6 für die Zemente 32,5 R dargestellten Zusammenhänge gelten in ähnlicher Weise auch für Zemente der Zementfestigkeitsklasse 42,5 [Hin2].

Zur Steigerung der Frischbetontemperatur gibt es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten. Entweder das Vorwärmen einzelner Ausgangsstoffe oder das Einmischen von Dampf während des Mischvorgangs, was als *Dampfmischen* bezeichnet wird. Dabei ist [Me2] zu beachten (s. Abschnitt II.4.4 und II.9). Ist die Temperatur der Ausgangsstoffe verschieden hoch und wird von außen keine Wärme zu- oder abgeführt, so lässt sich die Frischbetontemperatur näherungsweise wie in Abschnitt II.4.4 entsprechend Gl. II.4.4-1 angegeben berechnen.

Die *Wärmebehandlung* des Betons (s. Abschnitt II.11.2) ist das am weitesten verbreitete Verfahren zur Erhöhung der Frühfestigkeit und ist in Betonwerken ein erprobtes Verfahren, um möglichst frühzeitig entformen zu können oder bei Spannbetonbauteilen ein frühzeitiges Vorspannen zu ermöglichen. Hierbei ist die DAfStb-Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton [Ri17] zu beachten.

5.4 Alters- und temperaturabhängiger Verlauf der Druckfestigkeit

5.4.1 Reife des Betons

Die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit ist für jeden Beton hauptsächlich von der Zusammensetzung und den Lagerungsbedingungen abhängig. Für die Ermittlung der altersabhängigen Druckfestigkeit können empirische Rechenansätze, z. B. entsprechend dem CEB-FIP Model Code 1990 bzw. [Wes1] angewendet werden, die einerseits die Betonzusammensetzung und andererseits den Temperatureinfluss über das *wirksame Alter* berücksichtigen.

Der Einfluss unterschiedlicher Temperaturverläufe auf die Festigkeitsentwicklung eines bestimmten Betons lässt sich quantitativ anhand der *Reife* abschätzen. Sie ist ein Maß für den Erhärtungszustand zu einem bestimmten Betonalter in Abhängigkeit von der Erhärtungsdauer und dem dazugehörigen Temperaturverlauf. Sie ist so definiert, dass ein unter verschiedenen Temperaturverläufen erhärtender Beton gleicher Zusammensetzung die gleiche Druckfestigkeit erreicht, wenn er die gleiche Reife hat.

Die einfachste Beziehung für die Bestimmung der Reife ist die Formel nach Saul (**Tafel II.5.4-1**). Diese Beziehung lässt allerdings unberücksichtigt, dass die Reife bei höherer Temperatur überproportional zunehmen müsste und dass dieser Einfluss auch noch von der Zementart abhängt. Diese Einflüsse können durch die Arrhenius-Funktion mit entsprechend gewählter Aktivierungsenergie des Zements erfasst werden und führen zu einer „gewichteten Reife“, z. B. RILEM TC 119-TCE (s. Abschnitt IV.2) [Bun1, Hin1].

Die Methode nach de Vree [Vre1] wählt ebenfalls einen Ansatz zur Ermittlung einer gewichteten Reife, der vor allem bei höheren Temperaturen (zum Beispiel Wärmebehandlung) besser der tatsächlichen Festigkeitsentwicklung entspricht (Tafel II.5.4-1) als der Ansatz von Saul. Der ähnlich der Arrhenius-Gleichung aufgebaute Ansatz berücksichtigt den Einfluss des Zements und der Temperatur [Bun1]. Der Wichtungsfaktor für die Zementart (*C-Wert*) hängt von der Zementzusammensetzung ab und kann für baupraktische Berechnungen hinreichend genau in Abhängigkeit vom Klinkergehalt abgeschätzt werden (Tafel II.5.4-1).

Um aus der Reife die Druckfestigkeit ableiten zu können, muss für jede Betonzusammensetzung eine Kalibrierkurve auf der Basis eines bekannten Zeit-Temperatur-Druckfestigkeitsverlaufs aufgestellt werden [Bun1].

Tafel II.5.4-1: Reifefunktionen

| | | |
|-----------------|---|--------------------------|
| nach Saul | $R = \Sigma(T_i + 10) \cdot \Delta t_i$ | in h · °C |
| | mit Δt_i Zeitintervall in h T_i mittlere Betontemperatur in °C im Zeitintervall Δt_i | |
| nach de Vree | $cal R = \Sigma r_i \cdot \Delta t_i$ | in h · °C |
| | mit Δt_i Zeitintervall in h Δr_i gewichtete Reife innerhalb des Zeitintervalls Δt_i | |
| | $r_i = \frac{10}{\ln C} \cdot [C^{(0,1 T_i - 1,245)} - C^{-2,245}]$ in °C | |
| | mit T_i mittlere Betontemperatur in °C im Zeitintervall Δt_i | |
| | C Wichtungsfaktor für die Zementart | |
| | Gehalt an Zement- klinker in M.-% | C-Wert |
| | > 65 50 bis 64 35 bis 49 20 bis 34 | 1,3 1,4 1,5 1,6 |

Die Anwendung des C-Wert-Verfahrens ist von Vorteil für die zerstörungsfreie, kontinuierliche Ermittlung der Druckfestigkeit von jungem Beton, z. B. für die Festlegung der Reife für das Vorspannen, Ausschalen oder Anheben von Betonfertigteilen und für die Festlegung der Mindestnachbehandlungsdauer (s. auch [Lan1, Vre1]).

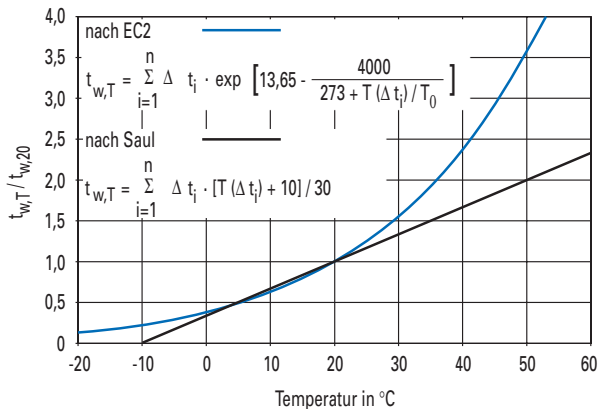


Bild II.5.4-1: Relatives wirksames Alter (T_i stellt die Temperatur im Zeitintervall Δt_i dar)

Anstelle des Reifegrads wird auch der Begriff *des wirksamen Betonalters* benutzt. Das aus dem Temperatur-Zeit-Verlauf errechnete wirksame Betonalter entspricht dem wahren Betonalter, wenn der Beton ständig bei einer Normtemperlagerung von 20 °C erhärtet ist. Mit diesem wirksamen Alter kann die bis zu diesem Zeitpunkt erreichte Betonfestigkeit abgeschätzt werden, wenn der Festigkeitsverlauf für die Normtemperatur bekannt ist.

Bild II.5.4-1 zeigt den temperaturabhängigen Verlauf des relativen wirksamen Alters nach Eurocode 2. Die einfache Näherung nach Saul stimmt im Temperaturbereich 5 °C < T < 25 °C gut mit diesem Verlauf überein, für T > 25 °C wird jedoch die beschleunigende Wirkung erhöhter Temperaturen unterschätzt. Für Temperaturen kleiner als 5 °C wird nach Saul die verlangsamende Wirkung niedriger Temperaturen überschätzt [Hill].

5.4.2 Nacherhärtung

Die 28-Tage-Druckfestigkeit ist unter anderem als Vergleichsbasis festgelegt worden, weil zementgebundene Mörtel und Betone im Alter von 28 Tagen bereits einen hohen Hydratationsgrad aufweisen und weil der Prüftag auf den gleichen Wochentag fällt wie der Herstelltag. Auch nach dem 28. Tag besitzt der Beton noch ein Erhärtungspotenzial, wodurch er immer fester wird, sofern er nicht vollständig austrocknet. Das Maß dieser *Nacherhärtung* ist je nach Zement, 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 der Wasserzementwert und die Lagerungsfeuchte sind und je niedriger die Lagerungstemperatur ist [Bon2]. Die Nacherhärtung von Betonen aus sehr schnell erhärtenden Zementen ist klein und übersteigt nach etwa 180 Tagen in der Regel 10 % nicht, zumal bei diesen Zementen zum Erreichen einer sehr hohen Frühfestigkeit häufig auch niedrige Wasserzementwerte gewählt werden. Demgegenüber weisen Betone aus langsam erhärtenden Zementen beträchtliche Nacherhärtungen auf, die in einzelnen Fällen nach 180 Tagen 50 % erreichen oder überschreiten können. Übereinstimmend ergeben Untersuchungen über drei und fünf Jahrzehnte, dass sich die Festigkeit – bezogen auf die 28-Tage-Druckfestigkeit bei Normlagerung – in der Praxis größenordnungsmäßig annähernd verdoppelt und in besonderen Fällen (grob aufgemahlene Zemente und hohe Wasserzementwerte) nahezu verfünffacht hat [Wal3].

Im Allgemeinen ist jedoch die Nacherhärtung über Jahrzehnte baupraktisch von geringerer Bedeutung. Dagegen kann die Festigkeitsentwicklung bis zu einem Alter von drei oder sechs Monaten, in besonderen Fällen sogar einem Jahr, bedeutsam sein, wenn das Bauwerk erst nach diesem Zeitraum entspre-

chend belastet wird und die Temperaturerhöhung im Bauteil äußerst klein gehalten werden soll oder wenn besondere Betrachtungen für die Bauwerksicherheit maßgebend sind.

Durch die Wahl der Zementfestigkeitsklasse werden bei gleicher Betonzusammensetzung unterschiedliche Druckfestigkeiten des Betons in jungem Alter erreicht. Sofern die für eine weitere Hydratation erforderliche Feuchtigkeit ständig vorhanden ist, gleichen sich diese zementbedingten Unterschiede durch die unterschiedliche Nacherhärtung zunehmend aus, sodass bereits in einem Alter von 180 Tagen Betone gleicher Zusammensetzung – unabhängig vom Zement – vergleichbare Druckfestigkeiten aufweisen [Dah1].

5.5 Erforderliche Erhärtungszeiten (Ausschaltfristen)

Ein Betonbauteil darf erst ausgeschalt bzw. entformt werden, wenn der Beton ausreichend erhärtet ist, um die Beanspruchungen während des Bauzustands mit ausreichender Sicherheit ohne Schädigung aufzunehmen. So ist beispielsweise für die *Gefrierbeständigkeit* eine Frühfestigkeit von etwa 5 bis 10 N/mm² notwendig. Schadfrees Stapeln und Transportieren von Betonwaren setzt eine hinreichende Kantenfestigkeit voraus, die im Allgemeinen bei einer Druckfestigkeit von wenigstens 20 N/mm² gegeben ist. Demgegenüber erfordert das Vorspannen oder das Befahren einer Straße i. d. R. eine Druckfestigkeit von mehr als 30 oder 40 N/mm².

Im Einzelfall können Erhärtungsprüfungen zum Beispiel durch Ermittlung des *Reifegrads* unter den vorgegebenen Bedingungen notwendig sein (s. Abschnitt II.5.4.1). Durch eine an den Bautakt und die Jahreszeit angepasste Wahl der Zusammensetzung können die Anforderungen an die *Festigkeitsentwicklung*

erfüllt werden. Dies stellt eine Optimierungsaufgabe dar, wenn die gewünschte Festigkeitsentwicklung wegen der Wärmefreisetzung nach oben begrenzt werden muss, zum Beispiel zur Verminderung von Zwangsspannungen (s. Abschnitt II.6.4) [Gru4, Thi3, Hin1, Hin2].

Die erforderliche Nachbehandlungsdauer wurde allgemein durch einen Mindesthydratationsgrad definiert, den ein Beton während der Nachbehandlung erreichen muss. Sie kann nach Tafel II.9.6-1 in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung des Betons abgeschätzt werden. Art und Festigkeit des Zements sind dabei nur noch indirekt ein Kriterium für den Nachbehandlungsbedarf (s. Abschnitt II.9.6).